

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Valutazioni di confronto fra la gestione aerobica e anaerobica di una discarica nell'economia circolare**



**Relatore**  
Prof.re Ruggeri Bernardo

**Candidato**  
Cermelli Alessandro

Sessione di laurea Marzo 2020

# Indice

<b>1. Introduzione: la discarica sostenibile</b>	<b>1</b>
1.1 Il ruolo della discarica nella gestione sostenibile dei rifiuti	2
1.2 La discarica di vecchia generazione	3
1.3 L'evoluzione delle moderne discariche	5
1.4 La transizione da smaltimento in discarica a trattamento	7
1.5 La Discarica anaerobica	7
1.6 La Discarica semi-aerobica	9
1.7 La Discarica aerobica	10
1.8 Tipologie di sistemi di aerazione	14
<b>2. Inquadramento della normativa di riferimento (linee guida per la progettazione e gestione sostenibile delle discariche)</b>	<b>17</b>
2.1 Principi ispiratori per la progettazione e la gestione	17
2.2 Criteri e linee guida sul trattamento dei rifiuti	19
2.3 Criteri e linee guida sulle barriere	20
2.4 Sistema di drenaggio e raccolta percolato	21
2.4.1 Pozzi di raccolta del percolato	21
2.4.2 Linee guida per la gestione del percolato	22
2.4.3 Stima della produzione di percolato in fase di gestione passiva	23
2.5 Criteri e linee guida per la copertura	24
2.6 Criteri per la gestione del biogas	25
2.7 Stima della produzione di biogas	26
2.8 Rifiuti non ammessi in discarica	27
<b>3. Breve descrizione delle caratteristiche di una discarica a servizio dell'economia circolare</b>	<b>29</b>
3.1 Breve descrizione delle scelte progettuali	30
3.2 Rifiuti conferibili	30
3.3 Bilanci di massa: principi per la progettazione	33
<b>4. Confronto tra gestione aerobica e anaerobica per una discarica a servizio dell'economia circolare</b>	<b>37</b>
4.1 Confronto tra i biogas prodotti	37
4.1.1 Descrizione del modello BIO-5	37
4.1.2 Gestione anaerobica	38

4.1.3 Gestione aerobica	54
4.1.4 Confronto tra le produzioni e le qualità di biogas	62
4.2 Confronto tra i percolati prodotti	73
4.2.1 Descrizione del modello di produzione	73
4.2.2 Gestione anaerobica: produzione di percolato in fase attiva e passiva	78
4.2.3 Gestione aerobica: produzione di percolato in fase attiva e passiva	100
4.2.4 Confronto tra le produzioni di percolato	129
<b>5. Valutazioni di sostenibilità economica delle due gestioni</b>	<b>137</b>
<b>6. Conclusioni</b>	<b>141</b>
<b>7. Bibliografia</b>	<b>145</b>
<b>8. Raccomandazioni finali e ringraziamenti</b>	<b>147</b>



# 1. Introduzione: la discarica sostenibile

La trattazione si pone come obiettivo il confronto tra la gestione aerobica e anaerobica di una discarica, evidenziando le differenze, le conseguenze, gli impatti che ciascuna tipologia gestionale avrebbe nei confronti dell'economia circolare e dell'ambiente. E' importante inizialmente introdurre il concetto di discarica sostenibile, anzitutto cosa si intende con questo termine? Di che sostenibilità stiamo parlando? Qual è il ruolo di una discarica sostenibile nell'economia circolare? Prima di proseguire, è essenziale dare una risposta a queste domande per comprendere meglio lo scopo di queste valutazioni, verranno inoltre presi in considerazione gli impatti generati da una discarica e il modo in cui queste sono state concepite e sviluppate nel tempo, per iniziare a familiarizzare con il concetto di sostenibilità ambientale, una volta definito. La discarica, in generale, è un reattore dove materiali in fase liquida, solida e gassosa, reagiscono dando luogo ad emissioni liquide (percolato), gassose (biogas) con una fase solida (i rifiuti) che rappresenta la fonte delle potenziali emissioni residue. Il controllo delle emissioni avviene mediante l'impiego di barriere intese come strumenti atti a ridurre la diffusione incontrollata delle emissioni verso l'ambiente. Nella maggior parte del mondo, tuttavia, la discarica è etichettata come uno scarico di rifiuti non controllato all'aperto che comporta rischi per la salute umana e per l'ambiente. La dicitura Economia Circolare, già citata prima, è un'espressione che delinea un sistema economico che possa rigenerarsi da solo garantendo la sua ecosostenibilità (figura 1.1). Questo pensiero è la nuova frontiera delle politiche ambientali europee volte a collegare l'obiettivo della creazione di valore economico con le esigenze di valorizzazione e conservazione delle risorse naturali, pensando ad un sistema che concepisca l'idea che tutti i rifiuti possano potenzialmente diventare risorse. I suddetti principi sono stati stabiliti dalle recenti normative europee ed hanno profondamente innovato le modalità relative alla gestione dei rifiuti, ovvero le direttive sugli stessi, sugli imballaggi, sui RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche), sui veicoli fuori uso e sullo smaltimento in discarica. Gli ambiziosi obiettivi europei sulla circolarità dell'economia e le stesse più stringenti norme sulla conduzione delle discariche e sulle tipologie di rifiuti ammessi non consentono, però, di eludere la necessità che i residui finali delle operazioni di riutilizzo, recupero e riciclo trovino, nel momento in cui non sono più valorizzabili, una destinazione di smaltimento ambientalmente sicura ed efficiente. E' quindi fondamentale stabilire che la discarica "classica" non è da prendere a modello in un'ottica di sviluppo, raggiungimento, nonché rispetto, della sostenibilità ambientale, in quanto si presta unicamente alla raccolta, allo stoccaggio non selezionato di rifiuti derivanti dalle attività umane. Questo nuovo insieme di misure sull'Economia Circolare prevede invece che la quantità di rifiuti sia minimizzata alla fonte e che qualunque sottoprodotto o residuo di lavorazione o di consumo diventi materia utile per un ciclo successivo di riutilizzo, di recupero di materia ed energia o di riciclo in altro processo. Il ciclo si chiude con la sua tappa finale, la discarica sostenibile, il cui ruolo è occuparsi di quella parte di rifiuti non recuperabile e prevederne uno smaltimento tecnicamente corretto e sicuro per l'ambiente. La presenza di discariche che raccolgano queste frazioni non più valorizzabili è fondamentale ai fini del funzionamento dell'economia circolare, la cui ideologia crollerebbe in assenza di questi impianti. Lo scopo di tutto ciò è aiutare le imprese e i consumatori europei a compiere la transizione verso un'economia in cui le risorse siano utilizzate in modo più sostenibile. In quest'ottica la discarica si pone a servizio degli impianti di trattamento, recupero e riciclo dei rifiuti prodotti dalla comunità civile, inoltre va specificato che senza tale tipo di soluzione gli impianti adibiti alle operazioni di recupero e riciclo sono costretti a fermarsi. L'attuale carenza di soluzioni finali per rifiuti non recuperabili è oggi evidente e sta mettendo in difficoltà il settore del recupero e del riciclo. Il trattamento dei rifiuti è cambiato nel corso degli anni in

maniera significativa, fino ad arrivare ad oggi, con lo sviluppo di sistemi che integrano numerosi processi di recupero dei materiali e di energia e che forniscono confinamento per ridurre gli impatti ambientali. Sono state proposte diverse definizioni, dalle quali si può dedurre che il concetto di “sostenibilità” può essere definito come l’abilità di venire incontro a necessità di carattere sociale senza compromettere le future generazioni.

## **1.1 Il ruolo della discarica sostenibile nella gestione dei rifiuti**

Negli ultimi 50 anni, gran parte del mondo ha fatto notevoli progressi nella gestione dei rifiuti municipali solidi (detti MSW), dallo scarico incontrollato in terra e dalla combustione indiscriminata, a sistemi più evoluti, che includono il riutilizzo, il riciclo e il trattamento dei rifiuti. Questo progresso è maturato dalla sempre più crescente consapevolezza della società di proteggere e salvaguardare la salute e l’ambiente.

I termini “discarica” e sostenibilità sembrano contraddirsi, poiché convogliare, smaltire scarti e rifiuti in questi impianti, sembra essere l’esatto opposto di una pratica sostenibile, tuttavia dal punto di vista economico, sociale, politico, le discariche rimangono uno dei componenti maggiormente integrati nei sistemi di gestione della problematica dei rifiuti nel mondo. L’obiettivo della sostenibilità ha quindi introdotto il bisogno di realizzare nuove tecnologie che potessero permettere ad una discarica di operare in modo sostenibile.

**Una discarica può essere definita sostenibile se raggiunge l’equilibrio ambientale nel tempo di una generazione, cioè 30-40 anni.**

Questo è il criterio pilota su cui l’idea di sostenibilità ambientale si basa nella sua interezza, ed è il primo principio ispiratore a cui la normativa per la progettazione (discussa nel capitolo 2) fa riferimento.

Le considerazioni fatte finora e altre ancora in seguito sono di carattere puramente generale, i calcoli e le valutazioni di confronto che verranno effettuate nei capitoli seguenti fanno riferimento ad un ipotetico progetto di una discarica a servizio dell’economia circolare (figura 1.1), che nasca con l’idea di essere l’avanguardia del concetto di “discarica sostenibile”. Il capitolo 3 avrà lo scopo di dare una breve introduzione delle scelte e criteri progettuali per realizzare questo tipo di impianti. Il quarto capitolo invece si pone lo scopo di confrontare le due modalità gestionali di una discarica, anaerobica e aerobica, e stabilire quale delle due meglio si integra con il concetto di sostenibilità ambientale evidenziato in questo paragrafo.



**Figura 1.1: rappresentazione schematica dell'economia circolare, immagine tratta da <http://www.ecodallecitta.it/notizie/390682/economia-circolare-legambiente-lancia-al-governo-e-al-parlamento-le-sue-10-proposte/>**

## 1.2 La discarica di vecchia generazione

Le prime discariche, in passato, erano tutte “aerobiche”, in quanto le alternative di gestione sanitaria dei rifiuti erano limitate e le tecniche di compattazione e confinamento molto aleatorie. In Germania queste discariche venivano chiamate “Rottendeponie”, letteralmente tradotto in “discarica marcia”, in parole semplici, scarichi di rifiuti non controllati all’aperto (figura 1.3). In passato nelle nazioni più sviluppate, ma purtroppo ancora attualmente in quelle più povere, i MSW (municipal solid waste) non solo sono smaltiti in modo non sostenibile, ma portano anche problemi per la salute e per l’ambiente, infatti le persone che lavorano in prossimità di questi siti corrono potenziali rischi, ad esempio nelle vicinanze di materiale chimico pericoloso, oppure a causa di incendi ed esplosioni causate dalla combustione accidentale del gas prodotto dai rifiuti in decomposizione. Per quanto riguarda l’ambiente, l’inquinamento dell’acqua e dell’aria è il risultato di questi scarichi incontrollati. Il percolato è definito come il liquido risultante dal contatto dell’acqua con il rifiuto, agenti chimici smaltiti nel rifiuto o prodotti secondari di reazione nella massa rifiuti si dissolvono nell’acqua, questo liquido emerge dai rifiuti, entra nel sottosuolo inquinando la riserva idrica sottostante (esempio in figura 1.2). Anche particelle di particolato possono essere rilasciate nell’ambiente. I gas prodotti sono composti principalmente da metano, che può portare ad incendi ed esplosioni, generare effetto serra e agire da vettore di trasporto per altri composti chimici nel rifiuto, taluni tossici per l’uomo. Il particolato invece, si genera durante gli incendi o viene rilasciato come polvere durante le operazioni di discarica. Anche le acque di superficie possono venir contaminate, e ciò comporta, oltre alla presenza di sostanze dannose disperse nel liquido, anche una diminuzione di ossigeno disciolto, che comporta a sua volta la diminuzione della salute ecologica dell’acqua e la possibile crescita e diffusione di microorganismi che portano malattie. Per la mancanza di un’accurata scelta di un luogo appropriato, intere aree sono state ecologicamente distrutte. Si può concludere quindi, che lo scarico indiscriminato rappresenta men che tutto una pratica efficiente e salutare per la gestione dei rifiuti.



**Figura 1.2: percolato esposto alla superficie in una discarica in India, immagine tratta da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”**



**Figura 1.3: scarico non controllato su una collina in Europa dell’Est, immagine tratta da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”**

### **1.3 L’evoluzione delle moderne discariche**

Il primo passo nell’evoluzione delle discariche moderne dagli scarichi non controllati è stato lo sviluppo di pratiche sanitarie al fine di proteggere la salute umana, ovvero per diminuire la diffusione di malattie e gli incendi. I rifiuti venivano messi in specifiche celle, spesso costruite in unità distinte, e compattati in loco (figura 1.4) con equipaggiamento pesante (es. rulli). Un altro passo fondamentale è stata l’introduzione del suolo di copertura (figura 1.5) sui rifiuti stoccati di recente, per ridurre emissioni di gas, odori, sostanze inquinanti e ridurre il rischio di combustione incontrollata. La delimitazione del sito e il controllo di accesso a questo sono stati un ulteriore step chiave per la sanità nell’impianto. Lo sviluppo di queste pratiche ha ridotto gli effetti diretti sulla salute umana, tuttavia permaneva il problema della gestione del percolato e del biogas. Gli scienziati hanno iniziato a monitorare la qualità dell’acqua sottoterra intorno alla discarica, constatando che il percolato vi incideva negativamente. Successivamente, si sono sviluppate le tecniche di impermeabilizzazione dei limiti esterni delle discariche, inoltre le metodologie di compattazione spinta, in aggiunta alle rapide coperture dei rifiuti hanno portato a spostare il criterio di gestione delle discariche da aerobico a completamente anaerobico, raggiungendo indubbi vantaggi di compatibilità ambientale rispetto al sistema precedente, queste pratiche, inoltre, includevano la restrizione di rifiuti liquidi in discarica e il controllo delle acque di pioggia, al fine di minimizzare la produzione di percolato. Vennero progettati sistemi di chiusura ingegnerizzati per prevenire l’infiltrazione di umidità e la fuga incontrollata di gas. Ma questo tipo di smaltimento dei rifiuti, seppur limiti notevolmente l’interfaccia di “percepibilità” della discarica, ha indotto ad una sorta di “mummificazione” delle sostanze organiche all’interno di bioreattori accuratamente confinati. Risulta essere quindi estremamente importante l’applicazione dei recenti concetti innovativi di discarica, che inducono ad una diversa concezione di impianto di smaltimento: “la discarica aerobica”.



**Figura 1.4: compattazione dei rifiuti, immagine tratta da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”**



**Figura 1.5: applicazione del suolo di copertura, riduzione di odori, incendi, inquinamento e protezione da acque di pioggia e percolato, immagine tratta da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”**

## **1.4 La transizione da smaltimento in discarica a trattamento**

L'implementazione di sistemi ingegnerizzati per le discariche moderne e lo sviluppo di strategie operazionali per minimizzare la formazione di percolato ebbero i risultati sperati di diminuire significativamente l'inquinamento dell'acqua. Come anticipato, la conseguenza di queste azioni è stata la creazione di impianti che impiegavano intenzionalmente pratiche per mitigare le reazioni di stabilizzazione dei rifiuti. Questi infatti, come descritto nei paragrafi seguenti, una volta disposti in discarica, subiscono una varietà di reazioni biologiche e chimiche, in particolare quando in contatto con l'umidità, come la degradazione del materiale organico e la produzione di metano. Da un lato mitigare la produzione di biogas e di percolato ha portato benefici ambientali a breve termine, però il potenziale per reazioni a lungo termine ancora sussisteva. Negli anni successivi alla chiusura, se l'integrità della copertura è compromessa, permettendo all'acqua piovana di entrare nella massa rifiuti, la decomposizione dei rifiuti riprende il suo corso e se il sistema di contenimento della discarica non funziona più come previsto, può esserci il rischio di contaminazione ambientale. Lo sviluppo di bioreattori in discarica ha permesso un approccio alternativo, nel quale si incoraggia la decomposizione del rifiuto, limitando così la vita attiva dell'impianto massimizzando il controllo quando i componenti di contenimento sono nella loro miglior condizione, limitando così anche il monitoraggio a lungo termine. Questi bioreattori non si limitano quindi a confinare i rifiuti, controllano, monitorano e ottimizzano la stabilizzazione. Alcune pratiche per il conseguimento di questo scopo sono l'immissione di aria (discarica aerobica), di cui si parlerà nei seguenti paragrafi, un altro sistema consiste nell'immissione di liquidi, poiché un aumento nel contenuto di umidità promuove le reazioni di stabilizzazione, e quindi la discarica opera in maniera simile ad un digestore anaerobico.

Il fenomeno decompositivo dei rifiuti in uno scarico controllato è piuttosto complesso, perché avvengono processi fisici, chimici e biologici, agenti talvolta simultaneamente.

Le trasformazioni di tipo fisico consistono in degradazioni delle componenti dei rifiuti, che mutano quindi le loro proprietà fisiche, ad esempio la riduzione del volume. Altri fenomeni di questo tipo possono essere precipitazione, assorbimento o rilascio di sostanze.

I fenomeni di tipo chimico includono reazioni che avvengono tra i diversi componenti del rifiuto, evidenze di questi processi sono presenti nei percolati, con variazioni di solubilità, potenziale redox e pH.

Il principale meccanismo di decomposizione dei rifiuti in discarica è la degradazione biologica, una trasformazione della materia da parte di microrganismi. Questo processo, a seconda del tipo di gestione dell'impianto, anaerobico o aerobico, comporta diverse fasi di reazione. In base a quanto detto finora, a seconda delle scelte progettuali e obiettivi, si delineano due tipologie e modalità gestionali per una discarica, la gestione anaerobica e quella aerobica.

## **1.5 La discarica anaerobica**

Questo tipo di discarica controllata è la "base" di buona parte delle moderne normative adottate nei paesi più avanzati, e di fatto ha consentito di affinare notevolmente una serie di tecniche e tecnologie estremamente importanti e finalizzate al completo controllo dell'impianto. Sfrutta, come anticipato, un'impermeabilizzazione (argilla, geomembrane HDPE) per proteggere il terreno circostante e sottostante da drenaggi o dispersioni incontrollate di percolato o rifiuti. E' quindi dotata di un sistema di drenaggio e raccolta del percolato, di un sistema di captazione del biogas, che viene raccolto e rappresenta, se ricco in metano, un possibile recupero energetico. Il biogas rappresenta una delle maggiori fonti di emissioni di potenziali contaminanti dal rifiuto all'ambiente, per cui l'obiettivo primario in discariche sostenibili è la presenza di un efficiente sistema di raccolta e controllo del gas (GCCS). Il GCCS ha

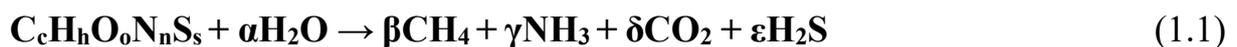
fondamentalmente queste funzioni: previene la formazione di miscele esplosive in atmosfera, protegge l'ambiente dalle emissioni di inquinanti (riduzione emissioni di gas serra), riduce gli odori.

Se la discarica opera in modo anaerobico, la degradazione biologica si svolge in tre fasi successive:

- **Fase aerobica iniziale:** questa fase inizia subito dopo che i rifiuti sono collocati in discarica. L'ossigeno impiegato dai microorganismi viene prelevato dall'aria inglobata durante la deposizione del rifiuto, anche l'ossigeno disciolto nell'acqua di pioggia viene utilizzato. Siccome l'impianto opera in modo anaerobico, questa prima fase è di breve durata e si conclude quando termina l'ossigeno;
- **Fase anaerobica acida:** questi processi avvengono quando l'ossigeno è ridotto al punto in cui le reazioni aerobiche non sono più possibili. Gli organismi presenti sono aerobi facoltativi e, in caso di ossigeno libero assente, possono usare quello "legato". I prodotti di queste reazioni sono anidride carbonica, acidi organici ed un modesto sviluppo di calore, inoltre durante questa fase il pH diminuisce. Gli acidi, oltre alla CO<sub>2</sub>, possono disciogliersi nel percolato e aumentarne l'acidità;
- **Fase metanigena anaerobica:** in quest'ultima fase i microorganismi, detti metanigeni, convertono la sostanza organica in metano e anidride carbonica. Questa fase può instaurarsi in un periodo variabile tra i 3 e i 9 mesi, e comporta un aumento del pH con valori vicini alla neutralità.

L'ultima fase, una volta avviata, può manifestarsi per periodi di tempo molto lunghi, talvolta può superare i 40 anni, con progressiva riduzione asintotica del fenomeno. Nei paragrafi seguenti vengono illustrate le previsioni della durata di questi fenomeni in base alle caratteristiche dei rifiuti, della discarica e dell'ambiente in cui si colloca.

Dal punto di vista biologico, i fenomeni alla base del processo "anaerobico" di produzione del biogas sono ben conosciuti, di seguito si riporta una semplificazione della reazione di formazione di biogas anaerobico prodotto da rifiuti, come riporta la (1):



I macrocomponenti del biogas sono CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, quest'ultima inoltre può disciogliersi nel percolato variandone il pH, vi è poi la presenza di acqua sotto forma di vapore, mentre solitamente H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub> sono presenti in basse quantità (< 1%). A seconda della durata della fase aerobica iniziale possono esserci anche ossigeno e azoto. Possono essere presenti anche numerosi microcomponenti in tracce.

Il fenomeno fermentativo, simulabile all'interno di un laboratorio, è facilmente controllabile ed analizzabile, anche all'interno di un digestore anaerobico di alcune decine di metri cubi di rifiuti o di sostanze organiche assimilabili il fenomeno è ben definibile e tutti i parametri influenti sono analiticamente osservabili ed eventualmente correggibili. E' molto più complessa la valutazione della "sovrapposizione degli effetti" di produzione del biogas che avviene in una discarica. Il fenomeno decompositivo anaerobico risulta essere particolarmente lento, tipico di un impianto molto controllato e confinato, e tende a prolungarsi nel tempo e ad aumentare l'impatto ambientale, ben oltre il limite di "una generazione" e quindi risulta poco compatibile con il concetto di "sostenibilità". Come accennato prima, la possibilità di recupero energetico dei gas di fermentazione anaerobici, caratterizzati dalla presenza di metano e quindi idonei ad essere un ottimo combustibile, rappresenta un possibile vantaggio. Tali azioni erano infatti incentivate con tariffe interessanti e tali da favorire un'attenta captazione del biogas. Il CH<sub>4</sub> e

altri composti gas prodotti necessitano quindi di sistemi di trattamento, sia per la compatibilità ambientale (impatti), che per il recupero energetico, inoltre va prevista la presenza di torce adiabatiche per la combustione del biogas, come dispositivi di sicurezza. In figura 1.6 è mostrato uno schema d'esempio per una discarica anaerobica.

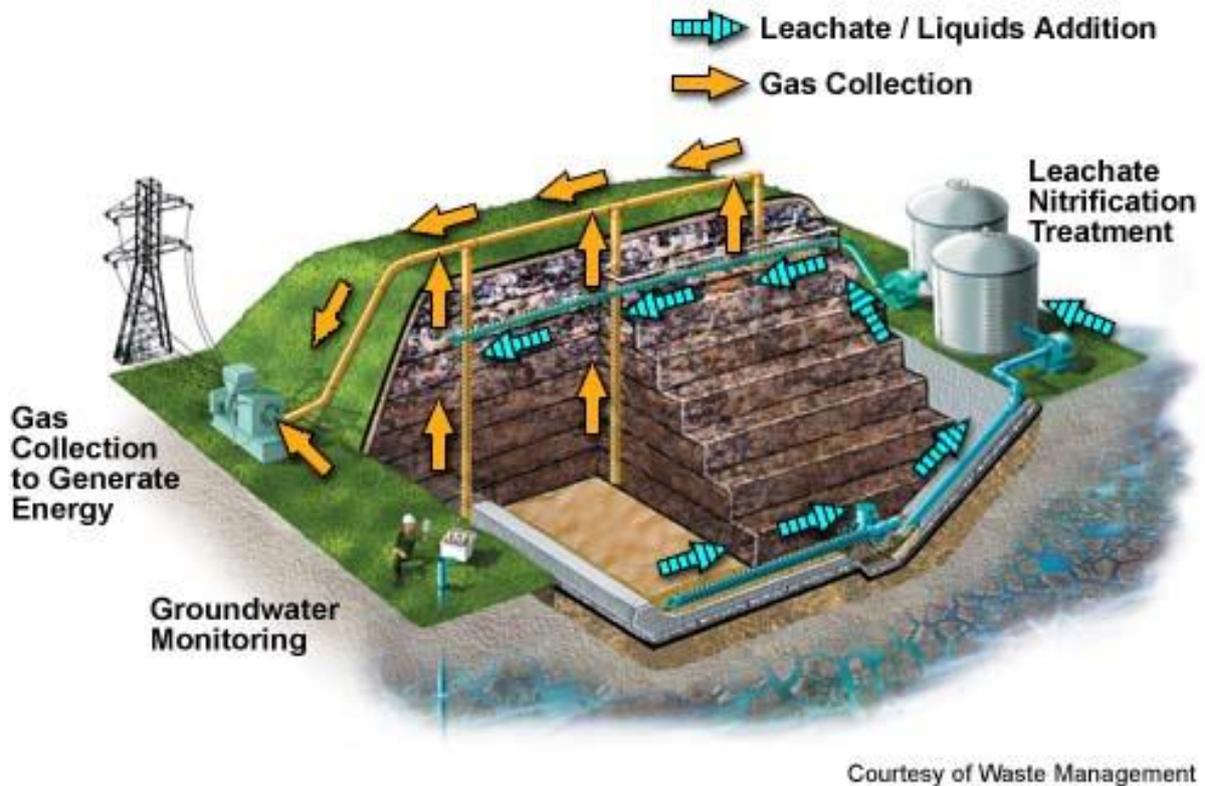


Figura 1.6: vista d'insieme di una discarica anaerobica, immagine tratta da <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills#aerobic>

## 1.6 La discarica semi-aerobica

Questo tipo di gestione è una via di mezzo tra sistema anaerobico e totalmente aerobico. Si sfrutta la differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno alla discarica, più caldo per via del fenomeno fermentativo, per creare un flusso d'aria che attraversi i rifiuti con un meccanismo di convezione naturale. Un sistema di collettori di raccolta del percolato insieme ad un sistema di tubi verticali intersecati alle tubazioni orizzontali facilitano il flusso dell'aria. Questa reticolazione garantisce una maggiore espansione della zona aerobica. I collettori fessurati sul fondo e i tubi verticali consentono il trasporto dell'aria e del percolato, che può essere ricircolato col vantaggio di ridurre il carbonio organico e l'azoto presente nei rifiuti.

## 1.7 La discarica aerobica

L'idea di discarica aerobica nasce con lo scopo di essere un "digestore" perfettamente confinato e di minimo impatto sull'ambiente circostante, come nel caso anaerobico, ma che consenta contestualmente un rapido degrado delle sostanze organiche riducendo quindi al minimo la fermentazione anaerobica, favorendo invece quella aerobica. Questo tipo di gestione emerge dalla necessità di ottimizzare tutte le tecniche migliori fino ad oggi disponibili per il confinamento dell'impatto ambientale della discarica ma nel contempo evitare che il fenomeno degradativo si prolunghi nel tempo, oltre il criterio di "sostenibilità" precedentemente espresso.

Questi impianti di nuova generazione sono dotati di sistemi multibarriera per quanto riguarda l'impermeabilizzazione (argilla, geomembrana HDPE, geocomposito bentonitico), possiedono inoltre controlli e monitoraggi sugli impatti a lungo termine.

L'aerazione è realizzata con sistemi di iniezione forzata mediante dreni fessurati, in questo modo si incrementa notevolmente il flusso di aria all'interno dei rifiuti, rispetto al modello semi-aerobico, che sfrutta invece la convezione naturale. L'obiettivo è ottenere un eccesso di ossigeno, in modo tale da consentire lo sviluppo di reazioni aerobiche in tutto il corpo rifiuti. L'aria viene insufflata in pressione nei dreni e si diffonde grazie ai fenomeni convettivi e diffusivi, aumentando la velocità di degradazione e consentendo una veloce riduzione dei valori di COD (richiesta chimica di ossigeno) e BOD (richiesta biologica di ossigeno) nel percolato, e diminuendo la quantità di metano (gas infiammabile e dannoso per l'effetto serra sull'atmosfera) e idrogeno solforato (gas dall'odore fastidioso) prodotti.

Gli impatti ambientali sono quindi minori rispetto a quelli di una discarica tradizionale. In questi ambiti il fenomeno anaerobico risulta invece molto più lento cinematicamente rispetto a quello aerobico. L'eventuale scarsa presenza di umidità tra i rifiuti, dovuta alla riduzione degli apporti meteorici (piovosità esclusa dalle efficienti coperture sommitali) ed al contestuale consumo da parte del fenomeno stesso, tende inoltre a mandare in "stallo" anche lo stesso processo di stabilizzazione e, per tale motivo, alcuni studiosi definiscono questi impianti come "Tomb dry" (tomba secca). Il sistema aerobico prevede invece che il percolato, piuttosto che essere raccolto ed estratto per eliminare qualunque forma di umidità dai rifiuti (tomb dry), possa essere ricircolato nel corpo discarica attraverso collettori verticali, implementando anche un sistema di subirrigazione con acqua quando necessario per mantenere l'umidità al valore ottimale per la fermentazione aerobica. Questo comporta il vantaggio di una riduzione dell'azoto nel percolato per mezzo dei processi di nitrificazione e denitrificazione del carbonio organico presente nei rifiuti.

Un sistema aerobico "forzato" è maggiormente controllabile ma, ovviamente, più complesso e costoso.

Dal punto di vista biochimico, il biogas aerobico si forma, dalla seguente reazione semplificata:



In una discarica la fenomenologia è estremamente complessa perché non è presente un solo fenomeno fermentativo, ma bensì innumerevoli fenomeni che contemporaneamente contribuiscono alla produzione complessiva di differenti tipi di biogas.

Lo scopo, come sottolineato più volte, è quello di orientare, al massimo possibile, la fermentazione verso il processo aerobico riducendone la durata nel tempo e gli effetti di impatto ambientale.

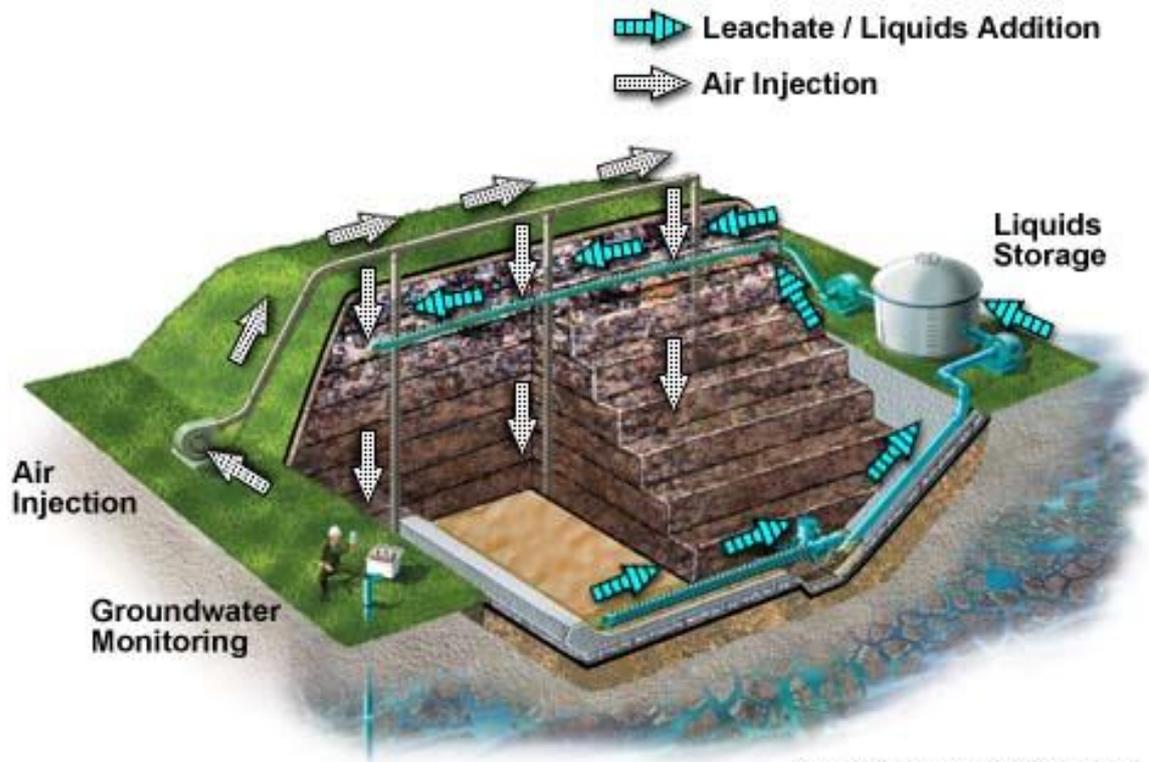
Allo stesso tempo è necessario che l'impianto delimiti l'ambiente entro il quale si sviluppa il processo fermentativo evitando effetti indesiderati sulle zone circostanti. La maggior parte del materiale organico può essere trattato sia in modo anaerobico che aerobico (con diversi tempi di reazione), ma per alcuni costituenti chimici, il secondo sistema offre capacità di trattamento impossibili da realizzare con il sistema anaerobico. Ad esempio, la forma prevalente dell'azoto nel percolato di una discarica anaerobica è ammoniacale, e questo costituente tende a conservarsi nel tempo, ad incrementare la sua concentrazione, ponendo quindi problemi per il suo trattamento. In condizione aerobiche, l'ammoniaca può essere convertita in nitrato, che può decomporsi a sua volta in N<sub>2</sub> gas in un successivo step anossico, segue la sua rimozione. La nitrificazione dell'ammoniaca può essere esterna al corpo rifiuti e avvenire in serbatoi, il percolato viene poi ricircolato nella massa rifiuti promuovendo la conversione anaerobica da nitrato in N<sub>2</sub>. Se l'aria viene aggiunta nel corpo della discarica, la nitrificazione può avvenire all'interno dei rifiuti stessi, mentre il percolato, una volta raccolto, può essere trattato

anaerobicamente dopo la sua estrazione. Di seguito vengono illustrate varie strategie per la nitrificazione (figura 1.8). La degradazione aerobica rilascia più calore rispetto a quella anaerobica, portando quindi ad un incremento di temperatura superiore. Il rapido rilascio di calore può portare alla combustione dei rifiuti, incendi in discarica (landfill fires), ossidazioni sottosuperficiali esotermiche (hot landfills), ma questi fenomeni possono essere evitati monitorando la temperatura e installando un sistema di sicurezza con liquido estinguente (acqua) da usare in caso di emergenza. Il range esplosivo del  $\text{CH}_4$  è dal 5 al 15% in volume nell'aria, quindi il rischio di creare condizione esplosive va tenuto in considerazione quando si aggiunge aria alla massa rifiuti.

La quantità di aria aggiunta per massa o volume di rifiuto indica il grado di trattamento aerobico. La stabilizzazione aerobica completa richiede ovviamente molta più aria di quei sistemi il cui obiettivo è semplicemente scaldare il rifiuto prima della stabilizzazione anaerobica o completare questa al termine della degradazione in condizione anaerobiche. Il grado di addizione dipende da vari fattori, tra i quali la capacità della discarica di accettare l'aria, il numero di dispositivi di addizione disponibili, la capacità della soffiante, la capacità del sistema di introdurre l'aria senza aumentare in modo pericoloso la temperatura evitando di creare condizioni esplosive. Può essere stimato un potenziale di consumo di  $\text{O}_2$  ipotizzando una determinata composizione del rifiuto e la frazione di questi soggetta a degradazione (frazione organica).

Il biogas aerobico è costituito da anidride carbonica e vapore acqueo, ovviamente anche ossigeno ed azoto sono abbondantemente presenti.

Se l'obiettivo è la stabilizzazione 100% aerobica, la quantità d'aria da immettere è molto grande, quindi non è sufficiente operare con la quantità stechiometrica di ossigeno prevista, è necessario introdurre aria in eccesso. Ci sono ulteriori fattori da considerare, come le proprietà idrauliche del rifiuto, la dimensione e la collocazione dei pozzi verticali. Per valutare l'efficienza di addizione dell'aria, inoltre, è necessario tener conto, oltre che dell'eterogeneità dei rifiuti, anche della presenza di umidità, difatti questa agisce come una barriera fisica contro l'aggiunta di aria e può ridurre significativamente il flusso. La presenza di acqua, tuttavia, ha lo scopo di migliorare le condizioni di fermentazione, se venisse a mancare ciò comporterebbe l'eccessiva produzione di calore e il rischio di combustione, quindi in discariche aerobiche il bilanciamento tra aria e acqua è fondamentale, evitando che l'umidità sia del tutto assente oppure che la sua eccessiva presenza faccia da tappo idraulico per la circolazione dell'aria. In figura 1.7 è mostrato uno schema d'esempio di una discarica aerobica.



Courtesy of Waste Management

Figura 1.7: vista d'insieme di una discarica aerobica, immagine tratta da <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills#aerobic>

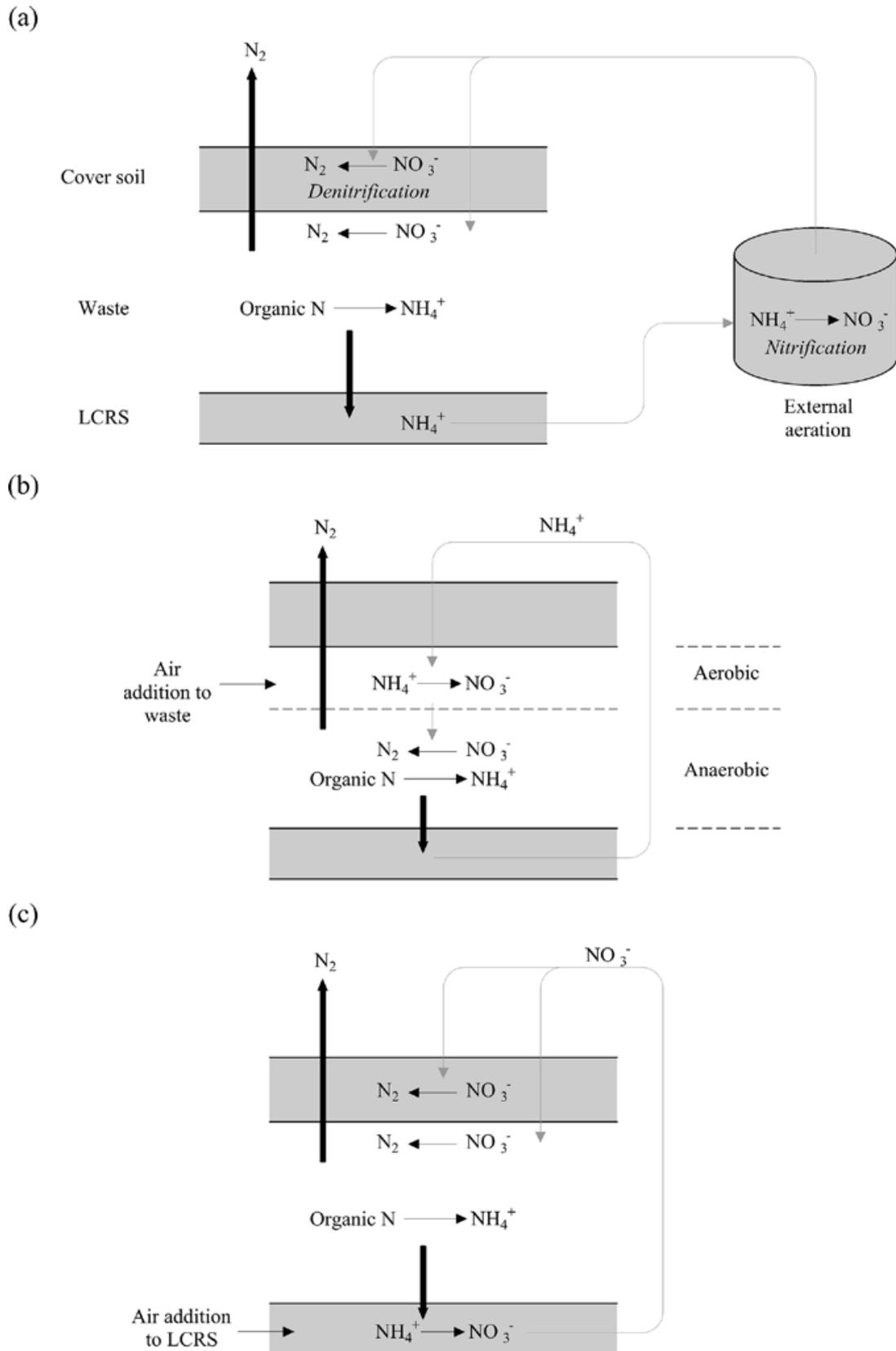


Figura 1.8: strategie alternative per la rimozione di azoto, “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”

La tabella 1.1 riassume le principali differenze tra discarica aerobica ed anaerobica discusse finora:

**Tabella 1.1: Confronto tra condizioni anaerobiche ed aerobiche**

<b>Caratteristica</b>	<b>Confronto</b>
<b>Reazione biologica</b>	La reazione anaerobica consiste in un gruppo definito di popolazioni microbiche che dipendono l'una dall'altra. La via aerobica è invece considerata più rapida, anche perchè quella anaerobica è molto più sensibile alle condizioni ambientali e serve tempo affinché queste siano raggiunte.
<b>Energia rilasciata e temperatura</b>	Entrambe le reazioni sono esotermiche, ma la reazione aerobica rilascia più calore, per via dell'uso termodinamico più favorevole di O <sub>2</sub> come elettrone accettore da parte dei microorganismi. Solitamente i rifiuti in discarica possono raggiungere temperature di 60 °C, oppure in condizioni aerobiche anche 70 °C o maggiori. Temperature più grandi hanno come risultato tempi di reazione più rapidi e la distruzione di eventuali patogeni. Tuttavia, alte temperature possono portare a combustioni e problemi di incendio.
<b>Gas esausto</b>	In sistemi anaerobici, i gas principalmente prodotti sono CH <sub>4</sub> e CO <sub>2</sub> . In sistemi aerobici sono N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .
<b>Tracce di gas e odori</b>	Nelle condizioni anaerobiche c'è maggiore tendenza a produrre, in tracce, composti chimici con odori forti, come acidi grassi volatili, H <sub>2</sub> S, ammoniaca. La loro presenza dipende ovviamente anche dalla composizione del rifiuto.
<b>Qualità del materiale finale</b>	Alla fine della stabilizzazione, i rifiuti in entrambe le tipologie sono più o meno della stessa qualità. I tempi in cui ciò avviene sono invece molto differenti, perché la reazione aerobica è cinematicamente molto più veloce. Il fato di alcune specie chimiche può differire da una tipologia all'altra, ad esempio nel sistema anaerobico l'azoto è conservato come NH <sub>3</sub> . Talvolta il trattamento aerobico è usato come post-trattamento a quello anaerobico, per completare la stabilizzazione.
<b>Energia</b>	I sistemi aerobici consumano energia in netto, per via della necessità di introdurre aria. Anche i sistemi anaerobici consumano un po' di energia, ma esiste la possibilità di recuperarla attraverso l'uso del CH <sub>4</sub> .

## 1.8 Tipologie di sistemi di aerazione

Le apparecchiature necessarie possono introdurre l'aria in modo attivo oppure passivo, la scelta è dettata dalla quantità di aria da insufflare. Nel caso di sistemi attivi, si possono usare soffianti meccaniche, ventilatori o compressori, connessi a tubazioni atte a garantire la portata di aria desiderata nei punti designati per l'addizione. Nel caso di sistemi passivi, sfiati e canali vanno adeguatamente collocati per promuovere l'entrata dell'aria in base al gradiente di temperatura.

E' necessario valutare il volume d'aria da aggiungere e il grado di addizione, per valutare il dimensionamento delle apparecchiature. Va inoltre valutata una pressione adeguata per l'aria entrante, per avere un'aerazione uniforme in tutto il corpo rifiuti. Va progettato un sistema di controllo e per mantenere le variabili di processo ai valori desiderati, nonché un sistema di sicurezza e monitoraggio per la prevenzione di incendi ed esplosioni dovute all'aumento di temperatura in concomitanza all'insufflazione d'aria. Parametri di rilevante importanza sono la composizione e la temperatura del gas presente, e la temperatura dei rifiuti.

I tre componenti principali del sistema di addizione di aria includono una soffiante o una ventola, un sistema di trasporto, e una rete di tubazioni per l'iniezione dell'aria e trattamento del gas. Il sistema di trasporto porta l'aria verso i rifiuti in discarica, la rete di tubazioni la distribuisce all'interno della massa rifiuti. Vi sono diverse metodologie per l'introduzione di aria usando pozzi verticali. Un metodo consiste nell'aerazione ad alta pressione ( $\geq 30$  kPa), l'aria è forzata nella profondità della massa rifiuti, mentre ad altri pozzi è applicata l'aspirazione che tira l'aria attraverso i rifiuti. Un secondo modo consiste nell'usare l'aerazione a bassa pressione con estrazione parallela di gas attraverso aspirazione applicata a pozzi di iniezioni addizionali. Volendo si può evitare l'estrazione del gas e sfruttare semplicemente la ventilazione atmosferica. In figura 1.9 sono riassunte le varie strategie per l'addizione di aria.

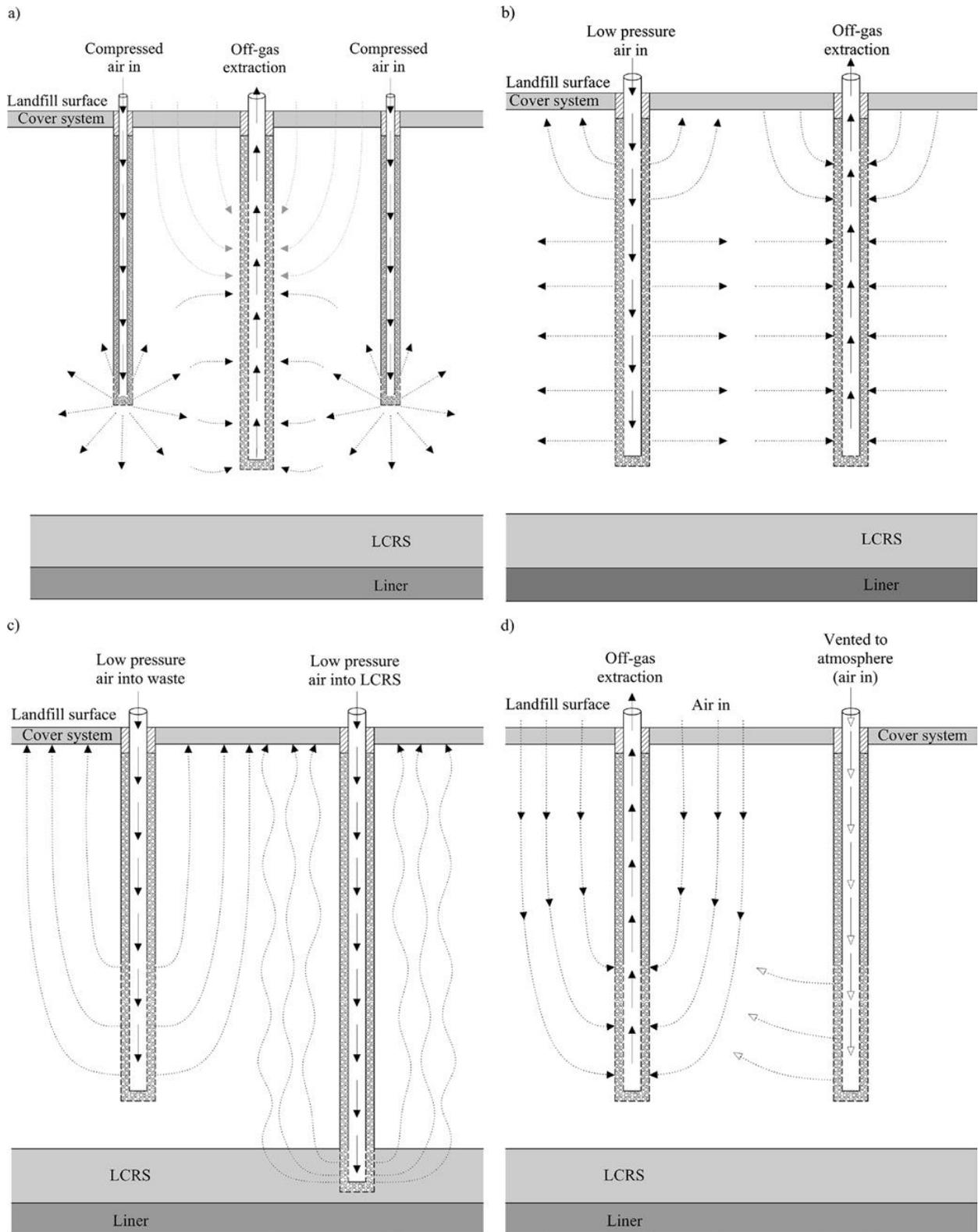


Figura 1.9: varie strategie con pozzi verticali per l'aggiunta di aria

(a) Aria in pressione;

(b) Aerazione-estrazione combinata usando bassa pressione;

(c) Aerazione nel LCRS (leachate collection and removal sistem) e nella massa rifiuti;

(d) Sistema di estrazione che permette l'introduzione di aria ad una ventola aperta all'atmosfera;

Immagine tratta da "Sustainable Practices for Landfill Design and Operation"

## 2. Inquadramento della normativa di riferimento

Questo capitolo fa riferimento alla normativa vigente in Lombardia nell'ambito di progettazione e gestione di discariche, queste regole verranno analizzate, sintetizzate, verranno espresse considerazioni ove opportuno, al fine di ambientare il lettore nell'argomento e di fornire le basi fondamentali per comprendere i criteri di progettazione e gestione di questi impianti. La normativa definisce il piano di sorveglianza e controllo con i necessari parametri chimici, chimico-fisici, idrogeologici, meteorologici e topografici da determinare periodicamente con una frequenza prestabilita delle misurazioni. Queste linee guida dettano i requisiti tecnici minimi, applicativi e interpretativi del d.lgs. 36/03, ai quali si devono adeguare in Lombardia la progettazione, l'autorizzazione, la realizzazione, la gestione operativa e post-operativa delle discariche. Questa normativa è ancor più stringente rispetto a quella nazionale per cui rappresenta le linee guida ideali da seguire per la progettazione di una discarica sostenibile a servizio dell'economia circolare.

### 2.1 Principi ispiratori per la progettazione e la gestione

Il ruolo previsto è “chiudere il ciclo della materia, con tecniche e procedure atte a massimizzare l'immobilizzazione e l'innocuizzazione degli elementi e delle sostanze contenute nei rifiuti e a minimizzare per converso la mobilità e reattività degli stessi”. Di seguito sono elencati alcuni principi ispiratori che devono guidare la progettazione nonché la gestione e lo sviluppo di questi impianti, e un loro inquadramento risulta propedeutico a comprendere i fini della trattazione:

- 1) *“Le discariche devono essere progettate, realizzate e gestite nel rispetto del principio della sostenibilità ambientale, cioè del raggiungimento di una qualità finale del deposito (rifiuti, emissioni, stabilità biologica e meccanica) in equilibrio con l'ambiente, entro il tempo di una generazione, comunque non superiore a 30 anni dalla data di chiusura della discarica o di suoi lotti funzionali.”*

Questo primo punto, già citato all'inizio della trattazione, è fondamentale e costituisce il cuore del pensiero di progettazione sostenibile per le discariche di oggi e future. Queste considerazioni quindi costituiscono una base molto importante su cui costruire il concetto di sostenibilità precedentemente introdotto. La discarica aerobica, in questo ambito, risulta nettamente vantaggiosa per i motivi descritti precedentemente, rispetto al modello anaerobico.

- 2) *“La qualità finale (QFD) alla quale una discarica deve tendere per garantire la sostenibilità ambientale entro il termine del periodo di gestione post-operativa, è individuata dai valori obiettivo di cui all'Allegato B (Valori obiettivo di QFD), che il progetto, la gestione operativa e post-operativa devono perseguire.”*

Questo punto definisce il modello che ogni discarica deve rispettare per rientrare nei canoni di compatibilità e sostenibilità ambientale già discussi. In tabella 2 vi sono i valori obiettivo da rispettare:

**Tabella 2: valori obiettivo QFD**

<b>VALORI OBIETTIVO DI QFD</b>	<b>PARAMETRO</b>	<b>VALORE OBIETTIVO (mg/l)</b>
<b>PERCOLATO</b>	COD	1500
	BOD <sub>5</sub> /COD	0,1 (adimensionale)
	N ammoniacale	50
	Al	1
	As	0.5
	B	2
	Cd	0.02
	Cr	2
	Cr VI	0.2
	Cu	1
	Fe	2
	Hg	0.005
	Mn	2
	Ni	2
	Pb	0.2
	Se	0.03
	Sn	10
	Zn	3
	CN-	0.5
	SO <sub>4</sub> --	1000
	SO <sub>3</sub> -	1
	F--	6
	N nitrico	20
	idrocarburi tot	5
	fenoli	0.5
	solventi organici aromatici	0.2
	solventi organici azotati	0.1
pesticidi fosforati	0.1	
pesticidi tot (esclusi fosforati)	0.05	
solventi clorurati	1	
<b>BIOGAS</b>	Emissione superficiale ad impianto di estrazione spento	0,5 NI CH <sub>4</sub> /(m <sup>2</sup> · h)
<b>SOLIDI*</b>	IR4	2 (mg O <sub>2</sub> gST)
	IRD	100 mgO <sub>2</sub> /kgSV/h
	GB21	5 (NI/kgST)

- 3) *“Per il raggiungimento della sostenibilità ambientale la discarica deve ricevere rifiuti trattati al fine di ridurre preventivamente la mobilità degli elementi e delle sostanze in essi contenute, ovvero raggiungere lo stesso effetto con interventi in situ o combinazione di trattamenti ex situ e in situ.”*

Anche questo concetto è stato già anticipato, la discarica si pone come servizio al termine del ciclo dell'economia circolare di cui i rifiuti entrano a far parte. L'impianto infatti, non riceve rifiuti urbani tal quali, questi vengono prima sottoposti a trattamenti di riutilizzo, riciclo e

recupero di materia o energia dove possibile, e ciò che non risulta più valorizzabile dopo queste operazioni, cioè la frazione non recuperabile, è destinato a finire in discarica, il ciclo “vita” del rifiuto si chiude.

4) *” In sede di progettazione devono essere dettagliatamente motivate, descritte, dimensionate e computate le metodologie e le tecnologie specificamente previste per il raggiungimento della sostenibilità ambientale.”*

Questo punto indica che gli obiettivi di sostenibilità e compatibilità ambientali devono essere raggiunti attraverso tecnologie specifiche per il problema in esame, ogni scelta va motivata e descritta.

5) *”La discarica non deve costituire di per sé destinazione d’uso ma essere progettata in funzione di un ripristino ambientale coerente con una specifica destinazione d’uso, nel rispetto della più generale pianificazione territoriale.”*

In parole più semplici, il progetto di discarica deve essere integrato in un piano di ripristino ambientale, che consta in una prima fase del riempimento degli spazi con i rifiuti e loro copertura, e una seconda fase che pianifica in modo idoneo il recupero ambientale del sito.

6) *”I progetti di discariche che non rispondono al criterio della sostenibilità ambientale non sono più accettabili.”*

Per ribadire ulteriormente che discariche di vecchia generazione, riceventi rifiuti urbani tal quali, senza riutilizzo, riciclo e pretrattamenti, non possono e non devono più essere realizzate.

A questi principi, va aggiunta un’ulteriore considerazione, ovvero che la presenza di rifiuti ad alto contenuto di sostanze organiche facilmente biodegradabili e non pretrattati deve essere limitata il più possibile, in quanto la discarica non viene considerata il sistema di smaltimento più adatto (la Regione definisce ulteriori linee guida relative ai limiti di ammissibilità ed alle caratteristiche costruttive e gestionali delle sottocategorie di discarica individuate in base all’art. 7 del d.m. 27/09/2010).

## **2.2 Criteri e linee guida sul trattamento dei rifiuti**

Il trattamento dei rifiuti, prima del deposito in discarica (trattamenti ex situ), e/o dopo il loro deposito (trattamenti in situ), ha lo scopo di ridurre l’impatto ambientale sia sul breve che sul lungo termine, in accordo con il principio di sostenibilità ambientale. La scelta del tipo di trattamento va motivata e descritta nei diversi aspetti: obiettivi, tipologia di processo, tecnologia e livello di maturità, referenze, dimensionamento, risultati attesi. I trattamenti non vanno applicati nel caso di rifiuti inerti, oppure se non contribuiscono alla diminuzione dei rischi per la salute e per l’ambiente. A titolo esemplificativo tra i trattamenti eleggibili per il trattamento ex situ dei rifiuti, in funzione anche della loro tipologia, rientrano i seguenti:

- selezione manuale e/o meccanica e recupero frazioni valorizzabili;
- trattamento meccanico-biologico;
- trattamento chimico e/o chimico-fisico;
- trattamento termico;
- lavaggio, ecc.

- Mentre tra trattamenti in situ, eseguibili sia nella fase di gestione operativa con conferimenti, sia nella fase successiva alla chiusura, rientrano, a titolo esemplificativo, i seguenti:
- aerobizzazione della discarica, eventualmente anche dopo una fase di gestione anaerobica con produzione di gas, con immissione naturale (discarica semi-aerobica) o forzata (aerazione in situ);
- dilavamento naturale (copertura aperta/flushing) o forzato (infiltrazioni di acqua/ricircolo percolato);
- sistemi combinati anaerobici-aerobici, ecc.

## 2.3 Criteri e linee guida sulle barriere

Di seguito vengono introdotte le disposizioni della normativa riguardanti le barriere, sono state indicate le linee guida specifiche per discariche di rifiuti non pericolosi, poiché lo studio tratta del confronto progettuale tra la gestione aerobica e anaerobica di una discarica a servizio dell'economia circolare per rifiuti non pericolosi. Ove non sussista già naturalmente la barriera geologica, dovrà essere approntata con criteri di equivalenza una barriera di confinamento (barriera geologica artificiale). Oltre alla barriera di cui sopra, per le discariche di rifiuti non pericolosi e pericolosi, è richiesta una seconda barriera di confinamento supplementare, costituita da uno strato minerale di spessore di almeno 1 m, con coefficiente di permeabilità  $k$  non superiore a  $10^{-9}$  m/s. Per la realizzazione dello strato si può utilizzare, opportunamente lavorato, materiale in posto di idonea qualità (classi A6 e A7 della classificazione HRB AASHTO). La scelta e le modalità di approntamento del sistema costituito da barriera geologica ed impermeabilizzazione artificiale dipendono sia dalla tipologia di rifiuti da smaltire sia dalle caratteristiche idrogeologiche del sito.

In relazione ai criteri di cui sopra sono, facendo riferimento a discariche di rifiuti non pericolosi, la normativa prevede che la barriera di base debba comprendere dal basso verso l'alto:

- barriera geologica naturale o di confinamento artificiale, spessore  $\geq 1$  m e permeabilità  $k \leq 10^{-9}$  m/s o strato minerale equivalente di spessore comunque non inferiore a 0,5 m, impiegando materiale appartenente alle classi A6 e A7 della classificazione HRB AASHTO;
- barriera di confinamento supplementare: spessore  $\geq 1$  m, permeabilità  $k \leq 10^{-9}$  m/s, impiegando materiale appartenente alle classi A6 e A7 della classificazione HRB AASHTO;
- geomembrana in HDPE, spessore  $\geq 2,5$  mm, conforme alla norma UNI 11309 per geomembrane lisce ed alla norma UNI 11498 per geomembrane ad aderenza migliorata; geotessile non tessuto (resistenza a trazione minima nelle due direzioni longitudinale e trasversale: 60 kN/m – norma UNI EN ISO 10319; resistenza al punzonamento statico minima: 10 kN – norma UNI EN ISO 12236; massa areica minima: 1200 g/m<sup>2</sup> - norma UNI EN 9864) o altro adeguato sistema di protezione per la geomembrana;
- strato drenante: spessore  $\geq 0,5$  m, permeabilità  $k \geq 10^{-2}$  m/s, classi A1 e A3 della classificazione HRB AASHTO. Il materiale drenante deve essere costituito da un aggregato grosso marcato CE (indicativamente ghiaia/pietrisco di pezzatura 16-64 mm), a basso contenuto di carbonati ( $\leq 35$  %), lavato, con percentuale di passante al vaglio 200 ASTM  $\leq 3$ %; con granulometria uniforme, con un coefficiente di appiattimento  $\leq 20$  (secondo UNI EN 933-3) e diametro minimo  $d \geq 4$  volte la larghezza delle fessure del tubo di drenaggio.

In figura 2.1 è mostrato un esempio di rivestimento per discariche di MSW in USA.

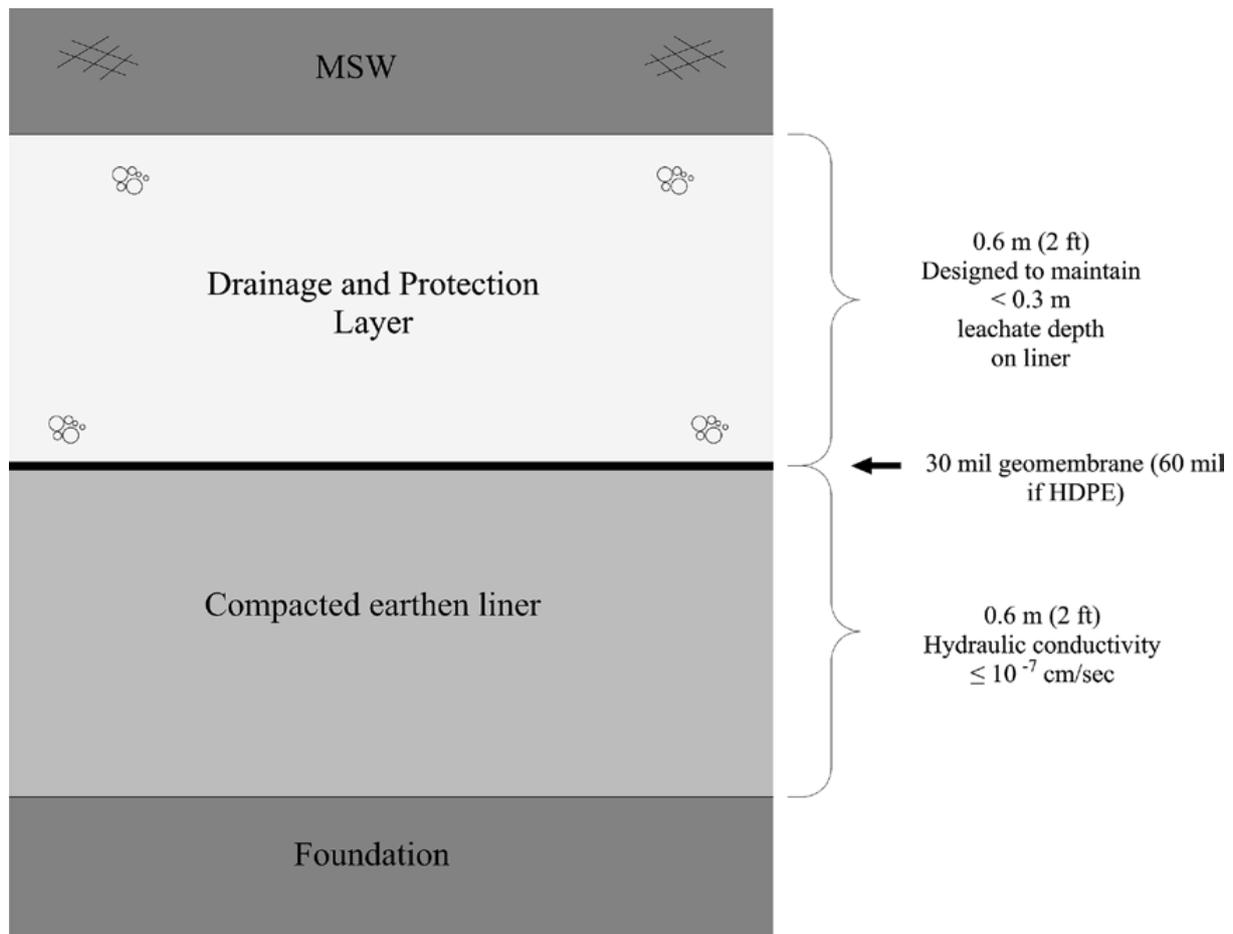


Figura 2.1: Esempio di rivestimento nelle discariche di MSW in USA, immagine tratta da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”

## 2.4 Sistema di drenaggio e raccolta percolato

Le modalità di approntamento, il dimensionamento e le caratteristiche costruttive della rete di drenaggio e raccolta del percolato favoriscono il suo più rapido allontanamento, per evitarne l'accumulo all'interno della massa rifiuti, quindi ridurre i fenomeni di intasamento garantire l'ispezionabilità del sistema. Tra i rifiuti ed il sistema drenante non viene interposto materiale sintetico e/o naturale, con funzione filtrante, di conducibilità idraulica e porosità inferiori a quella del letto drenante, poiché questi potrebbero ostacolare il deflusso del percolato e impedirne la corretta estrazione.

### 2.4.1 Pozzi di raccolta del percolato

Il ruolo dei pozzi è di raccogliere e allontanare il percolato dalla massa rifiuti e convogliarlo, attraverso una rete di gestione, in vasche di raccolta. I pozzi vengono preferenzialmente collocati lungo le sponde, e devono evitare l'accumulo di biogas prodotto. Il sistema di raccolta del percolato viene progettato e gestito in modo da minimizzare il battente idraulico sul fondo della discarica al minimo compatibile con i sistemi di sollevamento ed estrazione. A tal scopo:

- il sistema viene in ogni caso essere progettato per prevedere che le pompe entrino in funzione in modo automatico non appena vi sia il minimo battente idraulico tecnicamente necessario;
- il pozzo viene realizzato in modo che il fondo dello stesso si trovi ad una quota inferiore a quella della rete di drenaggio tale da consentire un corretto allontanamento del percolato;
- è necessario che il corpo rifiuti posseda adeguate proprietà drenanti, altrimenti vengono previste opportune infrastrutturazioni che facilitino l'estrazione del percolato.

I settori di deposito dei rifiuti vengono suddivisi in bacini idraulicamente separati, con superficie indicativa di 10.000 m<sup>2</sup>, misurati sul fondo.

Il dimensionamento del sistema di sollevamento va effettuato considerando le seguenti condizioni:

- settore/lotto di interesse a inizio deposito;
- evento meteorico eccezionale, con un tempo di ritorno di 10 anni e della durata di 48 ore;
- svuotamento del lotto garantito entro le 48 ore successive al termine dell'evento meteorico.

Il percolato, come anticipato, prima di essere inviato al trattamento, è raccolto in serbatoi dotati di idoneo sistema di controllo e di contenimento/ abbattimento di eventuali emissioni liquide e di emissioni gassose, qualora necessario, progettati e realizzati nel rispetto delle norme tecniche previste dal D.d.g. 07/01/1998 n. 36.

L'impianto di stoccaggio del percolato viene dimensionato al fine di permettere l'immagazzinamento della massima produzione attesa, considerando come dato di input l'apporto meteorico, nelle condizioni indicate precedentemente (evento meteorico eccezionale, della durata di 48 ore, con un tempo di ritorno di 10 anni).

L'impianto mantiene comunque un volume di riserva del 10% della capacità complessiva, come di buona consuetudine nell'utilizzo dei serbatoi.

## **2.4.2 Linee guida per la gestione del percolato**

In sede di progettazione viene stimata la produzione di percolato, dopo aver individuato i parametri che ne influenzano la produzione, che possono essere i seguenti:

- Caratteristiche meteo-climatiche dell'area in esame, cioè la piovosità, l'evapotraspirazione;
- Caratteristiche dei rifiuti depositati, come l'umidità, la granulometria, compattazione, ed eventuali pretrattamenti subiti;
- caratteristiche costruttive delle coperture temporanee e finali e proprietà dei materiali impiegati, pendenze definitive delle superfici di copertura dei lotti già completati, metodi per l'allontanamento delle acque meteoriche dai lotti in coltivazione;
- metodi per l'allontanamento delle acque superficiali;

Ovviamente si tiene conto della possibile variazione di questi parametri in fase gestionale. Bisogna valutare un modello opportuno, in grado di stimare mensilmente la quantità e la qualità del percolato prodotto, sia in fase operativa che in post- operativa. In tutte le fasi è necessario inoltre registrare i principali parametri meteo-climatici e verificare la stima di produzione di

percolato al variare di questi. Il percolato, una volta stoccato, viene trattato, e questo processo può avvenire attraverso trattamenti on site, oppure off site. La rimozione e il trattamento del percolato sono necessari al fine di evitare l'accumulo all'interno della discarica di elementi e sostanze mobili non degradabili, cosa che è in contrasto con il principio della sostenibilità ambientale. Il percolato può anche essere ricircolato in funzione del raggiungimento di specifici obiettivi gestionali descritti nel progetto, come ad esempio il controllo di parametri di processo nella discarica aerata, controllo dell'umidità necessaria ai processi di degradazione in caso di particolari condizioni di deficit idrico, poiché come già accennato, l'umidità gioca un ruolo fondamentale in questi processi. Può essere ricircolato tal quale, oppure dopo specifici trattamenti per adeguarlo a scopi predefiniti. E' importante che il sistema di ricircolo non interferisca in alcun modo con il sistema di captazione del biogas, inoltre deve svilupparsi al di sotto della copertura, per evitare emissioni di odori sgradevoli. Molti sistemi di ricircolo del percolato includono la costruzione di pompe in grado di convogliare il percolato dai serbatoi di accumulo ai sistemi di aggiunta di liquidi in discarica.

## 2.5 Criteri e linee guida per la copertura

La copertura separa i rifiuti dall'ambiente superficiale, ed ha inoltre lo scopo di controllare le infiltrazioni di acqua e le emissioni di biogas. Le coperture dei rifiuti si suddividono in:

- **coperture giornaliere:** giornalmente sui rifiuti deve essere depositato uno strato di materiale laddove necessario al fine di evitare il trasporto eolico delle frazioni leggere dei rifiuti e il contatto con eventuali animali, possono essere anche impiegati rifiuti o materiali di recupero dai rifiuti purché rispettino i requisiti di cui sopra e siano compatibili con la tipologia della discarica e i relativi criteri di ammissibilità dei rifiuti autorizzati. In alternativa possono anche essere utilizzati teli sintetici amovibili. Il materiale e gli eventuali rifiuti impiegati per le coperture giornaliere sono comunque conteggiati all'interno delle volumetrie autorizzate. I rifiuti devono essere conferiti con le operazioni di smaltimento (D1/D5) autorizzate. Il materiale impiegato per le coperture giornaliere deve rispondere ai seguenti requisiti:
  - permeabilità  $k \geq 10^{-3}$  m/s costante nel tempo;
  - non generare odori o polveri.
- **coperture provvisorie:** prima dell'installazione della copertura finale, come descritto dal d.lgs. 36/03 - allegato 1 si può procedere alla realizzazione di una copertura provvisoria per il tempo necessario al raggiungimento delle condizioni di stabilità meccanica e biologica definita in progetto. La copertura provvisoria dovrà avere caratteristiche strutturali funzionali ai processi (meccanici, biologici e chimici) proposti in progetto per la discarica. La copertura provvisoria dovrà comunque mantenere separati i rifiuti dall'ambiente esterno (consentendo il passaggio di gas e/o di liquidi laddove previsto dal progetto), garantire un regolare deflusso delle acque superficiali e consentire un equilibrato (seppur temporaneo) inserimento paesaggistico, avuto anche riguardo alla durata della stessa.
- **coperture finali:** queste devono essere realizzate al raggiungimento, verificato con sistematico monitoraggio, della stabilità meccanica definita dal progetto e tale da garantire l'integrità nel tempo della copertura stessa.
  - La copertura superficiale finale deve rispondere a questi criteri:
  - separazione dei rifiuti dall'ambiente esterno, controllo dei flussi in ingresso e controllo delle emissioni (biogas);

- essere funzionale e congrua con gli obiettivi prestazionali definiti in progetto e con le destinazioni d'uso previste nel piano di ripristino ambientale;
- ridurre al minimo la necessità di manutenzione;
- minimizzare i fenomeni di erosione;
- resistenza agli assestamenti e a fenomeni di subsidenza localizzata.

La stabilità meccanica raggiunge un livello accettabile quando il cedimento differenziale non eccede i valori ammissibili definiti in progetto per il pacchetto. Ovviamente i metodi, i tempi e i verticali di controllo dovranno essere concordati con l'Autorità competente al controllo.

I materiali utilizzati dovranno essere conformi a quanto previsto dalla normativa vigente ed essere compatibili con la destinazione d'uso.

Le scarpate della copertura superficiale devono essere realizzate con pendenze atte a garantire la stabilità della copertura.

La struttura multistrato, indipendentemente dalle categorie di discarica, deve includere geotessili di separazione tra materiali a diversa granulometria.

Una strada perimetrale all'interno dell'area dell'impianto della discarica deve permettere il transito di adeguati mezzi di intervento per la regolare manutenzione della copertura finale.

La conformazione finale superiore della discarica deve assicurare una corretta raccolta e un adeguato allontanamento delle acque meteoriche indicandone il percorso.

## 2.6 Criteri per la gestione del biogas

Il gas prodotto in discarica è, insieme al percolato, il percorso principale per potenziali fughe di inquinanti dal rifiuto all'ambiente, e il sistema di raccolta e controllo del gas (GCCS) è un componente critico in grandi discariche ingegnerizzate. L'incremento di velocità nella degradazione dei rifiuti comporta un aumento della produzione di LFG (landfill gas), un risultato che può comportare conseguenze negative per l'ambiente se non correttamente raccolto, oppure conseguenze positive se raccolto adeguatamente e usato come recupero energetico (biogas anaerobico). Come già discusso, i componenti principali del LFG sono metano (CH<sub>4</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), azoto e ossigeno quando l'aria è presente all'interno del corpo rifiuti, e tracce di gas emesse dai rifiuti stessi.

L'obiettivo prioritario è ridurre al minimo le emissioni di gas serra, eventuali sostanze nocive, e odori. L'impianto di captazione e raccolta consiste in una serie di pozzi (verticali o orizzontali) connessi attraverso tubazioni di testa (in figura 2.2 è mostrata la sezione di pozzo). I pozzi verticali sono comunemente installati in aree della discarica che raggiungono la desiderata profondità di rifiuti (tipicamente 9 m circa), mentre quelli orizzontali possono essere posizionati già al primo strato di rifiuti. Entrambe le tipologie presentano vantaggi e svantaggi in termini di costi, facilità di installazione e prestazione. I tubi forati possono essere in PVC o HDPE, e vanno circondati di materiale permeabile, ad esempio ghiaia. I tubi verticali sono connessi a un tubo di testa comune che convoglia il gas raccolto e lo invia al trattamento grazie ad un sistema di controllo. La forza trainante è la pressione, che causa l'uscita del LFG, ed è possibile incrementare l'efficienza applicando il vuoto ai pozzi. Il LFG è prodotto a temperature più alte delle condizioni ambiente, quindi viene di norma saturato con vapore, per ridurre potenziali combustioni. Ciò comporta, tuttavia, che parte del vapore condensi nel sistema di raccolta. Il liquido formatosi deve essere quindi rimosso per evitare che intasi le tubazioni e impedisca il flusso del gas e a tal scopo devono essere integrati al sistema di raccolta diversi scarichi di condensa nei punti più opportuni.

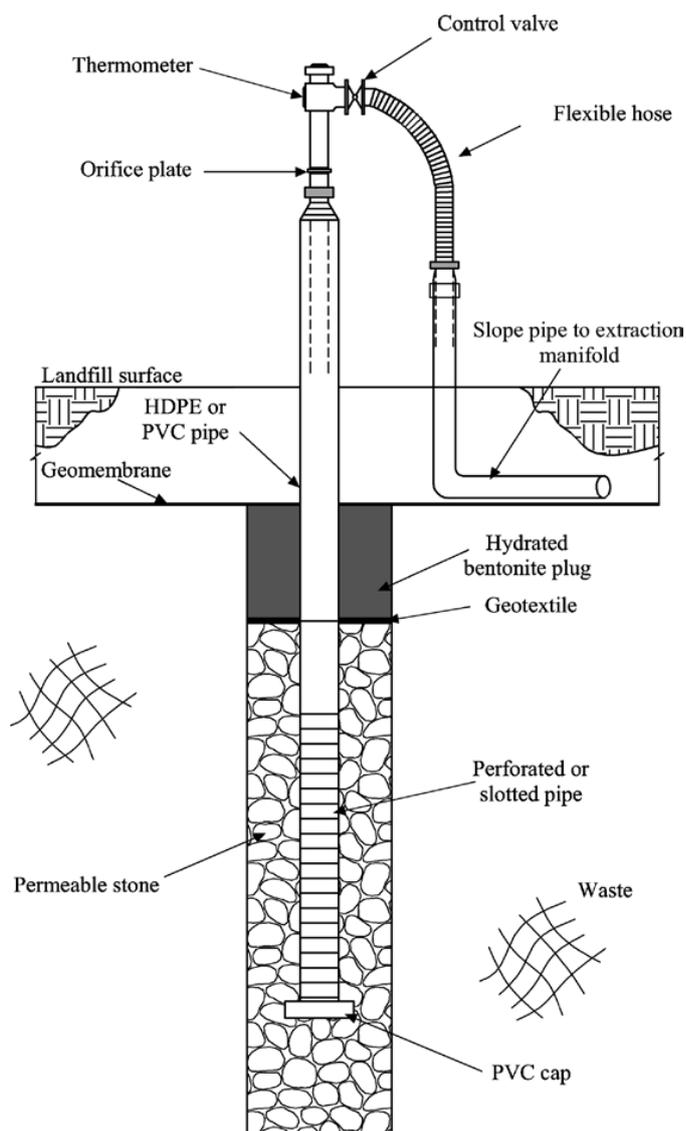
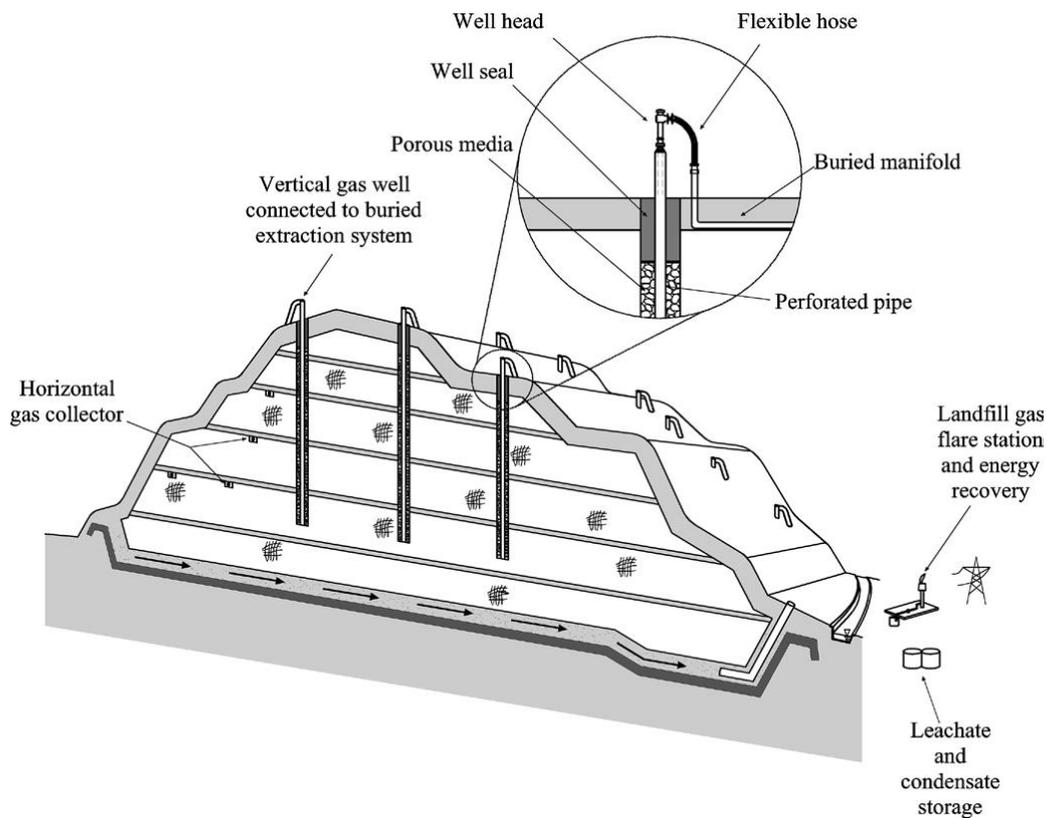


Figura 2.2: Sezione di un pozzo verticale per la raccolta di LFG

## 2.7 Stima della produzione di biogas

Come per il percolato, anche la produzione di biogas va stimata attraverso adeguati modelli che tengano conto dei diversi parametri che la influenzano, come la composizione dei rifiuti (contenuto organico), età, temperatura, umidità, tipologia del processo, cioè aerobico o anaerobico. L'impianto deve inoltre tendere a velocizzare quanto più possibile la produzione di biogas per ridurre al minimo il potenziale carico organico nel percolato a breve e lungo termine. La coltivazione della discarica, se possibile, procede per lotti a rapido esaurimento così da poter realizzare, il prima possibile, il sistema di gestione del biogas. Se ciò non risulta possibile per via della specifica morfologia della discarica, vengono adottati, nella fase di innalzamento degli strati di rifiuto, sistemi temporanei di captazione (figura 2.3). La captazione e il trattamento del biogas vengono adeguati alla tipologia dei rifiuti depositati e alla quantità e qualità del biogas prodotto secondo i seguenti criteri:

- qualora la qualità o quantità del biogas non permetta il suo utilizzo energetico, il biogas, in funzione della sua qualità, viene ossidato ex situ, termicamente (torcia, combustori catalitici, ecc.) o biologicamente (biofiltri);
- viene comunque evitata la dispersione in atmosfera.



**Figura 2.3: Schema di funzionamento per la raccolta del LFG, da “Sustainable Practices for Landfill Design and Operation”**

La produzione di biogas per unità di massa in funzione del tempo può essere espressa, per esempio, con la seguente formula:

$$G(t) = 2L_0kM_0e^{-kt} \quad (2.1)$$

Dove  $G(t)$  = produzione di LFG ( $m^3$  / anno) al tempo  $t$ ,  $L_0$  = generazione di  $CH_4$  potenziale ( $m^3$  di  $CH_4$  / tonnellata di rifiuto solido),  $k$  = costante di velocità di generazione ( $anni^{-1}$ ) e  $M_0$  (ton) la massa di rifiuto solido nel reattore. Questo modello ipotizza quindi una reazione del primo ordine, e il fattore 2 è basato sull'assunzione che la selettività sia al 50% verso il metano e 50% verso la  $CO_2$ . Se ci si aspetta, come nel caso aerobico, una composizione diversa (molta più  $CO_2$  e tracce di  $CH_4$ ), il fattore viene opportunamente cambiato. Il modello standard valuta il LFG per discariche convenzionali, ma la costante di velocità di generazione di metano aumenta nei siti dove è praticata l'aggiunta di liquidi. Per modellare in modo appropriato la produzione di gas nelle discariche umide è quindi necessario tener conto dell'incremento della produzione di LFG dovuto all'aumento di  $k$ , e tenendo a mente che alcune parti della discarica sono umide mentre altre possono non esserlo. Assumendo che  $w$  sia la frazione di rifiuti umidificati, la stima risulta per un batch di rifiuti solidi esposto ai liquidi al tempo  $t_c$  è riassunta dalle seguenti equazioni:

$$G(t) = 2L_0k_1M_0e^{-kt} \quad (2.2)$$

per  $0 < t < t_c$  (porzione di tempo prima dell'aggiunta di liquidi), mentre dopo l'aggiunta di liquidi:

$$G(t) = 2L_0k_1M_0e^{-k_1t}(1 - w) + 2L_0k_2(M_0e^{-k_2t_c})e^{-k_2(t-t_c)}w \quad (2.3)$$

per  $t_c < t < \infty$ .

Con questo approccio si può stimare la produzione di gas per impianti dove solo una parte dei rifiuti è bagnata, e dove l'aggiunta di liquidi viene effettuata dopo un certo periodo di tempo. Per il confronto tra i modelli gestionali aerobico e anaerobico di una discarica si fa uso del modello BIO-5, le cui caratteristiche saranno spiegate nel quarto capitolo.

## 2.8 Rifiuti non ammessi in discarica

Come già accennato, discariche di vecchia generazione ricevono rifiuti non selezionati né tantomeno trattati non sono più accettabili. E' quindi necessario che il rifiuto abbia caratteristiche adeguate allo smaltimento negli impianti di nuova generazione, in particolare non sono ammessi rifiuti con le caratteristiche seguenti:

- I rifiuti che possiedono un alto un tasso di putrescibilità, in generale i rifiuti con contenuto organico totale (TOC) superiore al 5%;
- I rifiuti che possiedono un valore utile per riutilizzo, riciclo, o recupero, materiale o energetico (con recupero si intende qualsiasi operazione che permetta ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, cioè sostituendo altri materiali altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione);
- Rifiuti classificati come esplosivi, comburenti e infiammabili;
- Rifiuti che contengono una o più sostanze corrosive in concentrazione totale maggiore o uguale a 1%;
- Rifiuti sanitari pericolosi a rischio infettivo;
- Rifiuti contenenti sostanze chimiche non identificate e/o nuove, che provengono da attività di ricerca, di sviluppo o di insegnamento, i cui effetti sull'uomo e/o sull'ambiente non sono noti;
- Rifiuti della produzione di principi attivi per biocidi, e per prodotti fitosanitari;
- rifiuti che contengono o sono contaminati da PCB;
- rifiuti che contengono fluidi refrigeranti costituiti da CFC e HCFC, o rifiuti contaminati da CFC e HCFC in quantità superiore al 0,5% in peso riferito al materiale di supporto;
- rifiuti che contengono sostanze chimiche non identificate o nuove provenienti da attività di ricerca, di sviluppo o di insegnamento, i cui effetti sull'uomo e sull'ambiente non siano noti;
- Sono ammessi rifiuti per cui non risulta indispensabile il trattamento, cioè che questo non contribuisca alla loro riduzione in quantità e non diminuisca i rischi per la salute umana e l'ambiente;
- Va aggiunto che è vietato diluire o miscelare rifiuti al solo fine di renderli conformi ai criteri di ammissibilità;

Questi criteri, insieme alla conoscenza dei rischi associati alle diverse tipologie di rifiuti conferiti e ai relativi sistemi di protezione, consentono una progettazione della discarica più adeguata e sicura. Previa ammissione del rifiuto si presume quindi che tutte le possibilità alternative siano state prese in considerazione e che nessuna di queste sia stata valutata come appropriata o utilizzabile. L'obiettivo del trattamento è sintetizzato nelle seguenti funzioni:

- Ridurre il volume del rifiuto;
- Ridurre la pericolosità;
- Facilitarne il trasporto;
- Agevolarne il recupero;
- Smaltimento in condizioni di sicurezza;

I trattamenti per adeguare il rifiuto allo smaltimento in discarica devono essere appropriati, non è sufficiente comprimere e/o tritare i rifiuti indifferenziati senza includere una selezione adeguata delle diverse frazioni e un'appropriata stabilizzazione della frazione organica degli stessi. Vi è inoltre la finalità di ridurre la pericolosità del rifiuto oltre che separare le frazioni recuperabili, ne consegue quindi che cernita, triturazione, e separazione sono tutte operazioni di trattamento idonee a modificare i rifiuti, anche da pericolosi a non pericolosi, e a favorirne lo smaltimento in condizioni sicure. Per esempio, separare apparecchiature elettriche ed elettroniche dai rifiuti della raccolta selettiva porta alla riduzione di sostanze pericolose avviati a smaltimento. Queste sono le principali linee guida per la progettazione di discariche di nuova generazione.



Il grafico mostra come la discarica a breve impatto ambientale sia la tipologia a cui ogni nuova discarica deve tendere, poiché genera gli impatti di minor intensità, infatti, una volta esaurita la sua funzione, può diventare rapidamente un sito fruibile per altre attività, in quanto la presenza di biogas è trascurabile, poiché non sono presenti nella massa dei rifiuti materiali ad elevata putrescibilità e la produzione di percolato è anch'essa trascurabile in quanto la copertura finale impedisce l'infiltrazione dell'acqua di pioggia all'interno della massa rifiuti. Gli impatti generati non solo sono bassi, ma anche di breve durata, per cui la discarica a breve impatto ambientale risponde pienamente al concetto di sviluppo sostenibile descritto nel capitolo 1 e 2, in base al quale si ritiene sostenibile tutto ciò che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la soddisfazione dei bisogni delle future generazioni.

### 3.1 Descrizione delle scelte progettuali

La scelta innovativa consiste fondamentalmente dall'applicazione della concezione gestionale di discarica aerobica già descritta nel capitolo 1: l'aria viene immessa nel corpo di discarica con sistemi di iniezione (ad es. compressori) mediante dei tubi verticali e/o orizzontali fessurati, in questo modo si incrementa il flusso di aria all'interno dei rifiuti e si ottiene un eccesso di ossigeno, che consente lo sviluppo di reazioni aerobiche in tutto il volume dei rifiuti. Grazie a tale approccio gestionale si ottiene una stabilizzazione dei rifiuti più veloce e ciò migliora ulteriormente le prestazioni ambientali della discarica. Il modello "Filippa 2.0" prevede, in più, il conferimento di rifiuti prevalentemente non putrescibili, in tal modo, già, si minimizza la produzione di biogas. Grazie all'instaurazione di condizioni aerobiche, inoltre, si attiva un processo di mineralizzazione del rifiuto che, oltre ad essere più rapido, produce un gas di discarica con sviluppo di odori molto ridotto e facilmente eliminabile, in modo efficace, con i tradizionali impianti di biofiltrazione. La qualità del percolato risulta migliorata con un carico organico ridotto, facilmente trattabile con normali processi di depurazione delle acque reflue civili. I costi di costruzione e gestione sono ovviamente più elevati, però sono ampiamente compensati dai seguenti vantaggi:

- garanzia di una rapida restituzione del sito in equilibrio con l'ambiente, per una sua fruibilità alternativa;
- miglioramento complessivo delle prestazioni ambientali della discarica;
- riduzione dei tempi di gestione post-chiusura.

### 3.2 Rifiuti conferibili

I rifiuti conferibili sono costituiti da rifiuti non pericolosi, residuanti dalle attività di riutilizzo, riciclo, recupero e gestione dei rifiuti prodotti dal sistema dell'Economia Circolare a servizio della comunità civile. In tabella 3.1 sono elencati i codici e le caratteristiche di ciascun rifiuto:

**Tabella 3.1: elenco dei rifiuti conferibili in discarica**

RIFIUTI CONFERITI IN REGIME DI SMALTIMENTO			
SETTORE DI PROVENIENZA	Codice EER	Descrittore EER	Note

RICICLAGGIO CARTA	030307	Scarti della separazione meccanica nella produzione di polpa da rifiuti di carta e cartone	Il riciclo della carta è un'attività strategica per il paese e per l'ambiente. Lo smaltimento finale degli scarti non recuperabili ( ad es. frazioni miste di plastica, nylon, gomma, graffette di ferro ....) è indispensabile.
TRATTAMENTO DEI RIFIUTI URBANI	190501	Parte di rifiuti urbani e simili non destinata al compost	Trattasi di rifiuti non putrescibili provenienti dagli impianti di trattamento dei rifiuti urbani.
	190503	Compost fuori specifica	Trattasi di compost non idoneo all'utilizzo agronomico a causa della presenza di plastica, gomma, vetro e simili.
IMPIANTI DI POTABILIZZAZIONE DELL'ACQUA	190901	Rifiuti solidi prodotti da processi di filtrazione e vaglio primari	Trattasi di rifiuti solidi provenienti dalla potabilizzazione delle acque.
	190902	Fanghi prodotti dai processi di chiarificazione delle acque	Trattasi di fanghi provenienti dalla potabilizzazione delle acque.
	190903	Fanghi prodotti da processi di decarbonatazione	Trattasi di fanghi provenienti dalla potabilizzazione delle acque.
IMPIANTI DI TRATTAMENTO MECCANICO DEI RIFIUTI	191209	Minerali (ad esempio sabbia, rocce)	Trattasi di rifiuti inerti provenienti dalle operazioni di recupero di carta, plastica, legno, vetro e simili
	191212	Altri rifiuti (compresi materiali misti) prodotti dal trattamento meccanico di rifiuti	Trattasi di rifiuti provenienti dalle operazioni di triturazione, vagliatura, selezione per il recupero di carta, plastica, legno, vetro e simili.
EDILIZIA	170504	Terra e rocce	Trattasi di materiali a matrice inerte necessari per la gestione dell'impianto e per le opere di ingegneria.
	170508	Pietrisco per massicciate ferroviarie	Trattasi di materiali a matrice inerte necessari per le opere di ingegneria.

Come si può notare, vi sono soltanto una decina di codici di rifiuti, peraltro scarsamente putrescibili, e questa peculiarità dimostra come una discarica a servizio dell'economia circolare voglia essere l'avanguardia di quel concetto di sostenibilità di cui si è già parlato, il cui scopo è ridurre al minimo la produzione di rifiuti e cercare di ottimizzare recupero, riciclo e riutilizzo e servirsi della discarica per smaltire la frazione residuale non valorizzabile dalle suddette operazioni. In figura 3.2 vengono elencate nel primo diagramma le tre macro-categorie di rifiuti,

cioè inerti, fanghi ed “altri”, dove la categoria “altri rifiuti” è a sua volta suddivisa in sottocategorie di assimilabilità. Nel secondo diagramma vengono invece rappresentate le sole tre categorie distinte per la cinetica di putrescibilità: velocemente putrescibili (RVP), lentamente putrescibili (RLP) e non putrescibili (inerti).

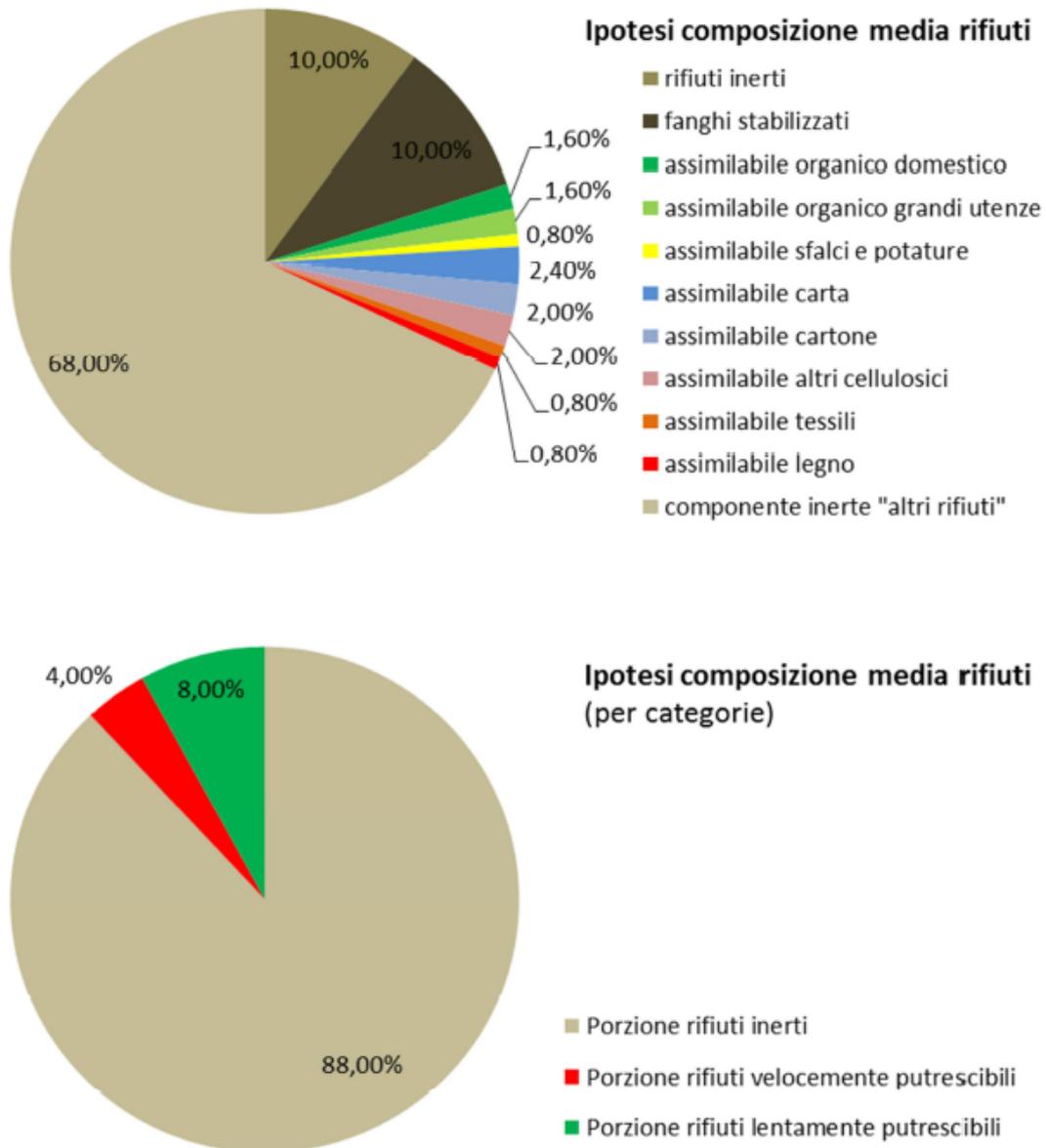


Figura 3.2: Macrocategorie dei rifiuti conferibili in una discarica a servizio dell’economia circolare (immagine tratta da “Relazione specialistica gas biologici” del progetto “La Filippa 2.0”)

### 3.3 Bilanci di massa: descrizione dei principi per la progettazione

La valutazione dei bilanci è un approccio fondamentale per la progettazione di una discarica, e una loro descrizione qualitativa aiuta a visualizzarla come un vero e proprio “bioreattore”, all’interno del quale avvengono processi di decomposizione di tipo fisico, chimico e biologico. Il carico in ingresso corrisponde ai rifiuti allocati in discarica e alle piogge, mentre la portata uscente si ripartisce tra biogas e percolato e la quantità di acqua allontanata per evotraspirazione, vi è inoltre accumulo di sostanze all’interno della massa rifiuti. La differenza

tra portata in ingresso e in uscita con il carico trattenuto rappresenta la quantità che si disperde verso l'ambiente, connesso alla diffusione incontrollata di percolato e biogas.

Per semplificazione si può assumere che la discarica si comporti come un reattore completamente miscelato CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), con l'ipotesi che la concentrazione di una certa sostanza sia sempre uniformemente distribuita nel volume del reattore, e l'equazione del bilancio di massa quindi diventa come segue:

$$\text{ingresso} \pm \text{reazione} = \text{uscita} + \text{accumulo} \quad (3.1)$$

Il termine *ingresso* è la massa entrante di una data sostanza (es. carbonio, azoto) nella discarica di volume  $V$ , e corrisponde al conferimento dei rifiuti. Se si considerano " $n$ " flussi di " $i$ " tipologie di rifiuto con portata  $Q_i$  (t/ anno), ciascuna di esse con diverse concentrazioni della data sostanza nella fase solida ( $x_{Si}$ , mg/kg di rifiuto), l'*ingresso* può essere così espresso:

$$\text{Ingresso} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_{Si} \quad (3.2)$$

Il termine *uscita* rappresenta la massa che esce dalla discarica come biogas ( $q_G$ ,  $\frac{m^3}{\text{anno}}$ ) e percolato ( $q_L$ ,  $\frac{m^3}{\text{anno}}$ ). Se le concentrazioni della data sostanza nel biogas e nel percolato sono rispettivamente  $x_G$  (mg/m<sup>3</sup>) e  $x_L$  (mg/m<sup>3</sup>), si ha:

$$\text{Uscita} = x_L \cdot q_L + x_G \cdot q_G \quad (3.3)$$

Si possono distinguere le frazioni di percolato e di biogas che vengono raccolte ( $q_{Lr}$  e  $q_{Gr}$ ) dalla frazione che viene dispersa in modo incontrollato attraverso le barriere della discarica ( $q_{Ld}$  e  $q_{Gd}$ ):

$$q_L = q_{Lr} + q_{Ld} \quad \text{e} \quad q_G = q_{Gr} + q_{Gd} \quad (3.4)$$

Il termine di accumulo, cioè l'incremento di massa ( $m$ ) nel sistema nel tempo ( $t$ ), espresso come  $dm/dt$  può a sua volta essere scomposto in due termini che si sommano, il primo è l'accumulo di sostanza che può degradarsi e subire lisciviazione, e che pertanto deve essere contenuta con i sistemi di impermeabilizzazione che ne evitano la dispersione incontrollata nell'ambiente ( $m_{mob}$ ), il secondo è l'accumulo di sostanza che si stabilizza e si trasforma in sostanza inerte ( $m_{fix}$ ).

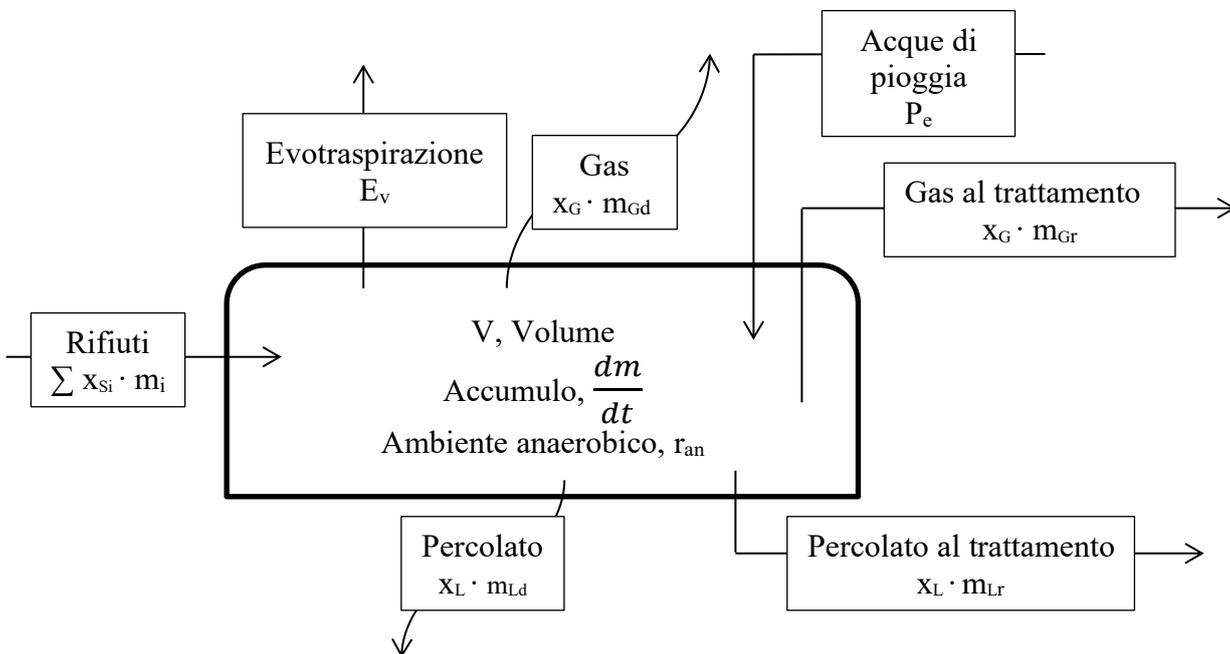
Il termine di *reazione* rappresenta la massa che reagisce per degradazione biologica e si allontana quindi dal sistema, questo processo può essere descritto da una cinetica di ordine zero o di primo ordine ( $r$  in mg/m<sup>3</sup>·anno):

$$\text{Reazione} = r \cdot V \quad (3.5)$$

Le reazioni possono avvenire in modo anaerobico, con biogas ricco in metano e anidride carbonica, oppure in condizioni aerobiche con aria in ingresso e formazione di gas ossidati in uscita. Le velocità in ambiente aerobico superiori a quelle in ambiente anaerobico, all'incirca di un ordine di grandezza. Il bilancio globale del sistema è rappresentato dallo schema black box in figura 3.2, in cui vengono espressi i diversi termini precedentemente descritti. Se si vogliono minimizzare le emissioni incontrollate ( $x_L \cdot q_{Ld}$  e  $x_G \cdot q_{Gd}$ ) è necessario minimizzare i termini positivi a secondo membro del bilancio di massa e massimizzare invece quelli negativi. Ciò si traduce, al punto di vista operativo, nelle seguenti azioni:

- Ridurre al minimo la massa di contaminante introdotta in discarica ( $x_{Si} \cdot m_i$ ), controllando sia il flusso ( $m_i$ ) che la qualità ( $x_{Si}$ ) dei rifiuti in ingresso, qui entrano in gioco i criteri con i quali vengono accettati i rifiuti in discarica, ovvero le frazioni non più valorizzabili provenienti dal ciclo vita della materia, seguendo il principio dell'economia circolare;
- E' necessario massimizzare la massa associata al biogas e al percolato raccolti ( $x_L \cdot m_{Lr}$  e  $x_G \cdot m_{Gr}$ ), controllando sia il flusso che la composizione;
- Ottimizzare il contenimento della frazione mobile accumulata ( $dm/dt_{mob}$ ) e i processi di stabilizzazione ( $dm/dt_{fix}$ );
- Massimizzare la velocità di reazione dei composti degradabili, e ciò è favorito dalle condizioni aerobiche.

Per il bilancio anaerobico abbiamo lo schema in figura 3.3:



**Figura 3.3: schema black box per il bilancio anaerobico**

Il bilancio è espresso attraverso l'equazione 3.6:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i x_{Si} \cdot m_i - x_L \cdot m_L - x_G \cdot m_G - r_{an} \cdot V - E_v + P_e \quad (3.6)$$

Possiamo inoltre suddividere  $\frac{dm}{dt}$  nei suoi due contributi, ovvero in frazione mobile accumulata ( $\frac{dm}{dt}_{mob}$ ) e in processi di stabilizzazione ( $\frac{dm}{dt}_{fix}$ ), ottenendo la 3.7:

$$\frac{dm}{dt}_{mob} + \frac{dm}{dt}_{fix} = \sum_i x_{Si} \cdot m_i - x_L \cdot m_L - x_G \cdot m_G - r_{an} \cdot V - E_v + P_e \quad (3.7)$$

Per il bilancio aerobico abbiamo in aggiunta la presenza di aria, e lo schema è rappresentato in figura 3.4:

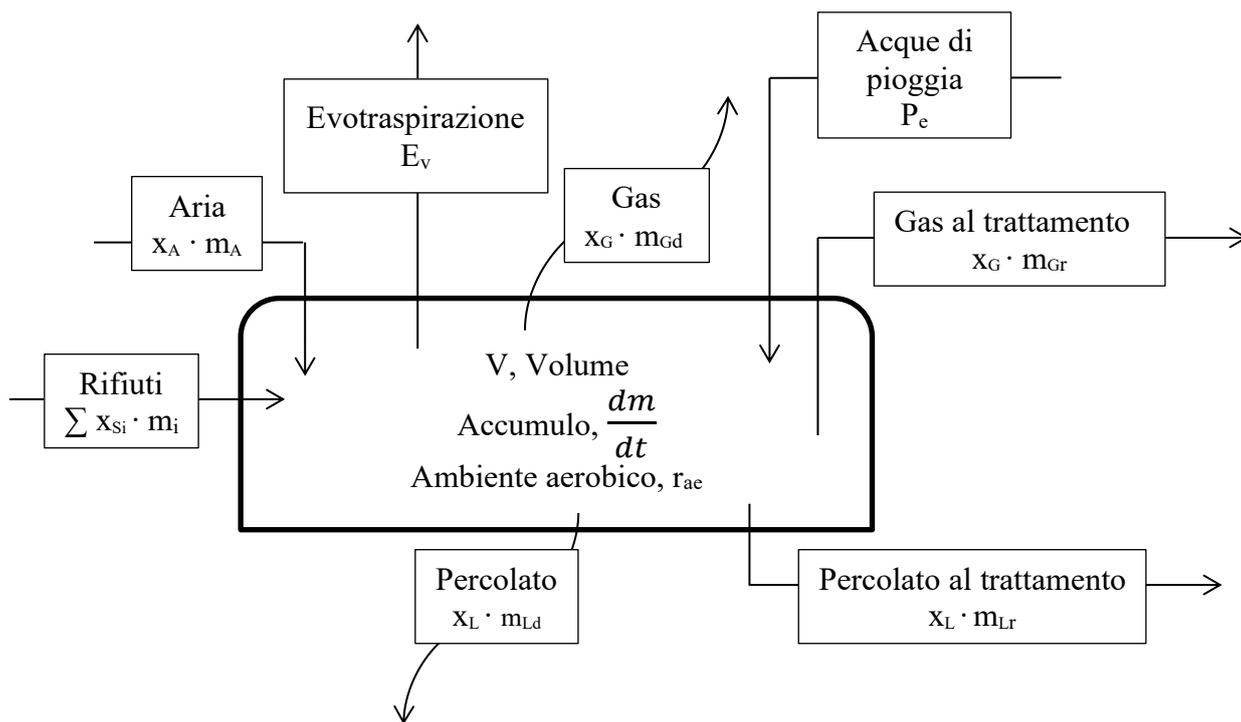


Figura 3.4: schema black box per il bilancio aerobico

Il bilancio è espresso attraverso l'equazione 3.8, quindi dalla 3.9:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i x_{Si} \cdot m_i + x_A \cdot m_A - x_L \cdot m_L - x_G \cdot m_G - r_{ae} \cdot V - E_v + P_e \quad (3.8)$$

$$\frac{dm}{dt}_{mob} + \frac{dm}{dt}_{fix} = \sum_i x_{Si} \cdot m_i + x_A \cdot m_A - x_L \cdot m_L - x_G \cdot m_G - r_{ae} \cdot V - E_v + P_e \quad (3.9)$$

Possiamo inoltre aggiungere, attraverso la 3.10, la seguente considerazione:

$$r_{ae} \approx 10 \cdot r_{an} \quad (3.10)$$

Un fattore molto importante nel bilancio di massa è l'ingresso di acqua nella massa rifiuti, questa infatti gioca un ruolo importante, in primis come reagente per la degradazione biologica da parte dei microorganismi, ed è anche un mezzo di trasporto di massa (flushing). Cercare di annullare del tutto la produzione del percolato, fino a servirsi di una sigillatura superficiale come prescritto dalla normativa, porta ad una "mummificazione dei rifiuti" e prolunga in arco di tempo lunghissimo le potenziali emissioni di contaminanti, e questo va in aperto contrasto con qualsiasi criterio di sostenibilità ambientale. Si può inoltre considerare di ricircolare il percolato, per favorire il trasporto di contaminanti in fase liquida, indurre un aumento di umidità e una migliore diffusione dei substrati e nutrienti nel corpo rifiuti, migliorando così i processi di degradazione. La lisciviazione comporta un miglioramento dei processi di degradazione per le stesse ragioni, proprio perché la massa di potenziali inquinanti estratti con la fase liquida può aumentare parecchio. La fase di post-esercizio può essere suddivisa in due parti: una attiva ed una passiva. Durante la prima, bisogna mantenere attivi sistemi di monitoraggio e controllo e al suo termine (cioè una volta che l'Autorità competente decreta la fine del periodo di post-

gestione, tuttavia i criteri con cui ciò è stabilito sono difficili da valutare) inizia il post-esercizio passivo dove si completa la stabilizzazione dei rifiuti fino al raggiungimento (asintotico) dell'equilibrio ambientale finale. Nella figura 3.5 sono riportati gli andamenti nel tempo delle emissioni incontrollate che si possono avere per diverse tipologie di discarica, partendo da quella incontrollata, fino ad arrivare ai più attuali concetti di progettazione sostenibile. Nel caso di scarico incontrollato l'emissione è massima durante gli anni di esercizio e cala nel tempo successivo. Per le discariche moderne, definite anche "dry tombs", le emissioni sono molto contenute e controllate durante la fase di esercizio dalle barriere e dai sistemi di raccolta del biogas e percolato. Nel momento in cui l'impermeabilizzazione invecchia e si rompe (la loro vita può durare da 10 a 30 anni), le emissioni incontrollate avvengono con maggiore intensità, molto superiore ai limiti di accettabilità ( $e_a$ ) normativi. Una discarica sostenibile si prefigge l'obiettivo, nelle sue varie fasi di vita, di accumulare potenziali contaminanti, e di influenzare i diversi termini del bilancio di massa per arrivare ad una fase di post-gestione passiva dove l'emissione incontrollata residua, che si potrà avere con l'esaurimento dell'efficienza dei sistemi di contenimento, è compatibile con i criteri di sostenibilità ambientale, risultando  $\ll e_a$ . Questo è il vero scopo della progettazione di una discarica sostenibile a servizio dell'economia circolare, e proprio su questi principi le varie opzioni di intervento di gestione e trattamento rifiuti vanno devon essere valutate. Il gestore così è stimolato a servirsi di tutti i mezzi possibili per conseguire questo obiettivo nel periodo più breve possibile, coniugando il ritorno economico dell'investimento imprenditoriale e il raggiungimento degli standard di sostenibilità ambientale prefissati.

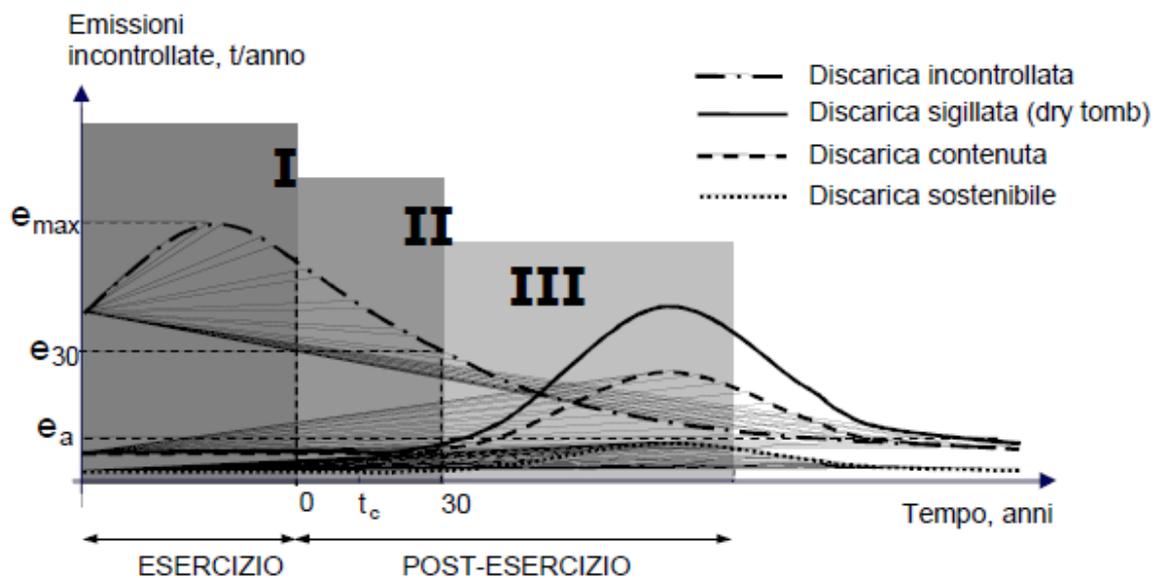


Figura 3.5: Andamento nel tempo delle emissioni incontrollate di percolato biogas per diverse tipologie discarica in accordo alla qualità ed alla durata delle barriere, immagine tratta da R. Cossu "Il bilancio di massa per la discarica sostenibile"

## 4. Confronto tra gestione aerobica e anaerobica per una discarica a servizio dell'economia circolare

Questo capitolo costituisce il cuore della trattazione, e affronta il confronto fra la gestione aerobica e anaerobica per una discarica a servizio dell'economia circolare. I calcoli e le valutazioni effettuate fanno riferimento ad un ipotetico progetto di una discarica a servizio dell'economia circolare. Vengono esaminati vari aspetti per poter delineare meglio in quali caratteristiche differiscono le due gestioni e quali siano i vantaggi e svantaggi di ciascuna, avendo sempre ben a mente il criterio di sostenibilità espresso nei capitoli precedenti. Gli aspetti esaminati per il confronto sono principalmente due:

- 1) **Confronto tra i biogas:** questo è ovviamente influenzato dal tipo di reazioni che avvengono nella massa rifiuti, sia in quantità che in qualità, è importante dunque valutare gli effetti che determinano la composizione e le conseguenze che questa comporta, come la necessità o meno di purificare il biogas da sostanze inquinanti per l'ambiente, ad esempio metano o idrogeno solforato;
- 2) **Confronto tra i percolati:** la quantità del percolato prodotto è funzione di diversi fattori, tra cui la pluviometria, l'evotraspirazione, l'umidità dell'ambiente e dei rifiuti stessi. Anche in questo caso si vedrà se la reazione aerobica ed anaerobica portino a risultati diversi.

### 4.1 Confronto tra i biogas prodotti

La produzione di biogas è uno dei principali fattori di confronto, poiché la presenza di aria comporta sostanziali differenze in termini di qualità e quantità già descritte nel primo capitolo, come la velocità e la stechiometria di reazione, la quantità di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> presenti. Il modello usato per prevedere la produzione di biogas è il BIO-5, che richiede l'inserimento della caratterizzazione merceologica dei rifiuti per valutare la capacità fermentativa di ciascun tipo di rifiuto conferito, in quanto dato basilare del fenomeno e della sua consistenza. I rifiuti conferibili sono stati elencati in tabella 1.

Nei paragrafi seguenti viene descritto con maggior dettaglio il modello BIO-5, sono mostrati i parametri inseriti. In seguito sono elencati i risultati di previsione ottenuti riguardo la gestione anaerobica e quella aerobica, seguiti da relative considerazioni.

#### 4.1.1 Descrizione del modello di produzione BIO-5

Il modello BIO-5 consiste in un foglio elettronico Excel, e nasce dal miglioramento delle precedenti versioni dello stesso sviluppate fin dagli anni '80. La versione utilizzata prevede un elevato numero di variabili differenziabili, alcune di queste consistono in informazioni dettagliate, come ad esempio il quantitativo annuo di rifiuti conferiti, mentre altre vengono assunte come "informazioni" tipologiche, con la funzione di modificare lo sviluppo del calcolo, ad esempio la definizione della morfologia della discarica, a cui non è attribuibile un valore numerico e oggettivo, per cui è necessario scegliere tra alcuni casi tipologici che approssimano il caso reale preso in esame. Non si deve pensare che questi parametri abbiano un ruolo secondario, sono ugualmente importanti ai dati numerici oggettivi, basti pensare a come la forma della discarica dia il suo contributo alla capacità produttiva della fermentazione e

all'efficienza di captazione. I dati inseriti consentono di definire un coefficiente correttivo di produttività in grado di modificare la produzione specifica, valutando la sovrapposizione degli effetti in funzione degli afflussi dei rifiuti. Va aggiunto un fattore probabilistico ai dati di input, poiché la discarica è un ambiente molto eterogeneo, ben diverso dalle scale pilota in laboratorio, per cui invece che inserire un unico valore specifico per un dato ne vengono inseriti due, che corrispondono agli estremi del range di valori possibili. Il modello BIO-5 utilizza ben 17 fattori di correzione dei coefficienti di produzione specifica e di efficienza di captazione. Per i calcoli viene utilizzato un algoritmo derivato da un modello biochimico teorico, e ne ottimizza i parametri applicati, consentendo quindi di diagrammare una curva "standard" di produzione unitaria. I parametri che vengono corretti poiché un modello teorico non tiene conto della caratterizzazione dell'ambiente di decomposizione del rifiuto. La prima parte necessaria alla valutazione si pone come obiettivo la definizione della produttività specifica media per tonnellata di rifiuto. Per fare questo è necessario conoscere la composizione merceologica del rifiuto e differenziarlo in due frazioni a seconda della cinetica di fermentazione: RVP, cioè rifiuto velocemente putrescibile e RLP, ovvero rifiuto lentamente putrescibile. Si definisce poi il coefficiente di produttività, il cui scopo è definire la condizioni della fermentazione nell'impianto in questione. Il modello richiede inoltre l'inserimento dell'umidità interna alla discarica, parametro di fondamentale importanza, poiché gioca un ruolo fondamentale nei fenomeni fermentativi. Una volta stabilita la produttività per singola frazione di rifiuto si passa alla valutazione della cinetica di decomposizione, viene definito il tempo di semitrasformazione ( $t_s$ ), da intendersi come il tempo necessario al dimezzamento della parte biodegradabile iniziale, e tale parametro viene valutato separatamente per le due porzioni RLP e RVP. Noto  $t_s$  vengono calcolate quindi le massime produzioni annuali e i coefficienti di regressione ( $k_f$ ) e le produzioni specifiche anno per anno. La fase finale del calcolo valuta la sovrapposizione degli effetti correlati alle quantità di rifiuti smaltiti in funzione della cronologia di conferimento e l'effetto di questi sulla produzione teorica annua.

#### 4.1.2 Gestione anaerobica

I parametri del modello BIO-5 sono inseriti in tabella 4.01:

**Tabella 4.01: foglio Excel d'inserimento dei parametri del modello BIO-5**

<b>BIO-5</b>		<i>elaborato da Enrico Magnano (*)</i>				<i>Dati di progetto</i>	
<b>impianto:</b>		<b>La Filippa 2.0</b>				<b>data:</b>	16-ott-19
<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	55,00%	70,00%	45,00%	0,68%	0,47%
MR2	residui giardino	0,80%	50,00%	70,00%	45,00%	0,15%	0,11%
MR3	carta e cartone	6,40%	50,00%	60,00%	8,00%	1,77%	1,29%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	50,00%	20,00%	10,00%	0,07%	0,05%
MR5	legno	0,80%	50,00%	50,00%	20,00%	0,16%	0,10%
MR6	plastica e gomma	0,00%	70,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%

MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
Totale		100,00%					
<b>FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)</b>						<b>50</b>	%

La capacità netta è stimata pari a 480.000 m<sup>3</sup>, mentre la densità media definita sulla base della tipologia dei rifiuti conferibili ed alle tecniche di compattazione utilizzabili è stata stimata in circa 0,9-1 ton/m<sup>3</sup>. Ne consegue una capacità di 480.000 tonnellate. Il conferimento annuo è stato ipotizzato in circa 120.000 tonnellate, la durata della fase attiva della discarica è quindi stimata in circa 4 anni.

CR	CONFERIMENTI RIFIUTI	anno	conferimento	
CR1	1° conferimento rifiuti	1	120.000	t RS
CR2	2° conferimento rifiuti	2	120.000	t RS
CR3	3° conferimento rifiuti	3	120.000	t RS
CR4	4° conferimento rifiuti	4	120.000	t RS
CR5	5° conferimento rifiuti	5	0	t RS
CR6	6° conferimento rifiuti	6	0	t RS
CR7	7° conferimento rifiuti	7	0	t RS
CR8	8° conferimento rifiuti	8	0	t RS
CR9	9° conferimento rifiuti	9	0	t RS
CR10	10° conferimento rifiuti	10	0	t RS
CR11	11° conferimento rifiuti	11	0	t RS
CR12	12° conferimento rifiuti	12	0	t RS
CR13	13° conferimento rifiuti	13	0	t RS
CR14	14° conferimento rifiuti	14	0	t RS
CR15	15° conferimento rifiuti	15	0	t RS
CR16	16° conferimento rifiuti	16	0	t RS
CR17	17° conferimento rifiuti	17	0	t RS
CR18	18° conferimento rifiuti	18	0	t RS
CR19	19° conferimento rifiuti	19	0	t RS
CR20	20° conferimento rifiuti	20	0	t RS
CR21	21° conferimento rifiuti	21	0	t RS
CR22	22° conferimento rifiuti	22	0	t RS
CR23	23° conferimento rifiuti	23	0	t RS
CR24	24° conferimento rifiuti	24	0	t RS
CR25	25° conferimento rifiuti	25	0	t RS
CR26	26° conferimento rifiuti	26	0	t RS
CR27	27° conferimento rifiuti	27	0	t RS
CR28	28° conferimento rifiuti	28	0	t RS
CR29	29° conferimento rifiuti	29	0	t RS
CR30	30° conferimento rifiuti	30	0	t RS
CR31	31° conferimento rifiuti	31	0	t RS
CR32	32° conferimento rifiuti	32	0	t RS
CR33	33° conferimento rifiuti	33	0	t RS
CR34	34° conferimento rifiuti	34	0	t RS
CR35	35° conferimento rifiuti	35	0	t RS
CR36	Totale conferimento rifiuti		480000	t RS

#### FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA PRODUTTIVITA' DI BIOGAS

<b>A</b>	<b>precipitazione media annua (mm/m<sup>2</sup>)</b>	
A1	sconosciuta	fattore 100
A2	meno di 600 mm	fattore 80
A3	tra 600 e 800 mm	fattore 90
A4	tra 800 e 1000 mm	fattore 95
A5	tra 1000 e 1500 mm	fattore 100
A6	tra 1500 e 2000 mm	fattore 102
A7	oltre 2000 mm	fattore 105
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 90</b>
<b>B</b>	<b>altri afflussi idrici</b>	
B1	sconosciuti od inesistenti	fattore 100
B2	ipotesi di falde limitate in connessione	fattore 102
B3	ipotesi di falde consistenti in connessione	fattore 105
B4	corpi idrici superficiali limitati	fattore 102
B5	corpi idrici superficiali consistenti	fattore 105
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 100</b>
<b>C</b>	<b>ricircolo dei percolati in discarica</b>	
C1	non viene eseguito	fattore 100
C2	eseguito limitatamente	fattore 103
C3	eseguito normalmente	fattore 108
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 108</b>
<b>D</b>	<b>coperture intermedie della discarica</b>	
D1	non eseguite	fattore 100
D2	eseguite con mat. drenanti (sabbia, ghiaia, macerie)	fattore 104
D3	eseguite con materiali impermeabili (argilla, limi)	fattore 92
D4	eseguite con materiali sintetici	fattore 98
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 104</b>
<b>E</b>	<b>copertura finale della discarica</b>	
E1	poco spessa e permeabile	fattore 102
E2	poco spessa ed impermeabile	fattore 100
E3	spessa e permeabile	fattore 100
E4	spessa ed impermeabile	fattore 98
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 98</b>
<b>F</b>	<b>temp. media annua aria (°C)</b>	
F1	sconosciuta	fattore 100
F2	meno di 5	fattore 90
F3	tra 5 e 10	fattore 98
F4	tra 10 e 14	fattore 100
F5	tra 14 e 18	fattore 102
F6	oltre 18	fattore 104
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 102</b>
<b>G</b>	<b>spessore della discarica in metri</b>	
G1	tra 0 e 5	fattore 60
G2	tra 5 e 10	fattore 90
G3	tra 10 e 20	fattore 100
G4	oltre 20	fattore 105
		<b>FATTORE ATTRIBUITO 100</b>

<b>H</b>	<b>porzione di discarica fuori terra (in elevazione)</b>		
H1	meno del 10%	fattore	100
H2	tra il 10 e 30%	fattore	98
H3	tra il 30 e 50%	fattore	95
H4	tra il 50 e 80%	fattore	90
H5	oltre 80%	fattore	85
<b>FATTORE ATTRIBUITO</b>			<b>95</b>
<b>I</b>	<b>tipo di gestione</b>		
I1	discarica non gestita e completamente aerobica	fattore	50
I2	discarica gestita parzialmente, gest. semi-aerobica	fattore	75
I3	discarica gestita correttamente, gestione anaerobica	fattore	100
<b>FATTORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>Fattore di correzione Kp</b>			<b>97,88</b>
<b>FATTORI CHE INFLUISCONO SULLA CAPTABILITA' DI BIOGAS</b>			
<b>L</b>	<b>Geometria della discarica</b>		
L1	forma regolare in piano	fattore	100
L2	forma regolare in valle	fattore	95
L3	forma irregolare in piano	fattore	95
L4	forma irregolare in valle	fattore	90
L5	in celle fisicamente separate	fattore	90
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>95</b>
<b>M</b>	<b>Spessore della discarica (in metri)</b>		
M1	tra 0 e 5	fattore	60
M2	tra 5 e 10	fattore	90
M3	tra 10 e 20	fattore	100
M4	tra 20 e 30	fattore	90
M5	oltre 30	fattore	80
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>N</b>	<b>porzione di discarica fuori terra (in elevazione)</b>		
N1	meno del 10%	fattore	100
N2	tra il 10 e 30%	fattore	90
N3	tra il 30 e 50%	fattore	80
N4	tra il 50 e 80%	fattore	85
N5	oltre 80%	fattore	70
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>80</b>
<b>O</b>	<b>Densità dei rifiuti dopo la compattazione (Kg/m<sup>3</sup>)</b>		
O1	tra 400 e 600 kg	fattore	80
O2	tra 600 e 700 kg	fattore	95
O3	tra 700 e 800 kg	fattore	100
O4	tra 800 e 900 kg	fattore	98
O5	tra 900 e 1000 kg	fattore	95
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>95</b>
<b>P</b>	<b>coperture intermedie della discarica</b>		
P1	non eseguite	fattore	100

P2	eseguite con materiali drenanti	fattore	100
P3	eseguite con materiali impermeabili	fattore	80
P4	eseguite con materiali sintetici	fattore	90
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>Q</b>	<b>copertura finale della discarica</b>		
Q1	poco spessa e permeabile	fattore	80
Q2	poco spessa ed impermeabile	fattore	90
Q3	spessa e permeabile	fattore	90
Q4	spessa ed impermeabile	fattore	100
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>R</b>	<b>Presenza di falde di percolati</b>		
R1	non esistenti	fattore	100
R2	limitate al 20% dei rifiuti	fattore	95
R3	limitate al 40% dei rifiuti	fattore	80
R4	limitate al 60% dei rifiuti	fattore	50
R5	limitate al 80% dei rifiuti	fattore	30
R6	oltre l'80% dei rifiuti	fattore	20
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>S</b>	<b>Presenza di fanghi in discarica</b>		
S1	non presenti	fattore	100
S2	limitati al 10% dei rifiuti	fattore	90
S3	limitati al 30% dei rifiuti	fattore	70
S4	limitati al 50% dei rifiuti	fattore	50
S5	oltre il 50% dei rifiuti	fattore	30
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>Fattore di correzione kc1</b>			<b>72,20</b>
<b>T</b>	<b>Tipologia del sistema di captazione</b>		
T1	trincee drenanti sub orizzontali pendenza < 5%	fattore	70
T2	trincee drenanti sub orizzontali pendenza > 5%	fattore	80
T3	perforazioni verticali diametro fino a 300 mm	fattore	80
T4	perforazioni verticali diametro fino a 600 mm	fattore	95
T5	perforazioni verticali diametro fino a 1000 mm	fattore	100
T6	camini costruiti in elevazione	fattore	90
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>90</b>
<b>U</b>	<b>Tipologia della rete di captazione</b>		
U1	in serie (fino a 4 pozzi per ramo)	fattore	90
U2	in serie (oltre 4 pozzi per ramo)	fattore	85
U3	in serie (oltre 8 pozzi per ramo)	fattore	65
U4	in parallelo	fattore	100
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>V</b>	<b>Raggio medio di influenza dei pozzi</b>		
V1	meno di 10 m	fattore	95
V2	tra 10 e 15 m	fattore	90
V3	tra 15 e 20 m	fattore	85

V4	tra 20 e 25 m	fattore	80
V5	tra 25 e 30 m	fattore	70
V6	tra 30 e 35 m	fattore	65
V7	tra 35 e 50 m	fattore	50
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>85</b>
<b>Z Raggio medio di influenza trincee</b>			
Z1	meno di 10 m	fattore	90
Z2	tra 10 e 15 m	fattore	80
Z3	tra 15 e 20 m	fattore	65
Z4	tra 20 e 25 m	fattore	50
Z5	tra 25 e 30 m	fattore	35
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>100</b>
<b>X Impostazione criterio di captazione</b>			
X1	captazione bonifica spinta (CH <sub>4</sub> 30%)	fattore	110
X2	captazione bonifica, ipotesi di recupero (CH <sub>4</sub> 40%)	fattore	100
X3	captazione per recupero (CH <sub>4</sub> > 50%)	fattore	90
<b>VALORE ATTRIBUITO</b>			<b>110</b>
<b>Fattore di correzione kc2</b>			<b>84,15</b>
<b>Coefficiente di captabilità Kc</b>			<b>78,18</b>

Più di una volta è richiesta la valutazione degli stessi parametri, per evidenziare come questi influiscano su fattori diversi del modello, come ad esempio lo spessore della discarica, richiesto sia per la valutazione dei fattori che influenzano la produzione del biogas, sia per i fattori che ne influenzano la captazione. Quest'ultimo termine sta ad indicare che non tutto il biogas prodotto può essere intercettato dall'impianto, da qui si definisce l'efficienza di captazione come coefficiente ( $K_c$ ) che sta ipoteticamente tra 0 (assenza di impianto di captazione) ed 1 (captazione ideale). I motivi per cui il valore di  $K_c$  differisce dall'unità sono molteplici, tra cui, oltre alle caratteristiche stesse della rete di captazione, la complessità del sistema e il fatto che sia in continua evoluzione, o altri fattori di tipo ambientale come le variazioni barometriche che modificano continuamente i valori ottimali di depressione da applicare all'impianto di captazione. Ulteriori fattori sono elencati di seguito:

- Grado di compattazione dei rifiuti;
- Tipologia e merceologia dei rifiuti;
- Livello di saturazione di umidità dei rifiuti;
- Spessore dei rifiuti;
- Tipologia e permeabilità delle coperture giornaliere e finali.

Nella valutazione della captabilità al valore di  $K_c$  viene attribuito un valore fisso rappresentativo di tutte le fasi di vita della discarica in base a tutti i parametri inseriti nel modello. Va specificato che ultimamente le Normative e le Prescrizioni degli Enti di Controllo ed Autorizzativi hanno imposto di elevare l'efficienza di captazione al livello più alto possibile. Inseriti tutti i dati necessari, il modello dà i risultati nelle tabelle 4.02, 4.03 e 4.04:

**Tabella 4.02: risultati prospezione per la gestione anaerobica del modello BIO-5**

<b>BIO-5</b>		<i>elaborato da Enrico Magnano (*)</i>		<i>Risultati prospezione</i>
<b>impianto:</b>		<b>La Filippa 2.0</b>	<b>data:</b> 16-ott-19	
<b>Parametro calcolato</b>	<b>sigla</b>	<b>risultato</b>	<b>unità misura</b>	
Percentuale rifiuti velocemente putrescibili	RVP	<b>4,00%</b>		
Percentuale rifiuti lentamente putrescibili	RLP	<b>8,00%</b>		
Percentuale rifiuti non putrescibili	RNP	<b>88,00%</b>		
Percentuale rifiuti putrescibili	RP	<b>12,00%</b>		
Carbonio biodegradabile	C <sub>org</sub>	<b>28,30</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile	C <sub>bio</sub>	<b>20,14</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile RVP	C <sub>bio</sub> RVP	<b>5,82</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile RLP	C <sub>bio</sub> RLP	<b>14,32</b>	kg / t RS	
Biogas producibile	LFG <sub>50</sub>	<b>37,63</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Fattore di correzione in funzione dell'umidità	Kud	<b>0,98</b>		
Biogas producibile considerato il fattore Kud	Ptu	<b>36,82</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile considerato il fattore Kud RVP	Ptu RVP	<b>10,64</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile considerato il fattore Kud RLP	Ptu RLP	<b>26,18</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Coefficiente di regressione della curva RVP	Kr RVP	<b>0,79370</b>		
Coefficiente di regressione della curva RLP	Kr RLP	<b>0,92587</b>		
Coefficiente cinetico RVP	Ki RVP	<b>0,23105</b>		
Coefficiente cinetico RLP	Ki RLP	<b>0,07702</b>		
Tempo di semitrasformazione RVP	Ts RVP	<b>3,00000</b>	anni	
Tempo di semitrasformazione RLP	Ts RLP	<b>9,00001</b>	anni	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni	Ptu 40	<b>47,88</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RVP	Ptu 40 RVP	<b>23,33</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RLP	Ptu 40 RLP	<b>24,55</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni		<b>21.988.466</b>	Nm <sup>3</sup>	
Coefficiente di produzione Kp	Kp	<b>96,00%</b>		
Biogas producibile con fattore Kp	Ptu Kp	<b>35,34</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni con fattore Kp	Ptu Kp 40	<b>0,46</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Coefficiente di captabilità Kc	Kc	<b>78,18%</b>		
Biogas captabile con fattore Kc	Ptu Kc	<b>27,63</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas captabile nell'arco di 40 anni		<b>17.189.483</b>	Nm <sup>3</sup>	
Primo anno di conferimento		<b>1</b>		
Numero anni di conferimento		<b>4</b>	anni	
Totale rifiuti conferiti		<b>480.000</b>	t RS	

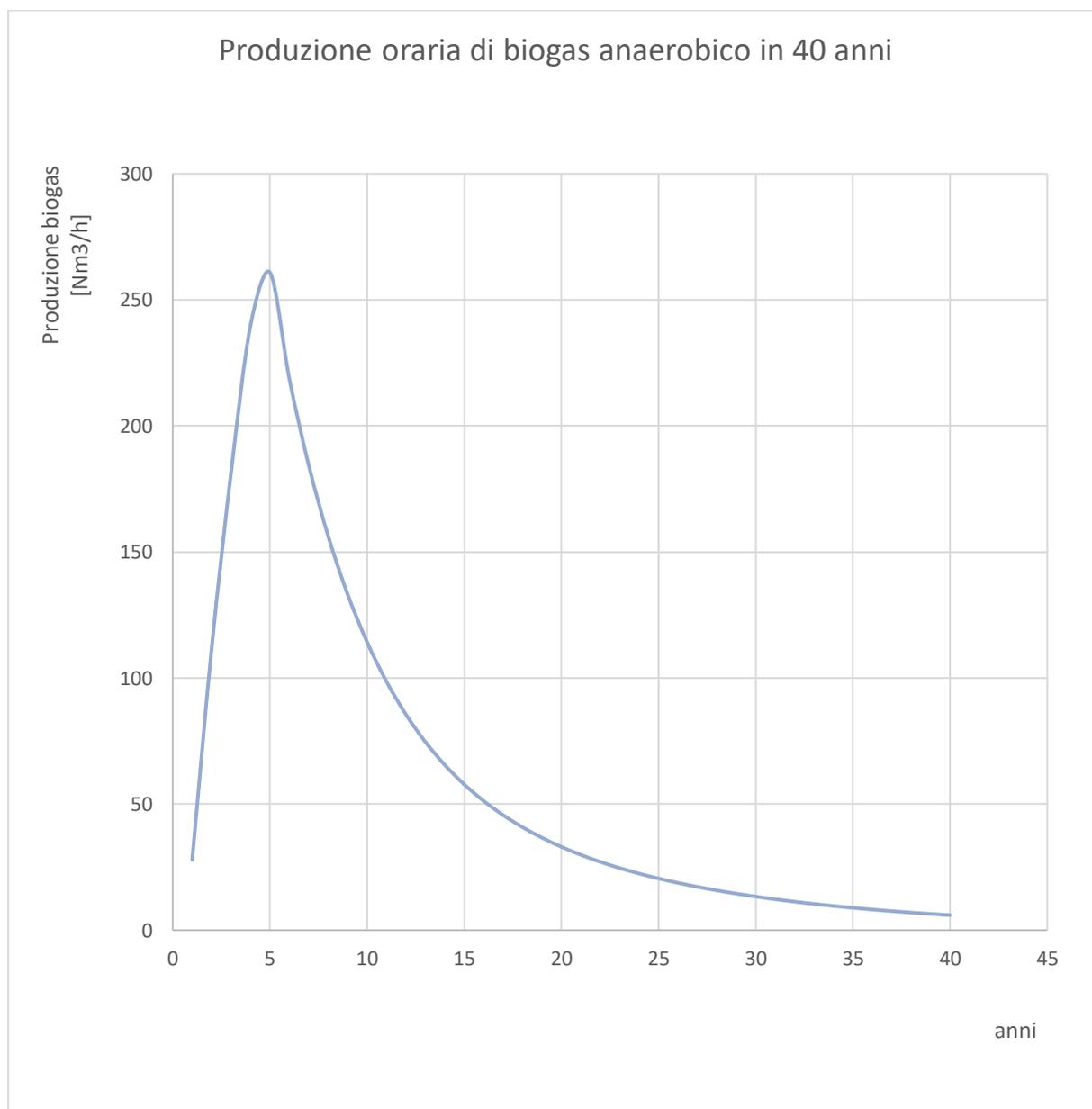
**Tabella 4.03: risultati del modello BIO-5, tempi di semitrasformazione, produzione specifica totale teorica ed effettiva, produzione progressiva**

T	PRODUZIONE SPECIFICA		COEFFICIENTE PRODUZIONE = $K_p$ <b>96,00%</b>		
	RVP	RLP	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE CORRETTA DAL COEFFICIENTE DI PRODUZIONE	
	Tempo Semitrasformazione				
	3,00	9,00	$g1 + g2 = Gt$	$Gt * Kp = Ge$ (progressiva)	
g1	g2				
anni	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t
1	1,50	0,62	2,12	2,04	2,04
2	4,50	1,87	6,37	6,11	8,15
3	3,57	1,73	5,30	5,09	13,24
4	2,84	1,60	4,44	4,26	17,50
5	2,25	1,48	3,73	3,58	21,08
6	1,79	1,37	3,16	3,03	24,12
7	1,42	1,27	2,69	2,58	26,70
8	1,13	1,18	2,30	2,21	28,91
9	0,89	1,09	1,98	1,90	30,81
10	0,71	1,01	1,72	1,65	32,46
11	0,56	0,93	1,50	1,44	33,89
12	0,45	0,86	1,31	1,26	35,15
13	0,35	0,80	1,15	1,11	36,26
14	0,28	0,74	1,02	0,98	37,24
15	0,22	0,69	0,91	0,87	38,12
16	0,18	0,64	0,81	0,78	38,90
17	0,14	0,59	0,73	0,70	39,59
18	0,11	0,54	0,66	0,63	40,22
19	0,09	0,50	0,59	0,57	40,79
20	0,07	0,47	0,54	0,52	41,31
21	0,06	0,43	0,49	0,47	41,78
22	0,04	0,40	0,44	0,43	42,20
23	0,04	0,37	0,41	0,39	42,59
24	0,03	0,34	0,37	0,36	42,95
25	0,02	0,32	0,34	0,33	43,28
26	0,02	0,29	0,31	0,30	43,57
27	0,01	0,27	0,29	0,27	43,85
28	0,01	0,25	0,26	0,25	44,10
29	0,01	0,23	0,24	0,23	44,33
30	0,01	0,22	0,22	0,21	44,55
31	0,01	0,20	0,21	0,20	44,75
32	0,00	0,19	0,19	0,18	44,93
33	0,00	0,17	0,17	0,17	45,10
34	0,00	0,16	0,16	0,16	45,25
35	0,00	0,15	0,15	0,14	45,39
36	0,00	0,14	0,14	0,13	45,53
37	0,00	0,13	0,13	0,12	45,65
38	0,00	0,12	0,12	0,11	45,76
39	0,00	0,11	0,11	0,10	45,87
40	0,00	0,10	0,10	0,10	<b>45,96</b>

**Tabella 4.04: risultati modello BIO-5, produzione annua, oraria, captabile, potenze equivalenti ed energie annue**

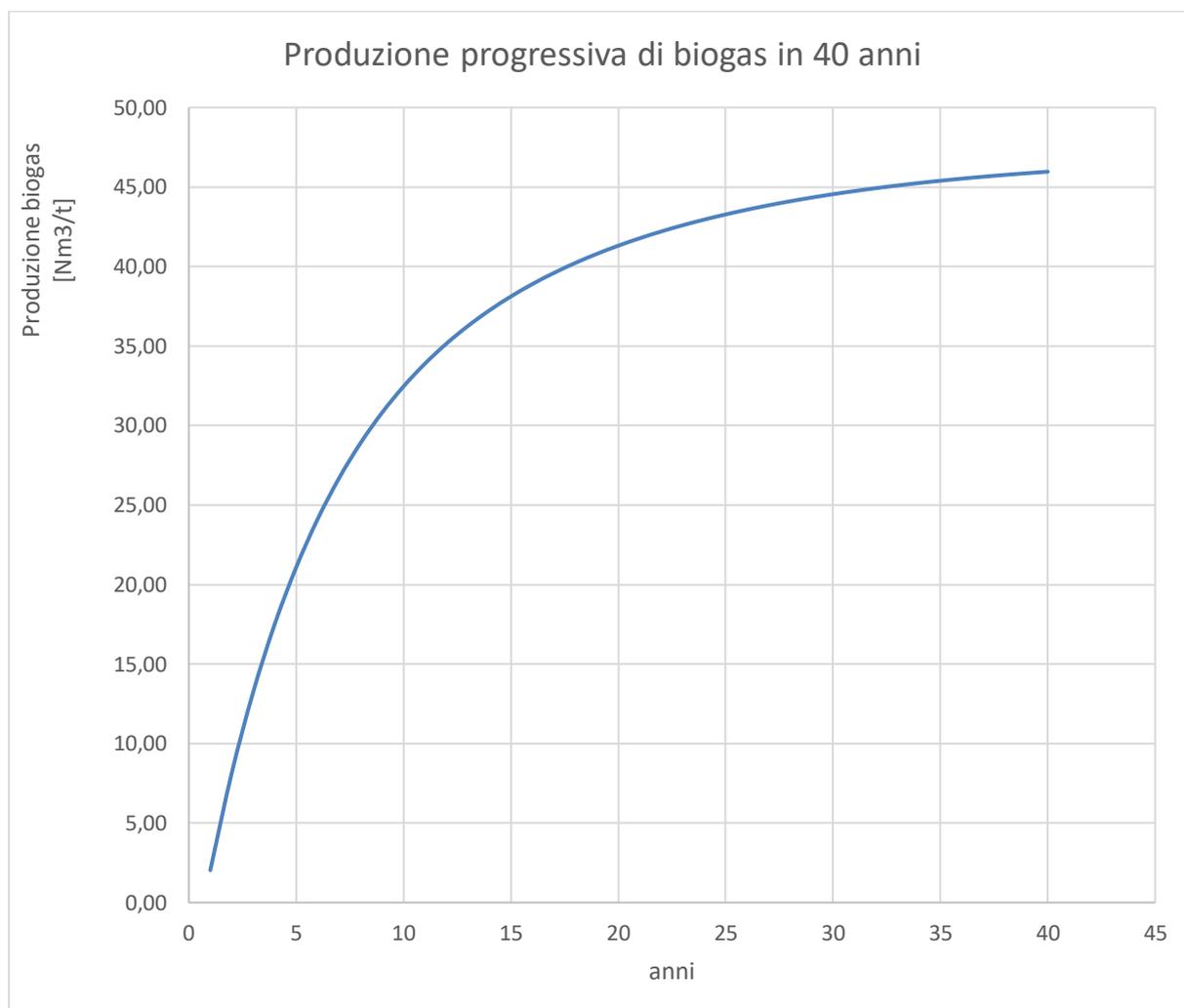
1° ANNO <b>1</b>	N° ANNI <b>31</b>	PRODUZIONE TEORICA			COEFFICIENTE CAPTAZIONE = Kc <b>78,18%</b>			POTENZA EQUIVALENTE		ENERGIA ANNUA
		PROD. ANNUA CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. PROG. CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. ORARIA CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 40%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 30%	LORDA al netto rese	NETTA rendimento	
CRONO SCARICO RIFIUTI	SCARICO ANNUO RIFIUTI	CH <sub>i</sub> = 50%	CH <sub>i</sub> = 50%	CH <sub>i</sub> = 50%	CH <sub>i</sub> = 50%	CH <sub>i</sub> = 40%	CH <sub>i</sub> = 30%		<b>38,00%</b>	ore annue lavoro
<i>tn</i>	<i>Qn</i>	<i>Pna</i>	<i>(progressiva)</i>	<i>Pnh</i>	<i>Pnh * Kc = Pc</i>	<i>Pc + 20%</i>	<i>Pc + 40%</i>	<i>P l</i>	<i>P n</i>	<i>E</i>
anni	t / anno	Nm <sup>3</sup> / anno	Nm <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	kW	kW	MWh
1	120.000	244.576	2,446E+05	28	22	26	31	105	40	298
2	120.000	978.304	1,223E+06	112	87	105	122	418	159	1.192
3	120.000	1.589.084	2,812E+06	181	142	170	199	679	258	1.936
4	120.000	2.100.174	4,912E+06	240	187	225	262	898	341	2.559
5	0	2.285.613	7,198E+06	261	204	245	286	977	371	2.784
6	0	1.915.746	9,113E+06	219	171	205	239	819	311	2.334
7	0	1.614.647	1,073E+07	184	144	173	202	690	262	1.967
8	0	1.368.688	1,210E+07	156	122	147	171	585	222	1.667
9	0	1.167.011	1,326E+07	133	104	125	146	499	190	1.422
10	0	1.000.959	1,426E+07	114	89	107	125	428	163	1.219
11	0	863.626	1,513E+07	99	77	92	108	369	140	1.052
12	0	749.498	1,588E+07	86	67	80	94	320	122	913
13	0	654.168	1,653E+07	75	58	70	82	280	106	797
14	0	574.109	1,711E+07	66	51	61	72	245	93	699
15	0	506.498	1,761E+07	58	45	54	63	217	82	617
16	0	449.067	1,806E+07	51	40	48	56	192	73	547
17	0	399.995	1,846E+07	46	36	43	50	171	65	487
18	0	357.818	1,882E+07	41	32	38	45	153	58	436
19	0	321.351	1,914E+07	37	29	34	40	137	52	391
20	0	289.639	1,943E+07	33	26	31	36	124	47	353
21	0	261.905	1,969E+07	30	23	28	33	112	43	319
22	0	237.520	1,993E+07	27	21	25	30	102	39	289
23	0	215.967	2,015E+07	25	19	23	27	92	35	263
24	0	196.827	2,034E+07	22	18	21	25	84	32	240
25	0	179.751	2,052E+07	21	16	19	22	77	29	219
26	0	164.454	2,069E+07	19	15	18	21	70	27	200
27	0	150.698	2,084E+07	17	13	16	19	64	24	184
28	0	138.284	2,098E+07	16	12	15	17	59	22	168
29	0	127.048	2,110E+07	15	11	14	16	54	21	155
30	0	116.847	2,122E+07	13	10	13	15	50	19	142
31	0	107.564	2,133E+07	12	10	12	13	46	17	131
32	0	99.098	2,143E+07	11	9	11	12	42	16	121
33	0	91.361	2,152E+07	10	8	10	11	39	15	111
34	0	84.278	2,160E+07	10	8	9	11	36	14	103
35	0	77.784	2,168E+07	9	7	8	10	33	13	95
36	0	71.823	2,175E+07	8	6	8	9	31	12	87
37	0	66.343	2,182E+07	8	6	7	8	28	11	81
38	0	61.302	2,188E+07	7	5	7	8	26	10	75
39	0	56.660	2,194E+07	6	5	6	7	24	9	69
40	0	52.383	2,199E+07	6	5	6	7	22	9	64

In figura 4.01 è mostrato l'andamento della produzione oraria di biogas in 40 anni:



**Figura 4.01: gestione anaerobica, produzione oraria di biogas nei 40 anni di vita della discarica**

In figura 4.02 si può osservare l'andamento progressivo della produzione:



**Figura 4.02: gestione anaerobica, produzione progressiva di biogas nei 40 anni di vita della discarica**

La figura 4.01 mostra che il picco di produzione è intorno all'ottavo/nono anno, seguita da una drastica decrescita negli anni seguenti.

Il biogas anaerobico è ricco in  $\text{CH}_4$ , circa al 50% (valore standard considerato dal modello), mentre il rimanente 50% è  $\text{CO}_2$ . Il modello di calcolo fornisce la valutazione del biogas producibile (nelle caratteristiche precedentemente descritte) come pari a  $36,82 \text{ Nm}^3/\text{tRS}$ , considerando anche il fattore  $K_{ud}$  (umidità al 50%,  $K_{ud} = 0,98$ ). Il dato ottenuto è però basato su criteri analitici indipendenti da condizioni effettive, ambientali e tipiche della discarica all'interno della quale avverranno le diverse tipologie di fenomeni fermentativi, in pratica lo stesso rifiuto smaltito in discariche di diversa forma, tipologia costruttiva, gestionale e localizzazione geografica ed ambientale è in grado di produrre differenti quantità di biogas. Il modello inoltre ha elaborato un coefficiente di produzione  $K_p$  della discarica, basato sulle informazioni di input e valutazioni soggettive precedentemente elencate, e tale valore corrisponde a 96%. Conseguo che la produttività specifica si stima essere  $35,34 \text{ Nm}^3/\text{tRS}$ . Il coefficiente di captabilità  $K_c$ , pari a 78,18%, abbassa ulteriormente la stima a  $27,63 \text{ Nm}^3/\text{tRS}$ . Va tenuto conto quindi che il biogas effettivamente prodotto è maggiore di 1,279 volte circa di quello captato. La produzione progressiva complessiva dopo 40 anni consta di  $45,96 \text{ Nm}^3/\text{tRS}$ ,

mentre dopo 15 anni si stimano già 38,12 Nm<sup>3</sup>/tRS, si può dedurre quindi che al decimo anno l'83% del fenomeno fermentativo si sia già concluso. Questa velocità, nonostante il fenomeno anaerobico sia più lento di quello aerobico, dimostra come la scelta peculiare dei tipi di rifiuti (frazione putrescibile complessiva stimata del 12%) giochi un ruolo importante, tuttavia le potenziali emissioni residue dopo i 30 anni allontanano dall'obiettivo di sostenibilità ambientale espresso nel capitolo 1.

Potenza equivalente lorda [MWh]	Potenza equivalente netta [MWh], rendimento = 38%	Energia annua [MWh]
82338	31288	26788

Il biogas anaerobico, poiché ricco in metano, può essere eventualmente recuperato per via del suo contenuto energetico. Il potere calorifico del CH<sub>4</sub> ha stime molto diverse a seconda della fonte a cui si fa riferimento, in questo caso si può attribuire il valore di 4,79 kWh, cioè 17267 kJ per LFG<sub>50</sub> (biogas con metano al 50%), la scelta effettuata costituisce un approccio prudentiale per la valutazione energetica. Il rendimento più elevato si ottiene con la combustione diretta, si può arrivare a valori del 85-90% rispetto all'energia chimica (potere calorifico). Se invece, come in tabella, si considera la trasformazione dell'energia chimica in meccanica e poi in elettrica il rendimento è drasticamente più basso, può assumere valori tra il 30% e il 40%. In valore stimato dal modello ricade in questo range. E' possibile inoltre la cogenerazione, producendo sia calore che energia elettrica. L'uso per autotrazione comporta invece problemi essenzialmente per due motivi: la rimozione della CO<sub>2</sub> per ridurre i costi di compressione e l'utilizzo di macchine ad elevate prestazioni per comprimere il metano, per questi motivi l'uso del biogas come carburante per veicoli è poco utilizzato. Il modello riporta una valutazione complessiva e ricava l'energia annua ottenibile, che assume il valore di 26788 MWh, cioè 2,6788 · 10<sup>10</sup> kWh, che si colloca nel range tra GWh (10<sup>9</sup> kWh, consumo energetico annuo tipico di una famiglia) e TWh (10<sup>12</sup> kWh, energia prodotta da una centrale elettrica). Si può concludere che il valore energetico del biogas compensi il fabbisogno energetico di una piccola azienda, in linea di massima, ma che il contenuto energetico sia comunque inferiore a quello erogato da una centrale elettrica, quindi non può soddisfarne interamente le esigenze, anche se può comunque ridurre il consumo di combustibile fossile.

Come accennato precedentemente, la produzione di biogas si basa su molteplici variabili, talvolta imposte in maniera quasi arbitraria, ne consegue che l'attendibilità dei risultati dipende da quella dei parametri di progetto inseriti, che spesso risultano come valutazioni soggettive basate sull'esperienza. Al fine di ampliare la valutazione ad una casistica di scenari possibili più ampia, si effettua un'analisi in chiave probabilistica di due casi limite:

**Best case:** prospezione caratterizzata da valori ottimistici a tutte le variabili soggette ad incertezza;

**Worst case:** prospezione caratterizzata da valori pessimistici a tutte le variabili soggette ad incertezza;

E' necessario premettere quali siano i criteri che permettono di delineare un worst case ed un best case, per capire come i valori assegnati alle variabili rientrino in una delle due casistiche. Più volte si è ribadito il concetto di sostenibilità ambientale ovvero **“Una discarica può essere definita sostenibile se raggiunge l'equilibrio ambientale nel tempo di una generazione, cioè 30-40 anni”**, quindi un worst case è associato al caso peggiore che renderebbe più difficoltoso il raggiungimento di questo obiettivo, viceversa il best case. Per essere più chiari, ai fini della sostenibilità ambientale, non è così rilevante che la produzione di biogas sia elevata nei primi anni di post-gestione, poiché i sistemi di captazione e di trattamento o recupero del biogas, se ben progettati e dimensionati, garantiscono che non vi siano emissioni che impattino

sull'ambiente circostante. Assai più gravose invece, risultano eventuali emissioni dopo il periodo di post-gestione, poiché non sono più un onere attribuibile al gestore ma agli organi pubblici competenti, ciò può diventare un problema nel momento in cui i sistemi di protezione (barriere di confinamento) si deteriorano, provocando quindi fenomeni di rilasci incontrollati di queste emissioni residue, con impatto negativo sull'ambiente. L'obiettivo quindi risulta chiaro: la quantità di biogas prodotto va massimizzata in ogni caso nei primi anni di gestione passiva, a carico del gestore e con apparecchiature e protezioni nuove ed efficienti, in modo che le emissioni siano controllate e si esauriscano nei tempi previsti dal criterio di sostenibilità. In questo modo, anche un inesorabile deterioramento dei sistemi di raccolta e protezione non avrebbe alcuna conseguenza impattante sull'ambiente, perché nel momento del deterioramento non vi sono più emissioni, la massa rifiuti risulta già "inertizzata". Il best case per la gestione anaerobica si associa quindi ad una cinetica di reazione più veloce, conseguenza di un valore di umidità più alto ( $k_{ud} = 70\%$ ) del valore standard ( $k_{ud} = 50\%$ ), che porta ad un esaurimento delle reazioni di fermentazione più rapido. Un worst case invece è associato ad un'umidità più bassa ( $k_{ud} = 35\%$ ), quindi i tempi in cui il fenomeno produttivo si sviluppa sono più lunghi e meno conformi al raggiungimento dell'obiettivo di sostenibilità.

In un possibile worst case l'umidità assume valori bassi, in tabella 4.05 si considera un fattore  $k_{ud}$  del 35%:

**Tabella 4.05: parametri worst case per gestione anaerobica**

<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	55,00%	70,00%	45,00%	0,72%	0,50%
MR2	residui giardino	0,80%	50,00%	70,00%	45,00%	0,19%	0,13%
MR3	carta e cartone	6,40%	50,00%	60,00%	8,00%	1,88%	1,37%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	50,00%	20,00%	10,00%	0,09%	0,06%
MR5	legno	0,80%	50,00%	50,00%	20,00%	0,20%	0,12%
MR6	plastica e gomma	0,00%	70,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
Totale		<b>100,00%</b>					

<b>FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)</b>	<b>35</b>	%
---	-----------	---

Mentre un best case si considera un valore di umidità raddoppiato, ovvero del 70% (tabella 4.06) la cinetica sarà più veloce e la produzione in 40 anni maggiore:

**Tabella 4.06: parametri best case per gestione anaerobica**

<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	55,00%	70,00%	45,00%	0,64%	0,44%
MR2	residui giardino	0,80%	50,00%	70,00%	45,00%	0,12%	0,08%
MR3	carta e cartone	6,40%	50,00%	60,00%	8,00%	1,66%	1,21%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	50,00%	20,00%	10,00%	0,05%	0,04%
MR5	legno	0,80%	50,00%	50,00%	20,00%	0,12%	0,07%
MR6	plastica e gomma	0,00%	70,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
Totale		<b>100,00%</b>					

**FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)****70**

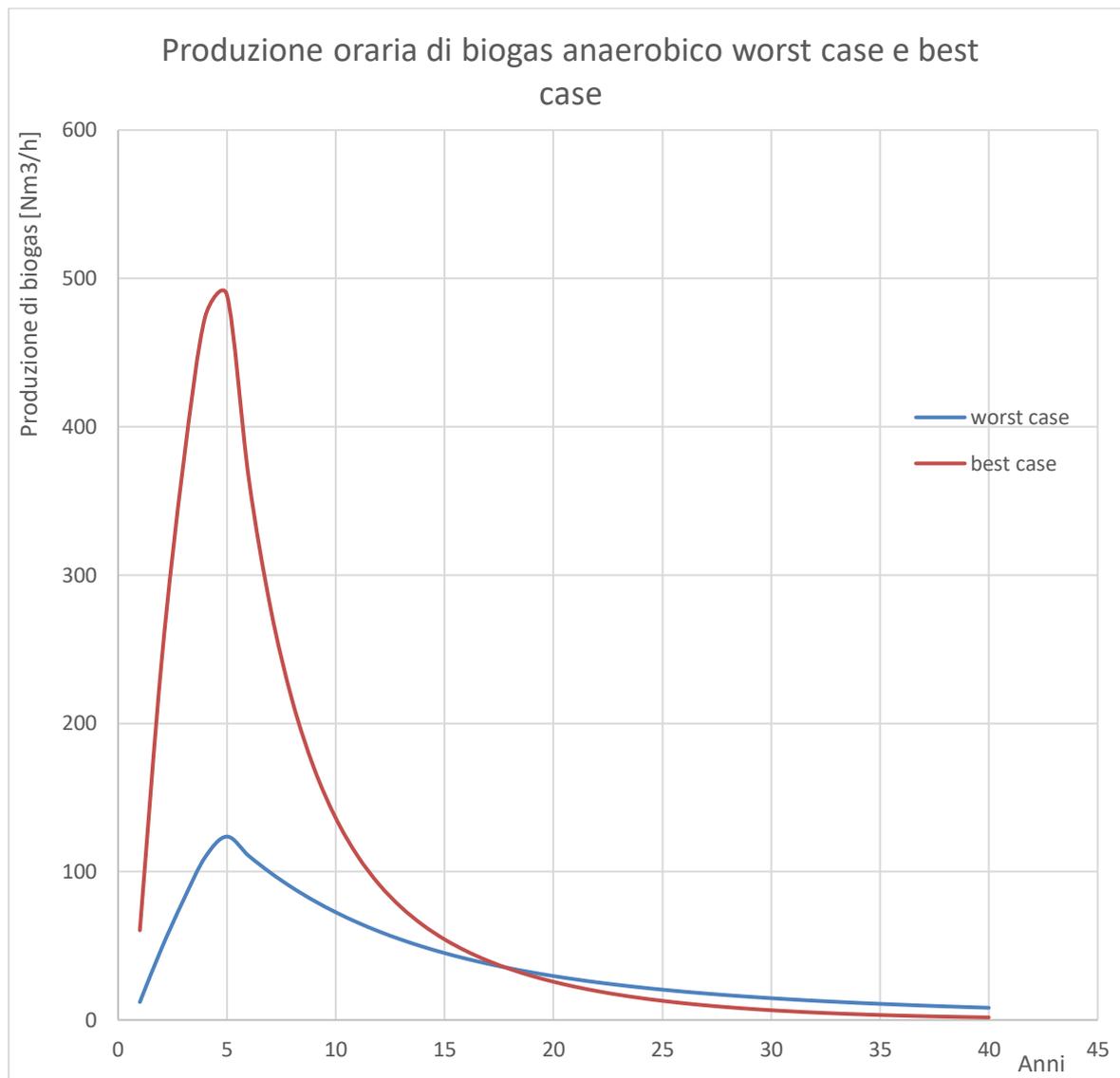
%

In tabella 4.07 sono elencati i valori di produzione oraria per i 40 anni di vita della discarica per un worst case e un best case:

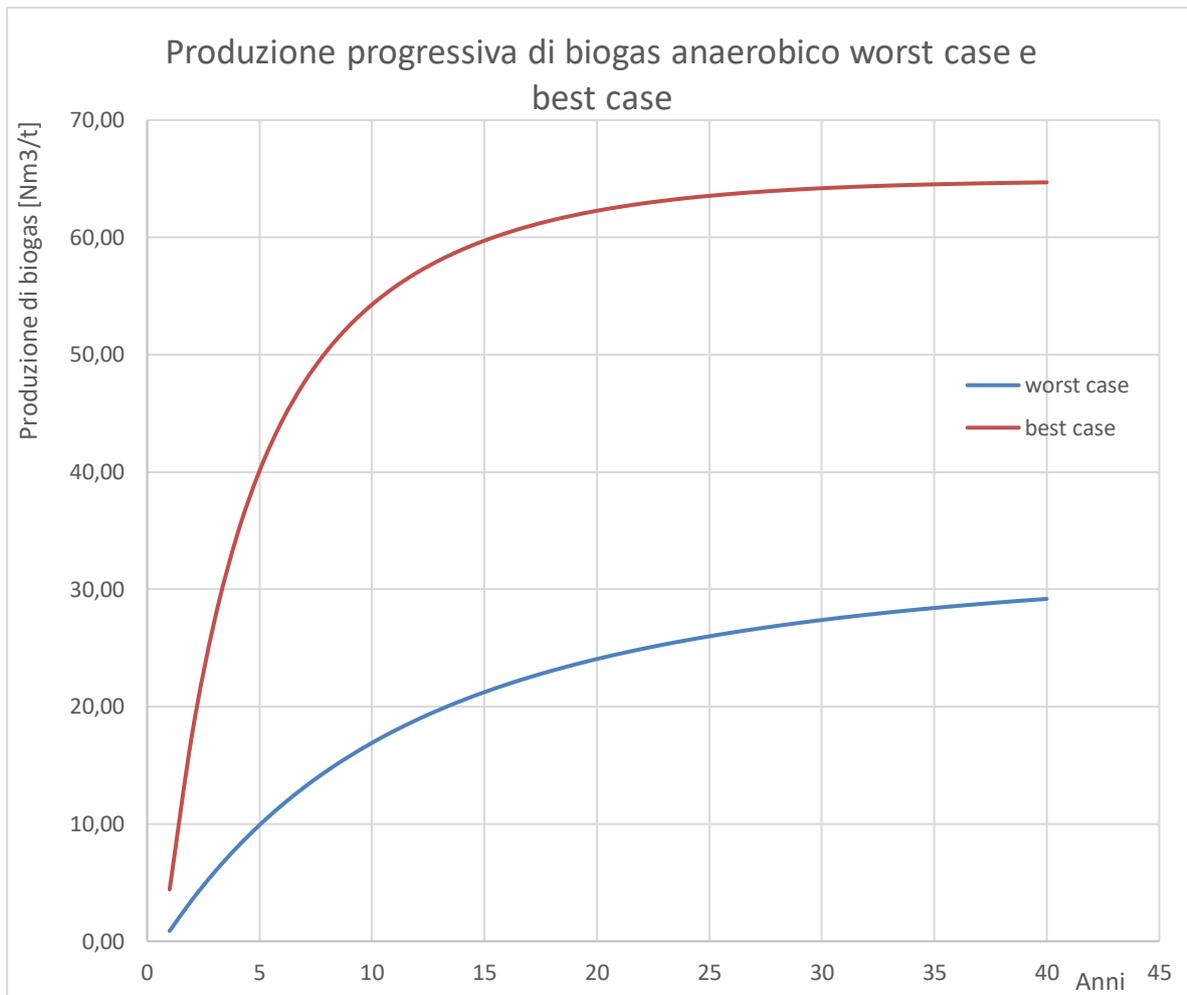
**Tabella 4.07: confronto best case-worst case per la gestione anaerobica**

Anni	Produzione oraria [Nm <sup>3</sup> /h]		Produzione progressiva [Nm <sup>3</sup> /t]	
	Worst Case	Best case	Worst case	Best case
1	12	60	0,88	4,42
2	48	242	3,53	17,66
3	81	375	5,90	27,37
4	110	474	8,01	34,61
5	124	489	9,91	40,10
6	111	366	11,61	44,34
7	99	278	13,15	47,68
8	89	215	14,53	50,34
9	80	170	15,78	52,50
10	73	136	16,92	54,28
11	66	111	17,95	55,76
12	60	91	18,88	57,00
13	54	76	19,74	58,05
14	49	64	20,52	58,95
15	45	54	21,24	59,73
16	41	46	21,90	60,39
17	38	40	22,50	60,96
18	35	34	23,06	61,46
19	32	30	23,58	61,90
20	30	26	24,06	62,27
21	27	22	24,51	62,60
22	25	19	24,92	62,89
23	24	17	25,30	63,14
24	22	15	25,66	63,35
25	20	13	26,00	63,54
26	19	11	26,31	63,71
27	18	10	26,61	63,86
28	17	9	26,88	63,98
29	16	8	27,14	64,09
30	15	7	27,39	64,19
31	14	6	27,62	64,28
32	13	5	27,83	64,35
33	12	4	28,04	64,41
34	12	4	28,23	64,47
35	11	3	28,41	64,52
36	10	3	28,58	64,56
37	10	3	28,75	64,60
38	9	2	28,90	64,64
39	9	2	29,05	64,67
40	8	2	29,19	64,69

In figura 4.03 è rappresentato il confronto tra le produzioni orarie best case-worst case per la gestione anaerobica, in figura 4.04 il confronto tra le produzioni progressive:



**Figura 4.03: gestione anaerobica, produzione oraria di biogas, curve best case e worst case per la gestione anaerobica**



**Figura 4.04: gestione anaerobica produzione progressiva di biogas, curve best case e worst case per la gestione anaerobica**

Il best case ha un picco di produzione di biogas molto più elevato rispetto al worst case (figura 4.03), per via del fattore umidità, che contribuisce positivamente alle reazioni di fermentazione, inoltre le emissioni residue verso i 40 anni sono circa 1/3 di quelle del worst case, risultano quindi meno impattanti sull'ambiente a lungo termine. In termini di produzione totale, il biogas prodotto risulta è più del doppio nel best case rispetto al worst case (figura 4.04), quindi per ottimizzare il recupero energetico ridurre al minimo le emissioni è necessario monitorare i livelli di umidità e mantenerli al valore desiderato.

### 4.1.3 Gestione aerobica

I conferimenti, i fattori che influiscono sulla produzione e captabilità di biogas sono gli stessi di prima, ma siccome il modello BIO-5 non considera l'opzione di gestione aerobica (essendo una modalità di discarica controllata innovativa) come dato di input diretto, è necessario specificare come imporre un ambiente aerobico. Di fatto, bisogna intervenire sui dati input evidenziati in tabella 4.08:

**Tabella 4.08: parametri di simulazione della gestione aerobica**

<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	<b>18,15%</b>	<b>35,00%</b>	45,00%	0,11%	0,08%
MR2	residui giardino	0,80%	<b>16,50%</b>	<b>35,00%</b>	45,00%	0,03%	0,02%
MR3	carta e cartone	6,40%	<b>16,50%</b>	<b>30,00%</b>	8,00%	0,29%	0,21%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	<b>16,50%</b>	<b>10,00%</b>	10,00%	0,01%	0,01%
MR5	legno	0,80%	<b>16,50%</b>	<b>25,00%</b>	20,00%	0,03%	0,02%
MR6	plastica e gomma	0,00%	<b>23,10%</b>	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
Totale		<b>100,00%</b>					
<b>FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)</b>			<b>50</b>	%	<b>fattore modificato</b>		

La gestione aerobica di una discarica equivale ad un trattamento aerobico che riduce la frazione di carbonio organico biodegradabile e biogassificabile presente nei rifiuti. Sulla base dell'esperienza si può ipotizzare una riduzione dei 2/3 di C organico, quindi del 50% della frazione organica degradabile biologicamente. La quantità d'aria che deve essere inserita è correlata al flusso di biogas prodotto, attraverso un coefficiente moltiplicativo arbitrario pari a 4 (il valore elevato di aria è motivato dall'obiettivo di imporre un trattamento aerobico il più vicino possibile al caso ideale, ovvero al 100%). Si ottengono i risultati nelle tabelle 4.09, 4.10 e 4.11:

**Tabella 4.09: risultati di prospezione per la gestione aerobica del modello BIO-5**

<b>BIO-5</b>		<i>elaborato da Enrico Magnano (*)</i>		<i>Risultati prospezione</i>
impianto:		La Filippa 2.0		data: 16-ott-19
<b>Parametro calcolato</b>	<b>sigla</b>	<b>risultato</b>	<b>unità misura</b>	
Percentuale rifiuti velocemente putrescibili	RVP	<b>4,00%</b>		
Percentuale rifiuti lentamente putrescibili	RLP	<b>8,00%</b>		
Percentuale rifiuti non putrescibili	RNP	<b>88,00%</b>		
Percentuale rifiuti putrescibili	RP	<b>12,00%</b>		
Carbonio biodegradabile	C <sub>org</sub>	<b>4,67</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile	C <sub>bio</sub>	<b>3,32</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile RVP	C <sub>bio</sub> RVP	<b>0,96</b>	kg / t RS	
Carbonio biogassificabile RLP	C <sub>bio</sub> RLP	<b>2,36</b>	kg / t RS	
Biogas producibile	LFG <sub>50</sub>	<b>6,21</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Fattore di correzione in funzione dell'umidità	Kud	<b>0,98</b>		
Biogas producibile considerato il fattore Kud	Ptu	<b>6,07</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile considerato il fattore Kud RVP	Ptu RVP	<b>1,76</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile considerato il fattore Kud RLP	Ptu RLP	<b>4,32</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Coefficiente di regressione della curva RVP	Kr RVP	<b>0,79370</b>		
Coefficiente di regressione della curva RLP	Kr RLP	<b>0,92587</b>		
Coefficiente cinetico RVP	Ki RVP	<b>0,23105</b>		
Coefficiente cinetico RLP	Ki RLP	<b>0,07702</b>		
Tempo di semitrasformazione RVP	Ts RVP	<b>3,00000</b>	anni	
Tempo di semitrasformazione RLP	Ts RLP	<b>9,00001</b>	anni	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni	Ptu 40	<b>7,90</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RVP	Ptu 40 RVP	<b>3,85</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RLP	Ptu 40 RLP	<b>4,05</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni		<b>3.628.097</b>	Nm <sup>3</sup>	
Coefficiente di produzione Kp	Kp	<b>96,00%</b>		
Biogas producibile con fattore Kp	Ptu Kp	<b>5,83</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas producibile nell'arco di 40 anni con fattore Kp	Ptu Kp 40	<b>0,08</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Coefficiente di captabilità Kc	Kc	<b>78,18%</b>		
Biogas captabile con fattore Kc	Ptu Kc	<b>4,56</b>	Nm <sup>3</sup> / t RS	
Biogas captabile nell'arco di 40 anni		<b>2.836.265</b>	Nm <sup>3</sup>	
Primo anno di conferimento		<b>1</b>		
Numero anni di conferimento		<b>4</b>	anni	
Totale rifiuti conferiti		<b>480.000</b>	t RS	

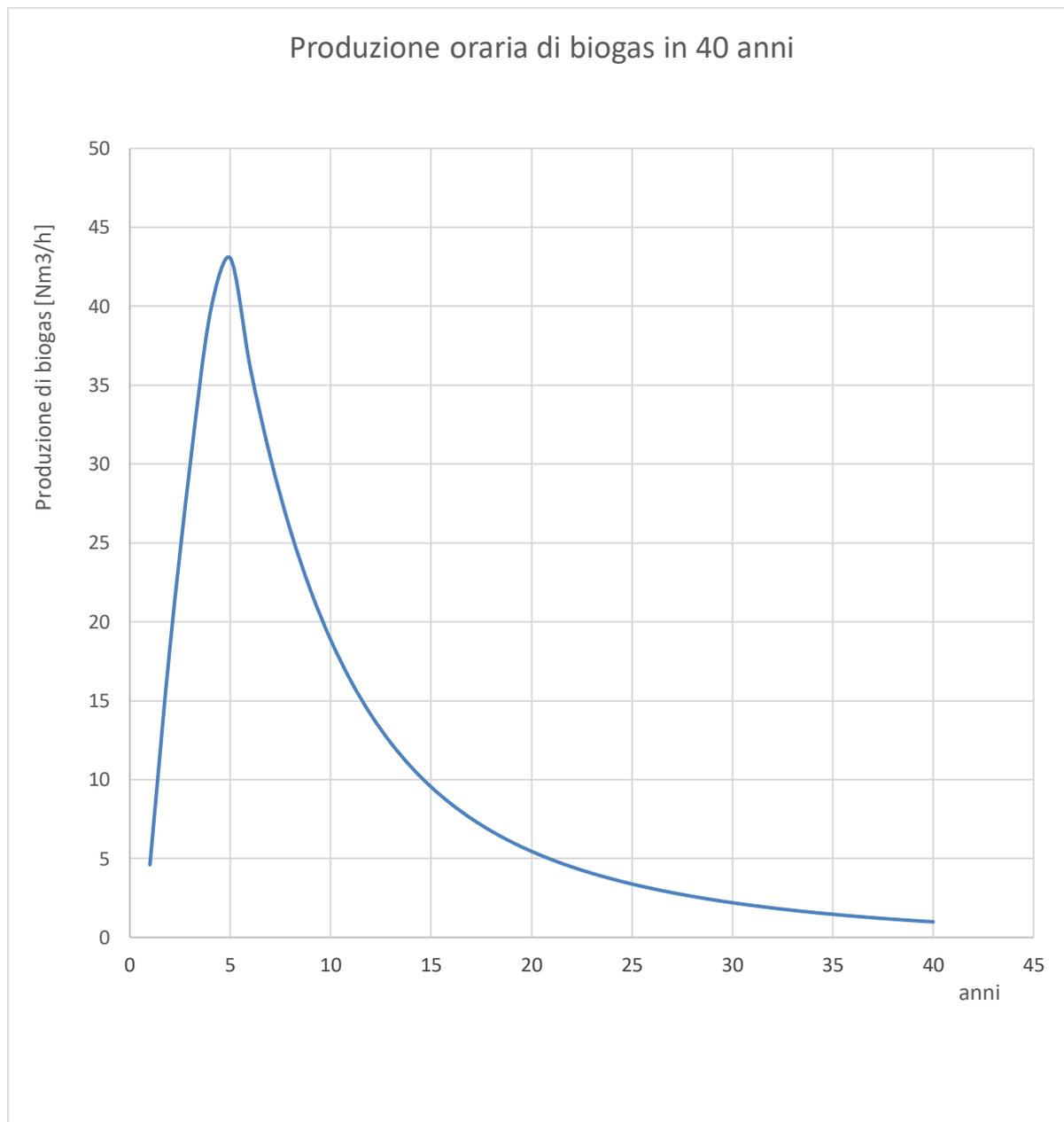
**Tabella 4.10: risultati del modello BIO-5, tempi di semitrasformazione, produzione specifica totale teorica ed effettiva, produzione progressiva**

T	PRODUZIONE SPECIFICA		COEFFICIENTE PRODUZIONE = $Kp$ <b>96,00%</b>		
	RVP	RLP	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE CORRETTA DAL COEFFICIENTE DI PRODUZIONE	
	Tempo Semitrasformazione				
	3,00	9,00	$g1 + g2 = Gt$	$Gt * Kp = Ge$ (progressiva)	
	$g1$	$g2$			
anni	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t/anno	Nm <sup>3</sup> /t
1	0,25	0,10	0,35	0,34	0,34
2	0,74	0,31	1,05	1,01	1,35
3	0,59	0,29	0,87	0,84	2,18
4	0,47	0,26	0,73	0,70	2,89
5	0,37	0,24	0,62	0,59	3,48
6	0,29	0,23	0,52	0,50	3,98
7	0,23	0,21	0,44	0,43	4,41
8	0,19	0,19	0,38	0,36	4,77
9	0,15	0,18	0,33	0,31	5,08
10	0,12	0,17	0,28	0,27	5,36
11	0,09	0,15	0,25	0,24	5,59
12	0,07	0,14	0,22	0,21	5,80
13	0,06	0,13	0,19	0,18	5,98
14	0,05	0,12	0,17	0,16	6,15
15	0,04	0,11	0,15	0,14	6,29
16	0,03	0,10	0,13	0,13	6,42
17	0,02	0,10	0,12	0,12	6,53
18	0,02	0,09	0,11	0,10	6,64
19	0,01	0,08	0,10	0,09	6,73
20	0,01	0,08	0,09	0,09	6,82
21	0,01	0,07	0,08	0,08	6,89
22	0,01	0,07	0,07	0,07	6,96
23	0,01	0,06	0,07	0,06	7,03
24	0,00	0,06	0,06	0,06	7,09
25	0,00	0,05	0,06	0,05	7,14
26	0,00	0,05	0,05	0,05	7,19
27	0,00	0,04	0,05	0,05	7,24
28	0,00	0,04	0,04	0,04	7,28
29	0,00	0,04	0,04	0,04	7,32
30	0,00	0,04	0,04	0,04	7,35
31	0,00	0,03	0,03	0,03	7,38
32	0,00	0,03	0,03	0,03	7,41
33	0,00	0,03	0,03	0,03	7,44
34	0,00	0,03	0,03	0,03	7,47
35	0,00	0,02	0,02	0,02	7,49
36	0,00	0,02	0,02	0,02	7,51
37	0,00	0,02	0,02	0,02	7,53
38	0,00	0,02	0,02	0,02	7,55
39	0,00	0,02	0,02	0,02	7,57
40	0,00	0,02	0,02	0,02	<b>7,58</b>

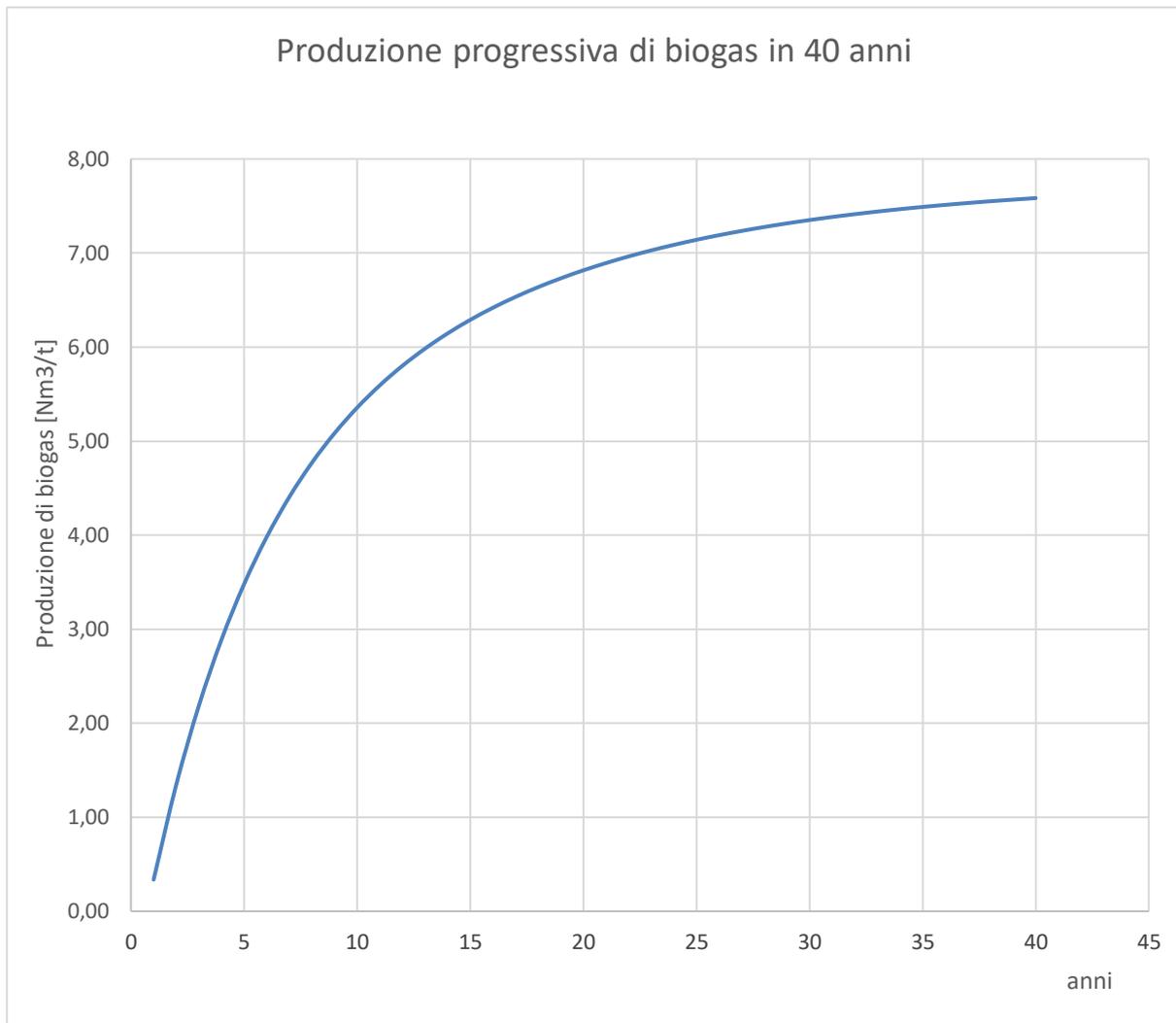
**Tabella 4.11: risultati modello BIO-5, produzione annua, oraria, captabile, potenze equivalenti ed energie annue**

1° ANNO <b>1</b>	N° ANNI <b>31</b>	PRODUZIONE TEORICA			COEFFICIENTE CAPTAZIONE = Kc <b>78,18%</b>			POTENZA EQUIVALENTE		ENERGIA ANNUA
		PROD. ANNUA CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. PROG. CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. ORARIA CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 50%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 40%	PROD. CAPTABILE CH <sub>i</sub> = 30%	LORDA al netto rese	NETTA rendimento	ore annue lavoro
<i>tn</i>	<i>Qn</i>	<i>Pna</i>	( <i>progressiva</i> )	<i>Pnh</i>	<i>Pnh * Kc = Pc</i>	<i>Pc + 20%</i>	<i>Pc + 40%</i>	<i>Pl</i>	<i>Pn</i>	<i>E</i>
anni	t / anno	Nm <sup>3</sup> / anno	Nm <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	Nm <sup>3</sup> / h	kW	kW	MWh
1	120.000	40.355	4,036E+04	5	4	4	5	17	7	49
2	120.000	161.420	2,018E+05	18	14	17	20	69	26	197
3	120.000	262.199	4,640E+05	30	23	28	33	112	43	319
4	120.000	346.529	8,105E+05	40	31	37	43	148	56	422
5	0	377.126	1,188E+06	43	34	40	47	161	61	459
6	0	316.098	1,504E+06	36	28	34	39	135	51	385
7	0	266.417	1,770E+06	30	24	29	33	114	43	325
8	0	225.834	1,996E+06	26	20	24	28	97	37	275
9	0	192.557	2,189E+06	22	17	21	24	82	31	235
10	0	165.158	2,354E+06	19	15	18	21	71	27	201
11	0	142.498	2,496E+06	16	13	15	18	61	23	174
12	0	123.667	2,620E+06	14	11	13	15	53	20	151
13	0	107.938	2,728E+06	12	10	12	13	46	18	131
14	0	94.728	2,823E+06	11	8	10	12	40	15	115
15	0	83.572	2,906E+06	10	7	9	10	36	14	102
16	0	74.096	2,980E+06	8	7	8	9	32	12	90
17	0	65.999	3,046E+06	8	6	7	8	28	11	80
18	0	59.040	3,105E+06	7	5	6	7	25	10	72
19	0	53.023	3,158E+06	6	5	6	7	23	9	65
20	0	47.790	3,206E+06	5	4	5	6	20	8	58
21	0	43.214	3,249E+06	5	4	5	5	18	7	53
22	0	39.191	3,288E+06	4	3	4	5	17	6	48
23	0	35.635	3,324E+06	4	3	4	4	15	6	43
24	0	32.476	3,357E+06	4	3	3	4	14	5	40
25	0	29.659	3,386E+06	3	3	3	4	13	5	36
26	0	27.135	3,413E+06	3	2	3	3	12	4	33
27	0	24.865	3,438E+06	3	2	3	3	11	4	30
28	0	22.817	3,461E+06	3	2	2	3	10	4	28
29	0	20.963	3,482E+06	2	2	2	3	9	3	26
30	0	19.280	3,501E+06	2	2	2	2	8	3	23
31	0	17.748	3,519E+06	2	2	2	2	8	3	22
32	0	16.351	3,535E+06	2	1	2	2	7	3	20
33	0	15.075	3,550E+06	2	1	2	2	6	2	18
34	0	13.906	3,564E+06	2	1	1	2	6	2	17
35	0	12.834	3,577E+06	1	1	1	2	5	2	16
36	0	11.851	3,589E+06	1	1	1	1	5	2	14
37	0	10.947	3,600E+06	1	1	1	1	5	2	13
38	0	10.115	3,610E+06	1	1	1	1	4	2	12
39	0	9.349	3,619E+06	1	1	1	1	4	2	11
40	0	8.643	3,628E+06	1	1	1	1	4	1	11

In figura 4.05 è rappresentata la produzione oraria di biogas in 40 anni per la gestione aerobica, in figura 4.06 la produzione progressiva:



**Figura 4.05: gestione aerobica, produzione oraria di biogas nei 40 anni di vita della discarica, la composizione è considerata dal modello sempre in CH<sub>4</sub> al 50%**



**Figura 4.06: gestione aerobica, produzione progressiva di biogas nei 40 anni di vita della discarica**

Il primo grafico mostra che il picco di produzione è intorno al quarto/quinto anno, seguita da una drastica decrescita negli anni seguenti (figura 4.05).

Il biogas ottenuto ha una composizione differente dal biogas anaerobico tradizionale, infatti il trattamento aerobico nella massa rifiuti ne riduce la quantità di metano presente.

Dopo 15 anni il modello prevede che il fenomeno abbia raggiunto l'83% del suo totale sviluppo, e in figura 4.06 si può osservare l'andamento progressivo della produzione. I parametri cinetici elaborati dal modello vengono rappresentati con il "Tempo di semi-trasformazione", che indica il numero di anni necessari a dimezzare il carico organico potenziale. Per la porzione RVP (rifiuti velocemente putrescibili) il tempo di semi-trasformazione calcolato è pari a 3 anni, mentre per la porzione RLP sale a 9 anni. Il caso in esame considera un fattore  $k_{ud}$  del 50%.

Il processo di fermentazione aerobico riduce drasticamente la presenza di metano, e ciò rende praticamente impossibile, nonché inutile, un'azione di recupero energetico a causa della qualità del gas estratto, composto da metano circa al 2%, anidride carbonica al 23% e dall'aria in eccesso al 75%.

Il Decreto Ministeriale (Min. Ambiente) 05 febbraio 1998 (recupero rifiuti non pericolosi – Testo vigente integrato con il DM 5 aprile 2006 n. 186) identifica la tipologia del biogas destinato al recupero energetico nel seguente modo:

- Tipologia: Biogas [CER 190699].
- Provenienza: Fermentazione anaerobica metanogenica di rifiuti a matrice organica in

- processi da discarica;
- Il gas combustibile deve rientrare nei seguenti limiti:
    - Metano min. 30% vol;
    - H<sub>2</sub>S max 1.5% vol;
    - P.C.I. sul tale quale min 12.500 kJ/Nm<sup>3</sup>;
  - Attività e metodi di recupero: l'utilizzazione del biogas è consentita in impianti di conversione energetica di potenza termica nominale superiore a 0,5 MW.

Si evince con chiarezza che le caratteristiche del biogas aerobico non sono conformi a quanto definito nella definizione del DM, in quanto il tenore di metano estratto dovrebbe essere costantemente inferiore al 30% ed il potere calorifico di tale gas molto inferiore a 12.500 kJ/Nm<sup>3</sup>. Infine la potenza minima “termica” di 500 kW (0,5 MW) indicata dal DM non può essere raggiunta in quanto corrispondente a circa 104 Nm<sup>3</sup>/h di biogas con metano al 50% (P.C.I 4,79 kWh/Nm<sup>3</sup>).

Anche nel caso aerobico possiamo definire un best case e un worst case in maniera del tutto analoga alla gestione anaerobica, ma oltre all’umidità, è possibile anche agire sull’efficienza di aerazione del sistema.

Per il worst case si considera un trattamento aerobico che riduce del 33% il carbonio organico su base secca e del 25% la porzione biodegradabile, come mostrato dai parametri evidenziati in tabella 4.12:

**Tabella 4.12: worst case per la gestione aerobica**

<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	<b>36,30%</b>	<b>52,50%</b>	45,00%	0,14%	0,10%
MR2	residui giardino	0,80%	<b>33,00%</b>	<b>52,50%</b>	45,00%	0,04%	0,03%
MR3	carta e cartone	6,40%	<b>33,00%</b>	<b>45,00%</b>	8,00%	0,34%	0,25%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	<b>33,00%</b>	<b>15,00%</b>	10,00%	0,02%	0,01%
MR5	legno	0,80%	<b>33,00%</b>	<b>37,50%</b>	20,00%	0,04%	0,02%
MR6	plastica e gomma	0,00%	<b>46,20%</b>	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
<b>FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)</b>						<b>35</b>	%

Per il best case si considera un trattamento aerobico che riduce del 99% il carbonio organico su base secca e del 75% la porzione biodegradabile, la tabella 4.13 evidenzia i parametri con cui l’aerazione modifica il sistema:

**Tabella 4.13: best case per la gestione aerobica**

<b>MERCEOLOGIA RIFIUTI</b>		<b>%</b>	<b>Ci</b>	<b>fb</b>	<b>u</b>	<b>C org</b>	<b>C bio</b>
		Valori di default					
MR1	organico - residui alimentari	3,20%	<b>0,55%</b>	<b>17,50%</b>	45,00%	0,09%	0,06%
MR2	residui giardino	0,80%	<b>0,50%</b>	<b>17,50%</b>	45,00%	0,01%	0,01%
MR3	carta e cartone	6,40%	<b>0,50%</b>	<b>15,00%</b>	8,00%	0,25%	0,18%
MR4	tessili e cuoio	0,80%	<b>0,50%</b>	<b>5,00%</b>	10,00%	0,01%	0,00%
MR5	legno	0,80%	<b>0,50%</b>	<b>12,50%</b>	20,00%	0,01%	0,01%
MR6	plastica e gomma	0,00%	<b>0,70%</b>	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	88,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	0,00%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%

**FATTORE UMIDITA' DISCARICA (Kud)****70**

%

In tabella 4.14 vi sono i risultati per il confronto best case- worst case per la gestione aerobica:

**Tabella 4.14: confronto best case-worst case per la gestione aerobica**

Anni	Produzione [Nm <sup>3</sup> /h]	
	Worst Case	Best case
1	6	0
2	24	1
3	40	1
4	54	1
5	61	1
6	55	1
7	49	1
8	44	1
9	40	0
10	36	0
11	33	0
12	30	0
13	27	0
14	24	0
15	22	0
16	20	0
17	19	0
18	17	0
19	16	0
20	15	0
21	14	0
22	13	0
23	12	0
24	11	0
25	10	0
26	9	0
27	9	0
28	8	0
29	8	0
30	7	0
31	7	0
32	6	0
33	6	0
34	6	0
35	5	0
36	5	0
37	5	0
38	5	0
39	4	0
40	4	0

La figura 4.07 mostra l'andamento delle produzioni orarie worst case e best case per la gestione aerobica:



**Figura 4.07: gestione aerobica, produzione oraria, curve worst case e best case**

Nel worst case dopo 40 anni sono presenti ancora emissioni residue, seppur molto basse, mentre per il best case l'efficienza del trattamento aerobico azzerava la quantità di metano prodotto (figura 4.07). È necessario agire quindi sull'umidità e assicurarsi che il fattore  $k_{ud}$  abbia valori preferibilmente non inferiori al 65%, oltre che sull'efficienza di aerazione del sistema, che deve portare almeno alla riduzione dei 2/3 di carbonio organico su base secca del rifiuto, e quindi a dimezzarne la quantità biodegradabile. Il best case è ovviamente un caso ideale, perché le diverse esperienze di aerazione applicate su discariche in vari paesi del mondo dimostrano come sia difficile ottenere un trattamento aerobico del 100%, si suppone quindi che una riduzione dei 2/3 del carbonio organico presente sia già un ottimo traguardo di progettazione.

#### 4.1.4 Confronto tra le produzioni e le qualità di biogas

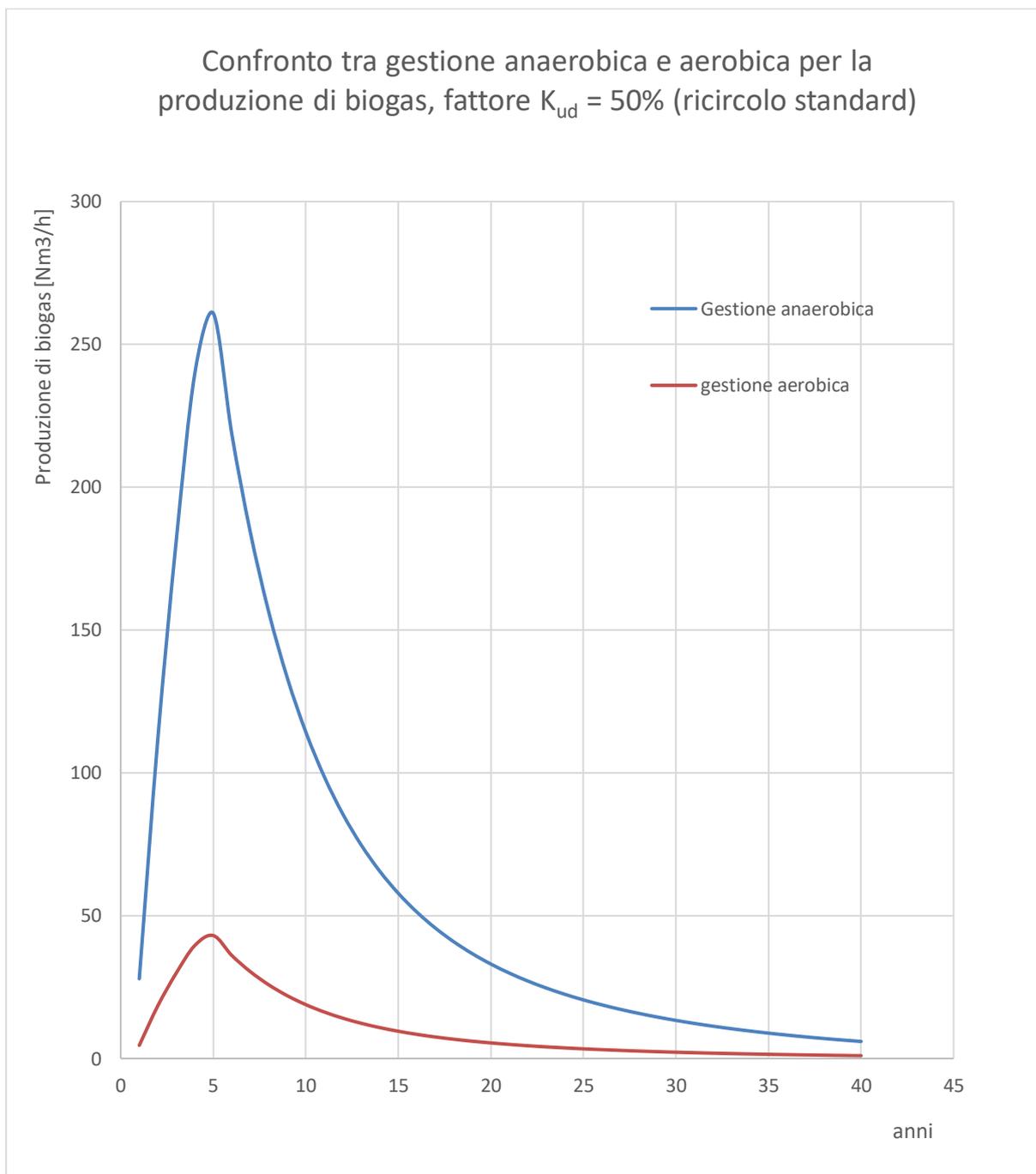
Alla luce dei precedenti risultati, è possibile confrontare in tabella 4.15 le due modalità gestionali in ambito di quantità e qualità di biogas prodotto:

**Tabella 4.15: confronto delle produzioni di biogas tra gestione aerobica ed anaerobica,  $k_{ud} = 50\%$**

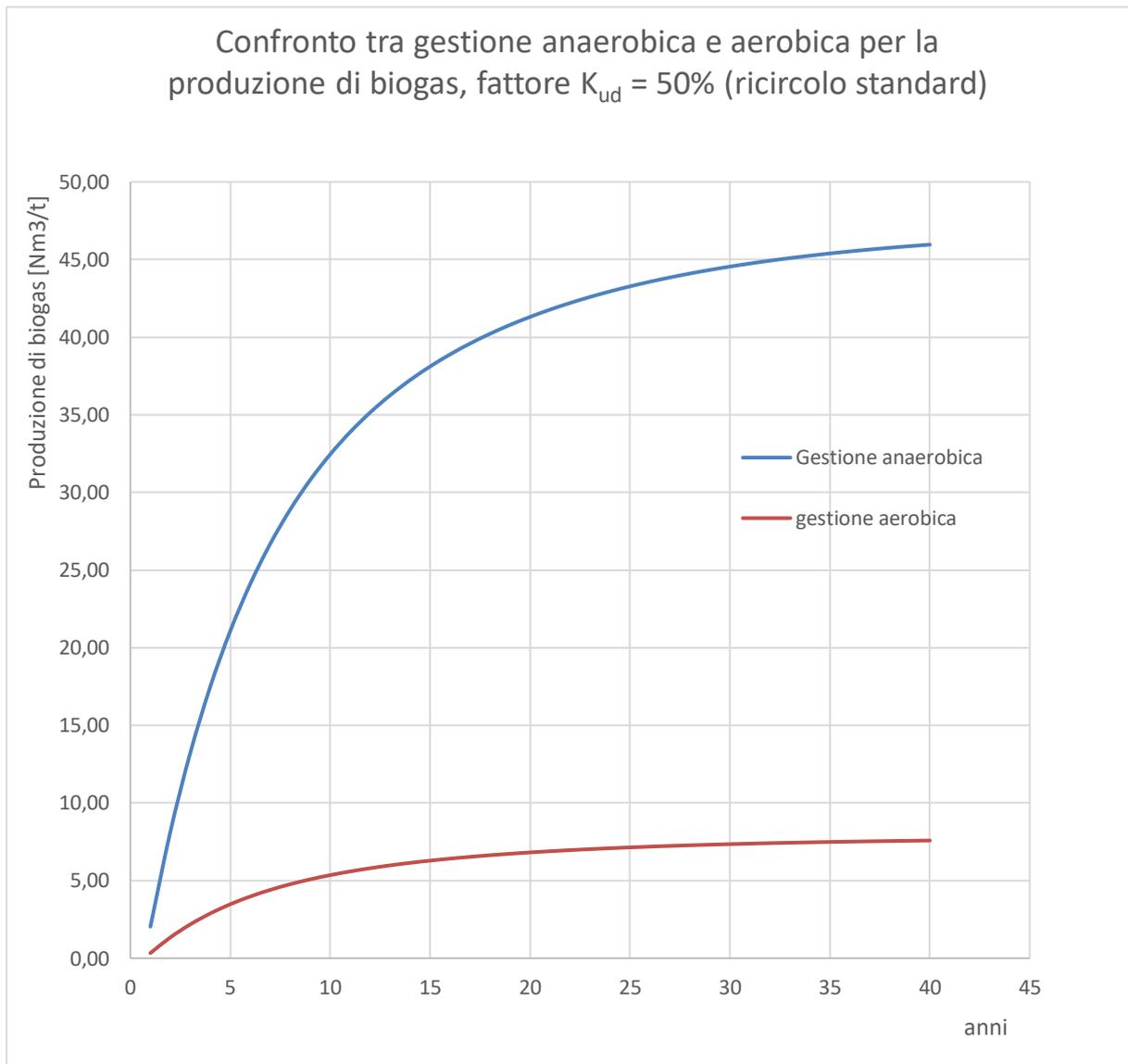
Anni	Produzione oraria di biogas [Nm <sup>3</sup> /h]		Produzione progressiva di biogas [Nm <sup>3</sup> /t]	
	Anaerobico	Aerobico	Anaerobico	Aerobico
1	28	5	2,04	0,34
2	112	18	8,15	1,35
3	181	30	13,24	2,18
4	240	40	17,50	2,89
5	261	43	21,08	3,48
6	219	36	24,12	3,98
7	184	30	26,70	4,41
8	156	26	28,91	4,77
9	133	22	30,81	5,08
10	114	19	32,46	5,36
11	99	16	33,89	5,59
12	86	14	35,15	5,80
13	75	12	36,26	5,98
14	66	11	37,24	6,15
15	58	10	38,12	6,29
16	51	8	38,90	6,42
17	46	8	39,59	6,53
18	41	7	40,22	6,64
19	37	6	40,79	6,73
20	33	5	41,31	6,82
21	30	5	41,78	6,89
22	27	4	42,20	6,96
23	25	4	42,59	7,03
24	22	4	42,95	7,09
25	21	3	43,28	7,14
26	19	3	43,57	7,19
27	17	3	43,85	7,24
28	16	3	44,10	7,28
29	15	2	44,33	7,32
30	13	2	44,55	7,35
31	12	2	44,75	7,38
32	11	2	44,93	7,41
33	10	2	45,10	7,44
34	10	2	45,25	7,47
35	9	1	45,39	7,49
36	8	1	45,53	7,51
37	8	1	45,65	7,53

38	7	1	45,76	7,55
39	6	1	45,87	7,57
40	6	1	45,96	7,58

Nelle figure 4.08 e 4.09 è mostrato rispettivamente il confronto tra le produzioni orarie e progressive di biogas per le due gestioni:



**Figura 4.08: produzione oraria di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità standard ( $k_{ud} = 50\%$ )**



**Figura 4.09: produzione progressiva di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità standard ( $k_{ud} = 50\%$ )**

Nel caso anaerobico il biogas totale prodotto ( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ) risulta  $45,96 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{rifiuto}}$  (figura 4.09), quindi  $22,98 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{rifiuto}}$  di metano ( $\text{CH}_4$  al 50%). Nel caso aerobico invece, il biogas prodotto anaerobicamente (poiché un trattamento 100% aerobico è un parametro ideale) risulta  $7,58 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{rifiuto}}$  con metano e anidride carbonica al 50%, il  $\text{CH}_4$  risulta quindi solamente di  $3,79 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{rifiuto}}$ , circa il 23% di quello ottenuto operando in maniera totalmente anaerobica. Nel caso aerobico il metano è solo l'8% di tutto il biogas ottenibile in assenza di trattamento aerobico ( $45,96 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{rifiuto}}$ ) e non più il 50%. Si può dedurre che il sistema aerobico riduca la quantità di metano producibile dai rifiuti, producendo un biogas all'8% in  $\text{CH}_4$  invece che al 50% come nel caso anaerobico, e la  $\text{CO}_2$  ricopre invece l'92% del totale. Dopo 40 anni la produzione oraria di biogas nel caso anaerobico è 6 superiore a quella del caso aerobico (figura 4.08). Il biogas prodotto con gestione anaerobica ha il vantaggio di poter essere recuperato energeticamente ed ha un potere calorifico piuttosto elevato, con gestione aerobica il gas prodotto invece è povero in metano, presente solo al 2% circa (considerando anche l'eccesso di aria con fattore 4 rispetto al biogas prodotto), quindi un possibile recupero energetico è del tutto inutile. Va tuttavia aggiunta un'ulteriore considerazione, ovvero che le tariffe per la produzione del biogas ultimamente si sono ridotte a circa 1/3 di quelle precedenti e quindi anche il potenziale

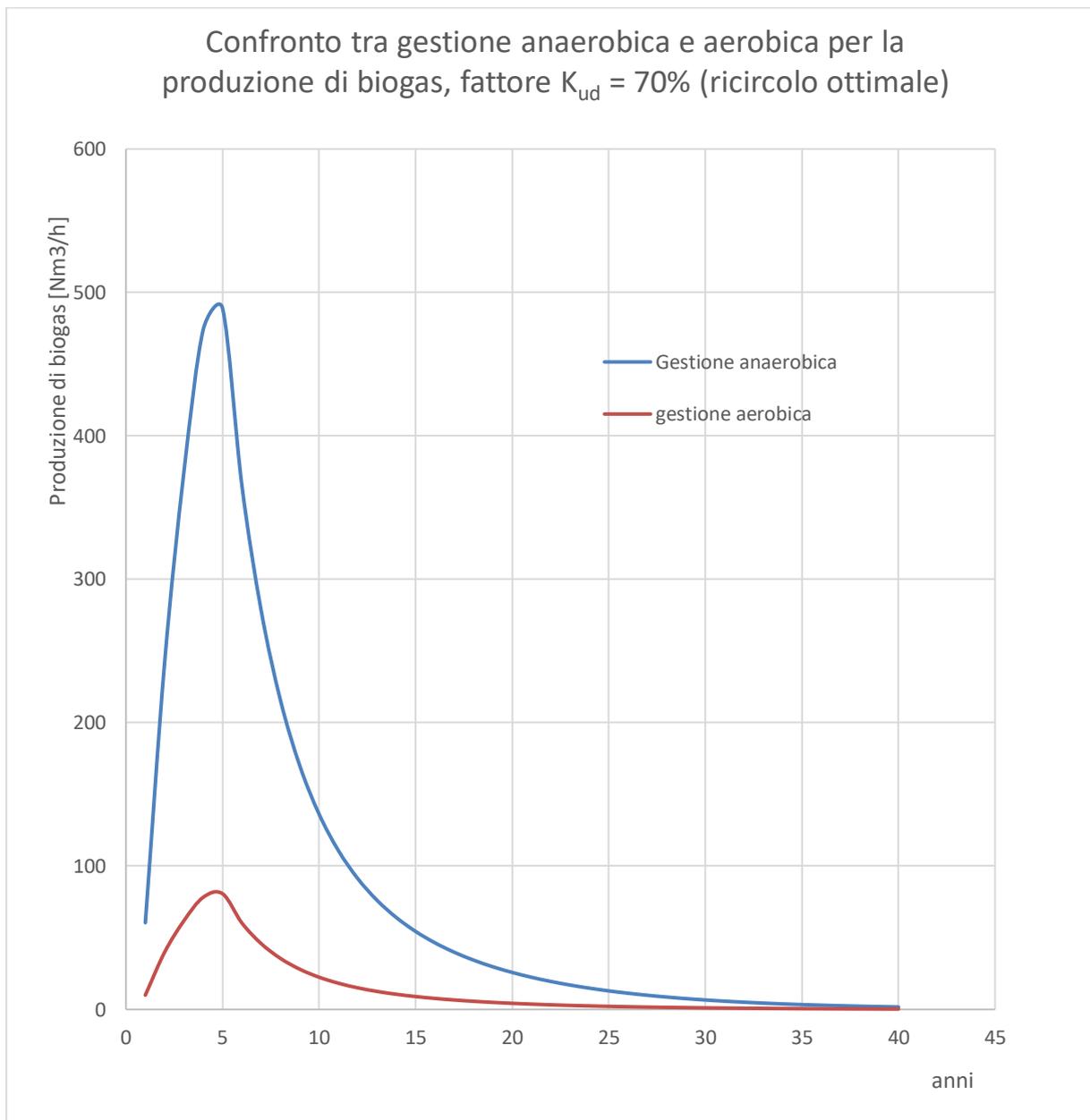
vantaggio del recupero energetico è decaduto. Il contenuto di metano risulta quindi più un onere da controllare e ridurre mediante ossidazione forzata, e questo aspetto è stato uno dei fattori che hanno portato a considerare una gestione alternativa, ovvero quella aerobica. In ambito di sostenibilità, come già esplicitato in precedenza, lo scopo è ridurre al minimo gli impatti della discarica sull'ambiente durante tutte le sue fasi di vita (attiva, passiva, post-gestione), lo scopo primario dell'impianto consiste nel raccogliere e "inertizzare" materiali non più riutilizzabili o valorizzabili energeticamente, quindi l'aspetto della produzione energetica in un'ottica futura passa del tutto in secondo piano. Di seguito è riportato l'effetto che l'umidità e la presenza o meno del ricircolo di percolato apportano alle due gestioni.

Per un fattore  $k_{ud} = 70\%$ , equivalente ad un ricircolo del percolato ottimale, si hanno i risultati in tabella 4.16 e in figura 4.10:

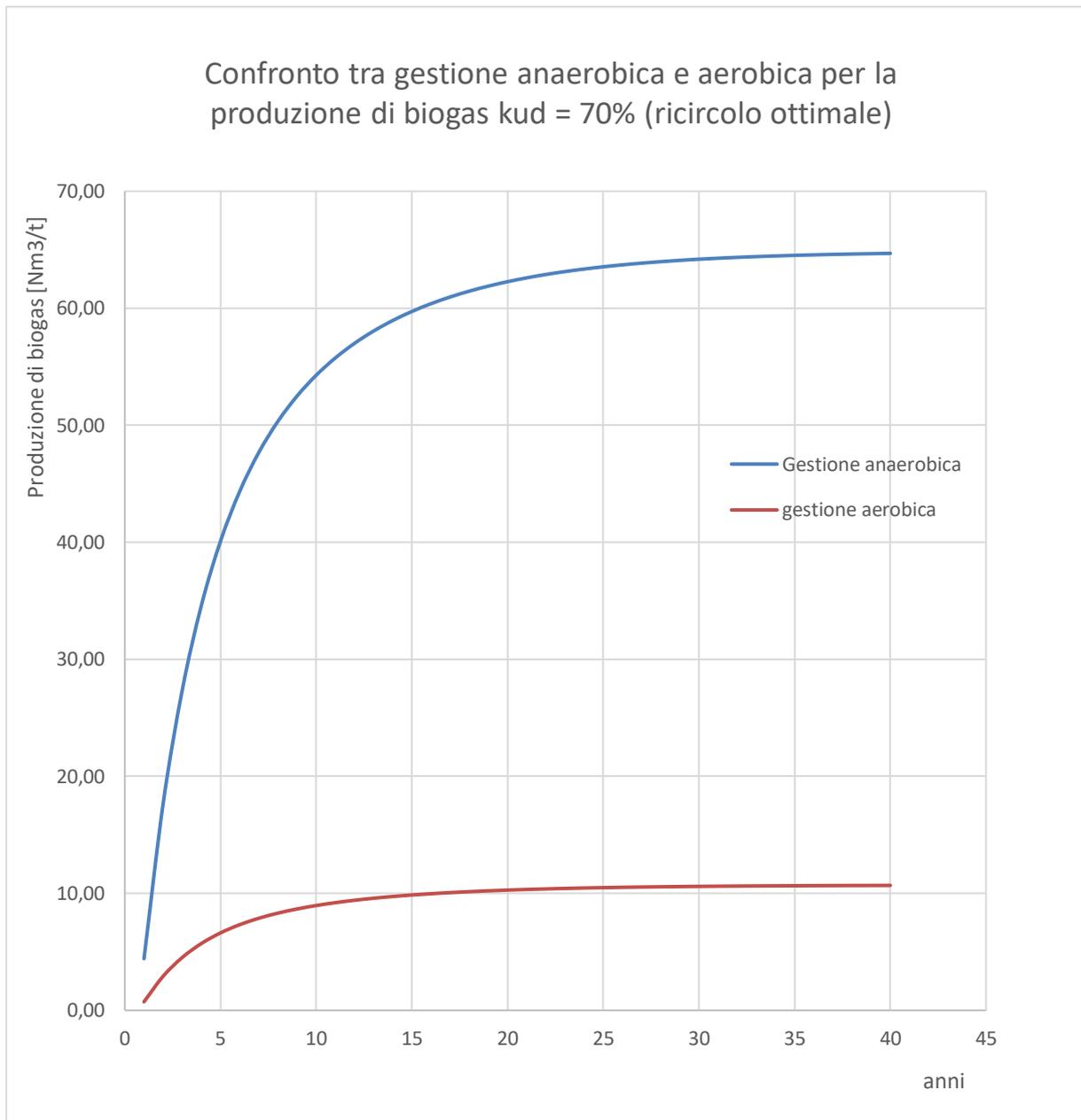
**Tabella 4.16: confronto delle produzioni di biogas tra gestione aerobica ed anaerobica,  $k_{ud} = 70\%$**

Anni	Produzione oraria di biogas [Nm <sup>3</sup> /h]		Produzione progressiva di biogas [Nm <sup>3</sup> /t]	
	Anaerobico	Aerobico	Anaerobico	Aerobico
1	60	10	4,42	0,73
2	242	40	17,66	2,91
3	375	62	27,37	4,52
4	474	78	34,61	5,71
5	489	81	40,10	6,62
6	366	60	44,34	7,32
7	278	46	47,68	7,87
8	215	36	50,34	8,31
9	170	28	52,50	8,66
10	136	22	54,28	8,96
11	111	18	55,76	9,20
12	91	15	57,00	9,41
13	76	13	58,05	9,58
14	64	11	58,95	9,73
15	54	9	59,73	9,85
16	46	8	60,39	9,96
17	40	7	60,96	10,06
18	34	6	61,46	10,14
19	30	5	61,90	10,21
20	26	4	62,27	10,27
21	22	4	62,60	10,33
22	19	3	62,89	10,38
23	17	3	63,14	10,42
24	15	2	63,35	10,45
25	13	2	63,54	10,48
26	11	2	63,71	10,51
27	10	2	63,86	10,54
28	9	1	63,98	10,56
29	8	1	64,09	10,58
30	7	1	64,19	10,59

31	6	1	64,28	10,61
32	5	1	64,35	10,62
33	4	1	64,41	10,63
34	4	1	64,47	10,64
35	3	1	64,52	10,65
36	3	0	64,56	10,65
37	3	0	64,60	10,66
38	2	0	64,64	10,66
39	2	0	64,67	10,67
40	2	0	<b>64,69</b>	<b>10,67</b>



**Figura 4.10: produzione oraria di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità elevata ( $k_{ud} = 70\%$ )**



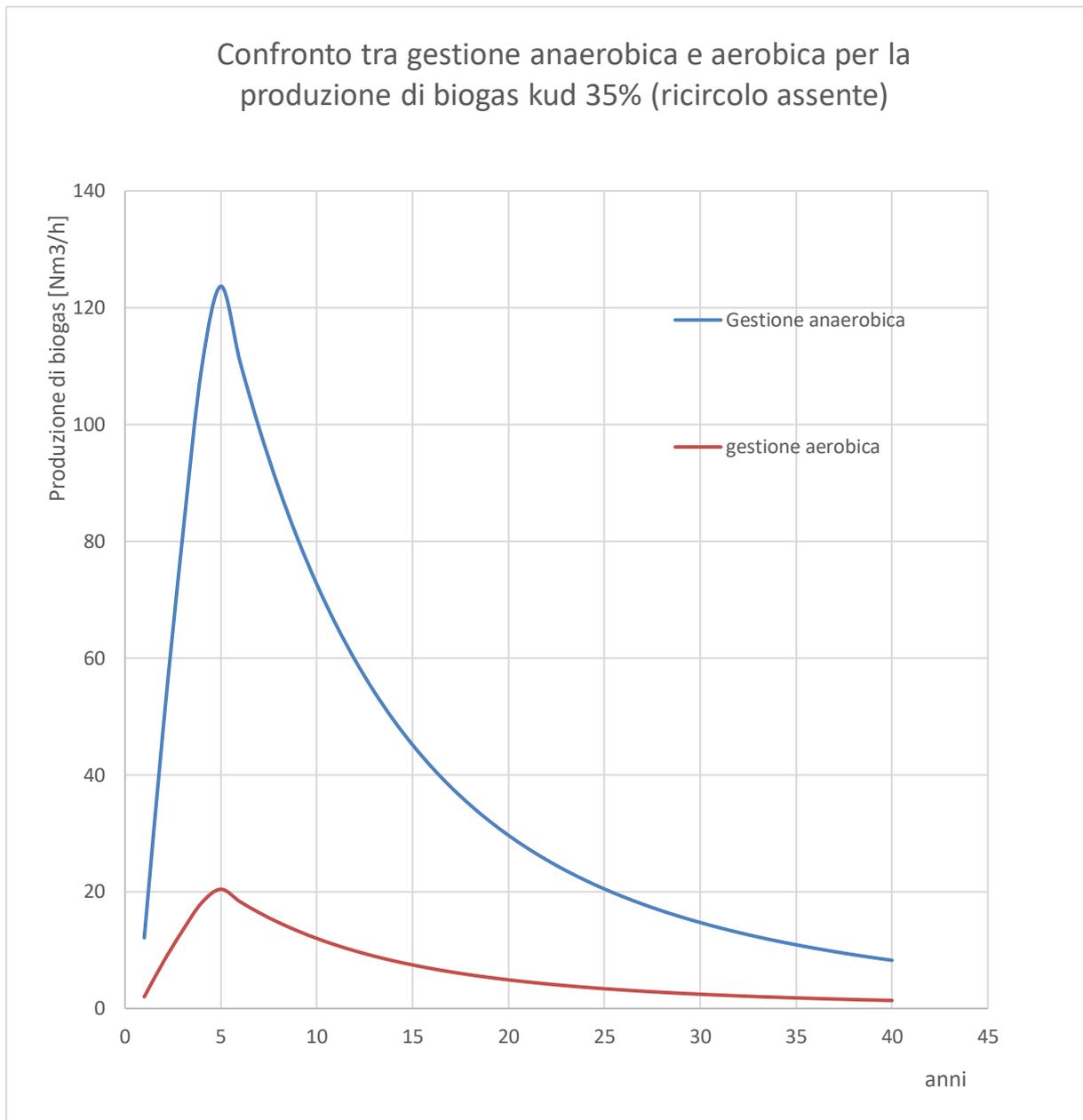
**Figura 4.11: produzione progressiva di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità elevata ( $k_{ud} = 70\%$ )**

L'aumento di umidità ha effetto migliorativo, ma in ambito emissioni l'effetto risulta maggiormente positivo nel caso aerobico (figura 4.10), dove si ha completa stabilizzazione dei rifiuti già portato ad un annullamento delle emissioni dopo 35 anni, mentre nel caso anaerobico si ha ancora una produzione residua, la differenza in metano da abbattere risulta evidente in figura 4.11. Per un fattore  $k_{ud} = 35\%$ , ovvero in assenza di ricircolo di percolato, si ottengono i risultati in tabella 4.17 e nelle figure 4.12 e 4.13:

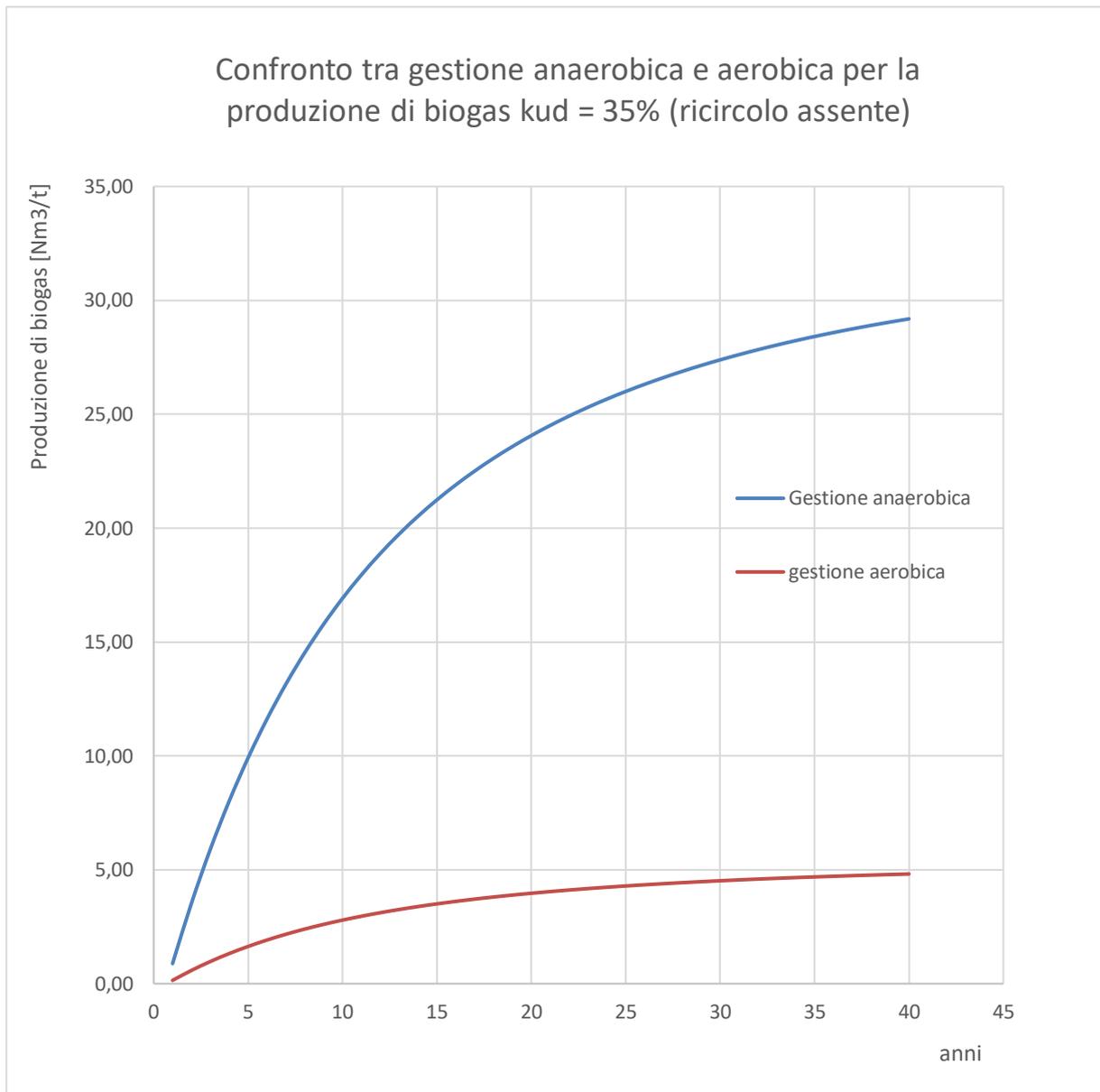
**Tabella 4.17: confronto delle produzioni di biogas tra gestione aerobica ed anaerobica,  $k_{ud} = 35\%$**

Anni	Produzione oraria di biogas [Nm <sup>3</sup> /h]		Produzione progressiva di biogas [Nm <sup>3</sup> /t]	
	Anaerobico	Aerobico	Anaerobico	Aerobico

1	12	2	0,88	0,15
2	48	8	3,53	0,58
3	81	13	5,90	0,97
4	110	18	8,01	1,32
5	124	20	9,91	1,64
6	111	18	11,61	1,92
7	99	16	13,15	2,17
8	89	15	14,53	2,40
9	80	13	15,78	2,60
10	73	12	16,92	2,79
11	66	11	17,95	2,96
12	60	10	18,88	3,12
13	54	9	19,74	3,26
14	49	8	20,52	3,39
15	45	7	21,24	3,50
16	41	7	21,90	3,61
17	38	6	22,50	3,71
18	35	6	23,06	3,81
19	32	5	23,58	3,89
20	30	5	24,06	3,97
21	27	5	24,51	4,04
22	25	4	24,92	4,11
23	24	4	25,30	4,18
24	22	4	25,66	4,23
25	20	3	26,00	4,29
26	19	3	26,31	4,34
27	18	3	26,61	4,39
28	17	3	26,88	4,44
29	16	3	27,14	4,48
30	15	2	27,39	4,52
31	14	2	27,62	4,56
32	13	2	27,83	4,59
33	12	2	28,04	4,63
34	12	2	28,23	4,66
35	11	2	28,41	4,69
36	10	2	28,58	4,72
37	10	2	28,75	4,74
38	9	2	28,90	4,77
39	9	1	29,05	4,79
40	8	1	29,19	4,82



**Figura 4.12: produzione oraria di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità scarsa ( $k_{ud} = 35\%$ )**



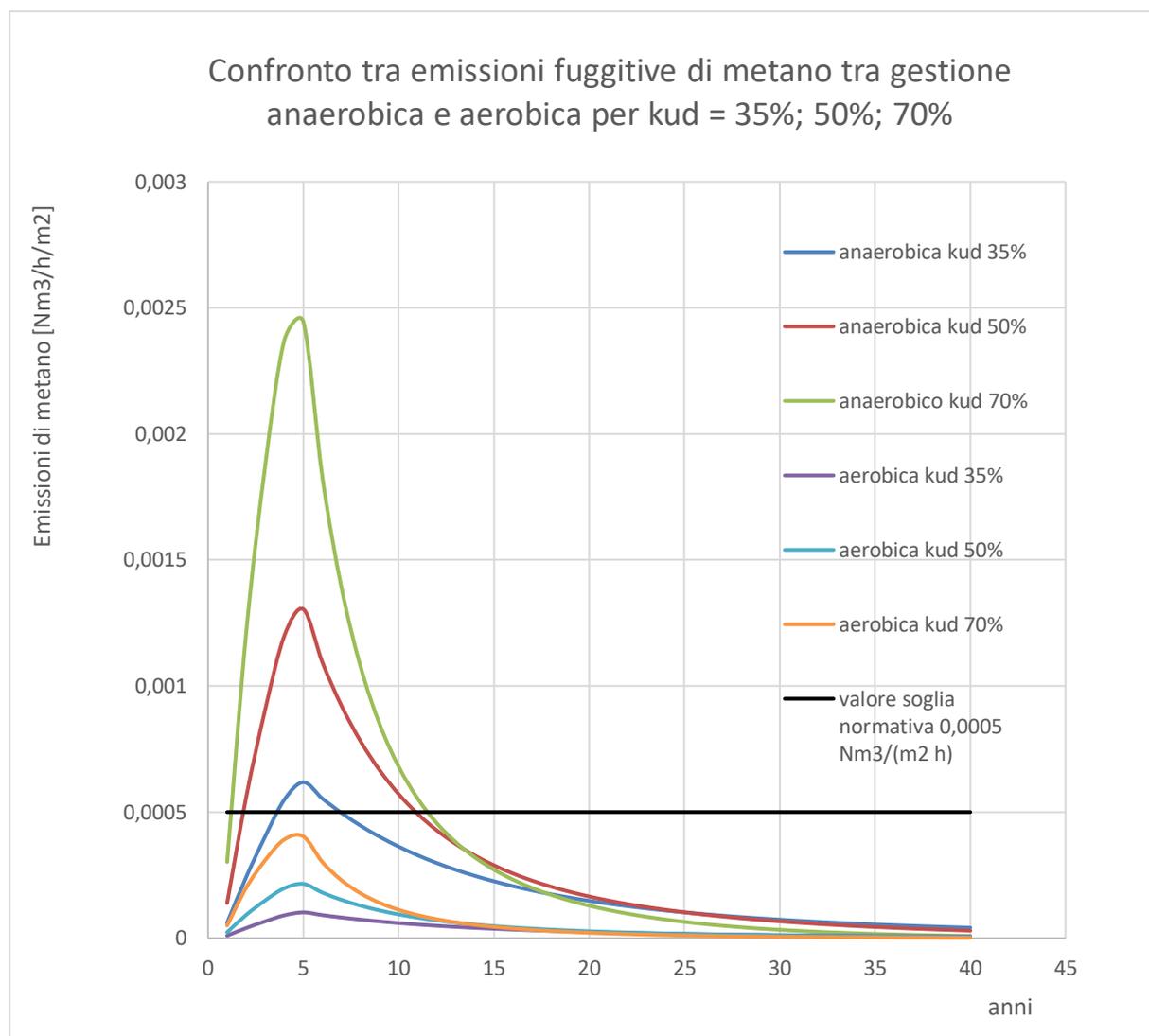
**Figura 4.13: produzione progressiva di biogas, curva anaerobica (in blu) e curva aerobica (in rosso), condizioni di umidità scarsa ( $k_{ud} = 35\%$ )**

In caso di scarsa umidità il confronto favorisce ancora il caso aerobico (figura 4.12), che ha emissioni residue molto inferiori al caso anaerobico. Il modello aerobico, adeguatamente gestito, risulta il metodo più conforme ai criteri di sostenibilità descritti in questa trattazione e dalle normative. Il vantaggio si esplica in una minor produzione di metano da abbattere (figura 4.13), o in torcia o biologicamente, e non più così conveniente da recuperare, inoltre, grazie al trattamento aerobico e al ricircolo di percolato, le potenziali emissioni residue sono molto più ridotte rispetto al caso anaerobico a parità di condizioni, ciò colloca la discarica aerobica molto più vicino al concetto di discarica sostenibile descritto al capitolo 1. In tabella 4.18 vengono elencati i valori di emissioni fuggitive, espresse come  $\text{Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ , tali risultati possono essere confrontati con la normativa per valutare dopo quale arco temporale le emissioni fuggitive di ciascuna casistica sono ritenute accettabili, quindi quando cessare la captazione.

Tabella 4.18: Emissioni fuggitive per i vari casi di confronto affrontati

<b>Emissioni fuggitive di metano [Nm<sup>3</sup>/(h · m<sup>2</sup>)]</b>						
<b>Anni</b>	<b>Anaerobica k<sub>ud</sub> 50%</b>	<b>Aerobica k<sub>ud</sub> 50%</b>	<b>Anaerobica k<sub>ud</sub> 35%</b>	<b>Aerobica k<sub>ud</sub> 35%</b>	<b>Anaerobica k<sub>ud</sub> 70%</b>	<b>Aerobica k<sub>ud</sub> 70%</b>
1	0,000139598	2,30335E-05	0,000060497	0,000009982	0,000302403	4,98965E-05
2	0,000558393	0,000092135	0,000241989	0,000039928	0,001209612	0,000199586
3	0,000907012	0,000149657	0,000404003	6,66605E-05	0,001874721	0,000309329
4	0,00119873	0,000197791	0,00054892	0,000090572	0,002370524	0,000391137
5	0,001304574	0,000215255	0,000618316	0,000102022	0,002444254	0,000403302
6	0,001093463	0,000180422	0,0005535	9,13275E-05	0,001827529	0,000301543
7	0,000921602	0,000152065	0,000496518	8,19255E-05	0,001390725	0,00022947
8	0,000781215	0,000128901	0,00044636	7,36495E-05	0,001077363	0,000177765
9	0,000666102	0,000109907	0,000402152	0,000066355	0,000849262	0,000140128
10	0,000571324	9,42685E-05	0,000363133	0,000059917	0,000680531	0,000112288
11	0,000492937	8,13345E-05	0,000328643	0,000054226	0,000553552	0,000091336
12	0,000427796	7,05865E-05	0,000298108	0,000049188	0,00045628	0,000075286
13	0,000373384	6,16085E-05	0,00027103	0,00004472	0,00038043	0,000062771
14	0,000327688	5,40685E-05	0,000246976	0,000040751	0,000320265	5,28435E-05
15	0,000289097	0,000047701	0,000225569	0,000037219	0,000271776	0,000044843
16	0,000256317	0,000042292	0,000206482	3,40695E-05	0,000232131	3,83015E-05
17	0,000228308	0,000037671	0,00018943	0,000031256	0,000199306	3,28855E-05
18	0,000204234	3,36985E-05	0,000174165	0,000028737	0,000171834	2,83525E-05
19	0,00018342	0,000030264	0,000160471	2,64775E-05	0,000148633	2,45245E-05
20	0,000165319	2,72775E-05	0,00014816	2,44465E-05	0,000128895	2,12675E-05
21	0,000149489	2,46655E-05	0,000137068	0,000022616	0,000112001	0,00001848
22	0,000135571	0,000022369	0,000127052	2,09635E-05	0,000097471	1,60825E-05
23	0,000123269	2,03395E-05	0,000117987	1,94675E-05	0,000084928	0,000014013
24	0,000112344	0,000018537	0,000109763	0,000018111	7,40675E-05	0,000012221
25	0,000102598	1,69285E-05	0,000102287	1,68775E-05	0,000064642	0,000010666
26	9,38665E-05	0,000015488	0,000095473	0,000015753	5,64465E-05	9,3135E-06
27	8,60145E-05	1,41925E-05	8,92505E-05	1,47265E-05	4,93105E-05	0,000008136
28	7,89295E-05	1,30235E-05	8,35535E-05	1,37865E-05	0,000043091	0,00000711
29	7,25155E-05	0,000011965	7,83275E-05	0,000012924	0,000037665	6,2145E-06
30	6,66935E-05	1,10045E-05	0,000073522	0,000012131	3,29285E-05	0,000005433
31	0,000061395	0,00001013	6,90945E-05	1,14005E-05	2,87915E-05	4,7505E-06
32	5,65625E-05	0,000009333	6,50065E-05	0,000010726	2,51775E-05	4,1545E-06
33	5,21465E-05	0,000008604	6,12245E-05	0,000010102	2,20185E-05	0,000003633
34	0,000048104	0,000007937	5,77185E-05	9,5235E-06	1,92575E-05	3,1775E-06
35	4,43975E-05	7,3255E-06	5,44625E-05	8,9865E-06	1,68435E-05	0,000002779
36	4,09945E-05	0,000006764	5,14335E-05	8,4865E-06	1,47325E-05	0,000002431
37	0,000037867	0,000006248	0,000048611	0,000008021	1,28865E-05	2,1265E-06
38	0,00003499	5,7735E-06	0,000045976	0,000007586	1,12725E-05	0,00000186
39	3,23405E-05	0,000005336	0,000043513	7,1795E-06	9,8605E-06	0,000001627
40	0,000029899	4,9335E-06	0,000041207	0,000006799	8,6255E-06	0,000001423

In figura 4.14 sono rappresentate le curve delle emissioni nei vari casi di confronto presi in considerazione:



**Figura 4.14: curve delle emissioni fuggitive di metano per i vari casi di confronto affrontati**

Il criterio della normativa descritta al capitolo 2 impone un limite di accettabilità di  $0,0005 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , i valori in grassetto in tabella 4.18 sono inferiori a tale limite), per cui si può concludere che dopo 30 anni tutti casi presi in esame siano perfettamente accettabili normativa (figura 4.14), sia per la gestione aerobica che anaerobica. E' più che evidente, però, che la gestione aerobica comporti un raggiungimento dell'obiettivo di soglia di emissione molto più rapidamente che per il caso anaerobico, la differenza in termini di anni è superiore a 10 tra le due modalità. Va evidenziato che il sistema aerobico prevede che le condizioni di emissione diffusa siano sempre (anche in fase di gestione attiva) inferiori al valore soglia posto come obiettivo ambientale dopo 30 anni di post-gestione. Per concludere, la gestione aerobica adempie meglio all'obiettivo di sostenibilità perché restituisce fruibilità al sito in tempi decisamente più brevi rispetto alla gestione anaerobica, dove è necessario aspettare almeno più di 10 anni. Con questi tipi di rifiuti, entrambe le modalità gestionali raggiungono l'obiettivo di sostenibilità dei 30 anni prefissato dalla normativa di cui al capitolo 2. La scelta del tipo di rifiuti è quindi un fattore chiave nella realizzazione di una discarica sostenibile a servizio dell'economia circolare.

## 4.2 Confronto tra i percolati

Il percolato in una discarica controllata è generato dalla decomposizione dei rifiuti e dalle infiltrazioni di acqua provenienti da fonti esterne, in particolare la pioggia. Si forma così una fase acquosa miscelata con composti organici e non. La qualità e la quantità di percolato prodotto dipendono da diversi fattori, tra cui i seguenti:

- Composizione del rifiuto: al fine di produrre la minor quantità possibile di percolato, il rifiuto non deve essere liquido e deve avere un tasso di umidità non troppo elevato, però va tenuto conto che un certo livello di umidità favorisce la cinetica di produzione del biogas velocizzando quindi la stabilizzazione dei rifiuti, per cui è necessario che il rifiuto abbia determinate caratteristiche;
- Il sistema di conduzione dello scarico;
- Le reazioni chimiche e biologiche presenti;
- Temperatura e pH;
- L'intensità dei fenomeni meteorologici;
- La topografia dei luoghi e le caratteristiche geologiche;

Di seguito verrà illustrato e descritto il modello analitico di calcolo della produzione di percolato, che permetterà di mettere in luce se la gestione, aerobica o anaerobica, ne influenzi la quantità, considerando i vari termini che concorrono al bilancio idrologico di massa.

### 4.2.1 Descrizione del modello di produzione

Per valutare la dinamica del processo di produzione del percolato è necessario conoscere i termini che concorrono nel bilancio idrologico della discarica. I vari contributi sono i seguenti:

- Precipitazioni efficaci  $P_e$ ;
- Aliquota delle precipitazioni allontanata per ruscellamento  $R$ ;
- Aliquota delle precipitazioni allontanata per evotraspirazione  $ET$ ;
- Variazione del contenuto di umidità  $\Delta U_c$ ;
- Infiltrazioni superficiali  $I_s$ ;
- Infiltrazioni profonde  $I_g$ ;
- Le acque che hanno giunte dalle aree limitrofe in discarica per ruscellamento  $R^*$ ;
- Ricircolo del percolato  $J$ ;
- La portata complessiva  $I$  dei suddetti contributi;
- Le variazioni di umidità dei ricoprimenti intermedi  $\Delta U_r$ ;
- Le variazioni di umidità dell'ammasso di rifiuti  $\Delta U_{RS}$ ;
- Le perdite dell'impermeabilizzazione nell'ambiente circostante  $L_i$ ;
- L'apporto di fanghi di depurazione eventualmente smaltiti  $S$ ;
- Le perdite di umidità dei rifiuti come vapore  $Vap$ ;

- La produzione B' (può essere considerata trascurabile nel caso anaerobico) e il consumo di acqua per i processi biologici nel rifiuto B;

Possiamo scrivere pertanto le equazioni 4.1 e 4.2:

$$I = P - R - ET + \Delta U_c + I_s + I_g + R^* + J \quad (4.01)$$

$$L_r = I + \Delta U_r + \Delta U_{RS} - L_i + S - Vap - B \quad (4.02)$$

$L_r$  rappresenta la produzione complessiva di percolato. Di seguito viene indicato il metodo di stima di ciascun termine.

### Stima di I

Per valutare questo termine deve essere nota l'altezza di pioggia P, poi si ricorre alle formule consuete di idrologia. I contributi  $I_s$  e  $I_g$  normalmente vengono trascurati perché la normativa impone che vi sia una distanza minima tra il fondo della discarica e la falda idrica sottostante. E' possibile inoltre trascurare il termine  $R^*$  in caso di realizzazione di canale di gronda sul perimetro della discarica. Per calcolare il termine R si può ricorrere alla formula razionale 4.3:

$$R = c \cdot P \quad (4.03)$$

Il coefficiente c è funzione del tipo di copertura vegetale, della pendenza e della natura del terreno. L'evotraspirazione ET può essere stimata attraverso la formula di Thorntwaite, che dà il valore del massimo volume d'acqua che un terreno piantumato è in grado di allontanare per via dell'irraggiamento solare e dell'attività delle piante (traspirazione), questa quantità è detta evotraspirazione potenziale, ed è ricavata con la 4.4:

$$ET = 16 \cdot \frac{10 \cdot T_i}{I_t} \cdot C_i \quad (4.04)$$

$T_i$  è la temperatura media del mese i-esimo,  $C_i$  è un coefficiente di correzione relativo al mese i-esimo, che si ottiene dividendo per 12 la media durata dell'insolazione giornaliera riferita al mese i-esimo (in ore), mentre  $I_t$  è l'indice termico annuale, stimato con la correlazione 4.5:

$$I_t = \sum_1^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (4.05)$$

L'evotraspirazione effettiva coincide con quella potenziale solo se  $P-R-ET$  sia  $> 0$ , in caso contrario occorrono studi più complicati che tengano conto anche dell'essiccamento del terreno. Nel caso di discarica in esercizio, quando la copertura vegetale è assente, la formula di Turc (4.6) permette di calcolare il termine evaporativo:

$$E_{10} = \frac{P_{10+a}}{\sqrt{1 + \frac{P_{10+a}}{L}}} \quad (4.06)$$

$P_{10}$  ed  $E_{10}$  sono precipitazione ed evaporazione nel periodo di 10 giorni,  $a$  è la massima quantità di acqua allontanabile dal per evaporazione in 10 giorni in assenza di precipitazioni, mentre  $L$  è detto fattore eliotermico, ed è funzione della temperatura media dell'aria e della radiazione solare effettiva. Per calcolare  $\Delta U_c$  è necessario conoscere la capacità di campo  $CC$ , ovvero la massima quantità di umidità che uno strato di materiale sciolto di peso unitario può trattenere prima che si verifichi percolazione, e si stima con la correlazione 4.7:

$$CC = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{ms}}{4500 + W_{ms}} \quad (4.07)$$

$W_{ms}$  è il peso di materiale sovraincombente il baricentro dello strato di materiale sciolto. Il massimo contenuto di umidità contenibile dal materiale sciolto si ottiene moltiplicandone il peso secco per  $CC$ . Se ci si riferisce al terreno di copertura,  $\Delta U_c$  si calcola dalla differenza tra il contenuto di umidità iniziale del terreno di copertura  $U_{cin}$  ed il valore della capacità di campo dello stesso  $CC_c$ , moltiplicata a sua volta per il suo peso secco  $W_c$ :

$$\Delta U_c = U_{cin} \cdot W_c \quad (4.08)$$

Se  $P - R - ET + J + \Delta U_c < 0$ ,  $I = 0$  è non c'è produzione di percolato. Se risulta invece  $> 0$ , e sia prevista una barriera impermeabile, il percolato prodotto forma una falda sospesa che alimenta la zona sottostante secondo la legge di Darcy (4.9):

$$q = \frac{I}{A} = K_s \cdot \frac{H}{h_s} \quad (4.09)$$

$K_s$  e  $h_s$  sono la permeabilità e lo spessore dello strato sigillante,  $A$  è l'area superficiale della discarica,  $H$  è l'altezza della falda sospesa. Questa è funzione di  $P_e$  e  $J$ , per cui si può scrivere la seguente relazione:

$$H = P_e + J \quad (4.10)$$

Con  $P_e = P - R - ET + J + \Delta U_c$ .

### **Stima di $\Delta U_{RSU}$ e $\Delta U_r$**

Per calcolare  $\Delta U_{RSU}$  e  $\Delta U_r$  vengono usate le seguenti equazioni:

$$\Delta U_{RSU} = U_{RSUin} - CC_{RSU} \cdot W_{RSU} \quad (4.11)$$

$$\Delta U_r = U_{rin} - CC_r \cdot W_r \quad (4.12)$$

$CC_{RSU}$  e  $CC_r$  sono la capacità di campo del rifiuto e del ricoprimento intermedio,  $U_{RSUin}$  e  $U_{rin}$  il contenuto iniziale di umidità del rifiuto e del ricoprimento intermedio,  $W_{RSU}$  e  $W_r$  il peso secco del rifiuto e del ricoprimento intermedio.

### Stima di $L_i$ , $S$ , $B$ , $Vap$

Nella maggior parte dei casi  $L_i$  si assume trascurabile, poiché si ritiene che il materiale impermeabile possa resistere alle sollecitazioni meccaniche e non subire fessurazione. L'apporto  $S$ , cioè l'acqua dei fanghi di depurazione è determinato per via sperimentale. Per il calcolo di  $B$  è necessario esprimere stechiometricamente le moli d'acqua consumate (reazione anaerobica) o prodotte (reazione aerobica) per ciascuna mole di gas prodotto. Per calcolare  $Vap$ , l'umidità dispersa come vapore, si può assumere che l'atmosfera interna al corpo rifiuti sia satura di vapor d'acqua, quindi ricavare il quantitativo di vapore usando la legge dei gas perfetti:

$$PV = nRT \quad (4.13)$$

Questa modellazione può essere applicata sia alla discarica ultimata (fase di gestione passiva), per trovare la produzione annua di percolato, oppure in fase di esercizio, fino al raggiungimento dello stato stazionario (discarica colmata), in questo caso la valutazione della produzione di percolato va riferita ai singoli volumi di rifiuto che vengono depositati nell'intervallo di tempo, considerando per gli stati sovrapposti il valore  $I$  come produzione di percolato dallo strato sovrastante.

Per la stima delle produzioni in fase di post-gestione si può adottare un modello di decadimento di tipo esponenziale, del tipo:

$$P_k = ae^{-ct_k} \quad (4.14)$$

con  $a$  in  $m^3$ , corrispondente alla produzione teorica all'istante di ultimazione della copertura della discarica, e  $c$  in  $anni^{-1}$ , (solitamente dell'ordine di  $10^{-1}$ ), parametro che indica la rapidità di decadimento della produzione nel tempo. Integrando la formula fra  $t=0$  e  $t \rightarrow \infty$ , si ottiene la produzione totale di percolato:

$$V = a/c \quad (4.15)$$

La produzione di percolato nell'anno  $i$ -esimo dopo la chiusura si ottiene integrando la formula fra  $t = t_{i-1}$  e  $t = t_i$ :

$$V_i = -\frac{a}{c} (e^{-ct_i} - e^{-ct_{i-1}}) \quad (4.16)$$

Ovvero anche:

$$V_i = -\frac{a}{c} [e^{-ct_i} (1 - \frac{e^{-ct_{i-1}}}{e^{-ct_i}})] \quad (4.17)$$

Se il tempo è misurato in anni, essendo  $(t_{i-1} - t_i) = -1$  anno, si può scrivere:

$$\frac{e^{-ct_{i-1}}}{e^{-ct_i}} = e^{-c(t_{i-1}-t_i)} \quad (4.18)$$

e pertanto la formula diventa:

$$V_i = \frac{a(e^c - 1)}{c} e^{-ct_i} \quad (4.19)$$

ovvero anche, più semplicemente:

$$V_i = b e^{-ct_i} \quad (4.20)$$

avendo posto:

$$b = \frac{a(e^c - 1)}{c} \quad (4.21)$$

Ovvero:

$$a = \frac{bc}{(e^c - 1)} \quad (4.22)$$

Le due formulazioni sono simili, ma hanno significato diverso, infatti  $P_k$  rappresenta la produzione istantanea (in m<sup>3</sup>/anno) in un istante generico  $t = k$ , mentre  $V_i$  rappresenta la produzione complessiva (in m<sup>3</sup>) nell'anno  $i$ -esimo. Analogamente,  $a$  rappresenta la produzione istantanea che si ha all'inizio del primo anno, mentre  $V_1 = b e^{-c}$  rappresenta la produzione complessiva (in m<sup>3</sup>) che si ha in tutto il primo anno di gestione passiva. Dunque, se si utilizza la formula  $V_i = b e^{-ct_i}$ , il volume complessivo del percolato prodotto in gestione passiva diventa:

$$V_i = \frac{a}{c} = \frac{b}{(e^c - 1)} = \frac{V_1}{(1 - e^{-c})} \quad (4.23)$$

L'esperienza mostra che la produzione del primo anno dopo la chiusura della discarica è solitamente pari al 35 ÷ 40% circa della produzione che si aveva in gestione attiva. Si stima per il coefficiente di decadimento un valore  $c = 0,1 \text{ anni}^{-1}$ .

#### 4.2.2 Gestione anaerobica: produzione di percolato in fase attiva e passiva

Si procede ora con il calcolo della produzione annua di percolato nel corso di esercizio (fase attiva) e nella fase post-esercizio (fase passiva) per la discarica in oggetto, costituita da 3 strati sovrapposti, i primi due di  $h_{1,2} = 3$  m e completati nell'arco di 1,5 anni ciascuno, mentre l'ultimo di  $h_3 = 2$  m è riempito in 1 anno. Si fanno inoltre le seguenti ipotesi:

- I rifiuti depositati abbiano un peso specifico di  $950 \text{ kg/m}^3$ ;
- Il contenuto di umidità sia del 35%;
- Che la composizione dei rifiuti sia come in tabella 4.19:

Tabella 4.19: stima della composizione atomica del rifiuto

Componente	Peso %	H <sub>2</sub> O % peso	% Peso secco			
			C	H	O	N
Inerti vari	88	4	0,5	0,1	0,4	< 0,1
Residui alimentari	3,20	80	48	6,4	37,6	2,6
rifiuti vegetali e altri cellulosici	2,80	80	47,8	6	38	3,4
carta	2,40	10	43,5	6	44	0,3
cartone	2	8	44	5,9	44,6	0,3
tessili	0,80	8	55,5	8,2	20,4	7,2
legno	0,80	40	49,5	6	42,7	0,2

La discarica ha le seguenti caratteristiche:

- L'altezza dei primi due strati è  $h = 3$  m, e 2 m per il terzo;
- Il peso specifico del materiale di ricoprimento sia  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ;
- Sia il materiale di ricoprimento intermedio che quello finale sono a capacità di campo, per cui  $\Delta U_c = 0$  e  $\Delta U_r = 0$ ;
- La pendenza della superficie a discarica ultimata sia del 6%;
- Per semplicità si usa una base di calcolo con superficie unitaria  $S_u = 1 \text{ m}^2$ , per cui tutte le stime sono calcolate per unità di superficie;

Si considera che il percolato ricircolato  $J$  sia trascurabile, poiché lo scopo del ricircolo è modificare l'umidità l'ambiente rifiuti e non creare un flusso e un battente di liquido. La piovosità efficace  $P_e$  sia di  $646 \text{ mm/anno}$ , quindi in un anno e mezzo  $990 \text{ mm/anno}$  e che la piovosità media e la temperatura media siano distribuite come in tabella 4.20:

**Tabella 4.20: piovosità medie mensili e temperature medie mensili della zona, dati ricavati dal sito dell'Arpa**

Mese	T media[°C]	P media[mm/mese]
Gennaio	1,5	41
Febbraio	4,5	49
Marzo	9	56
Aprile	12	55
Maggio	16,5	58
Giugno	20,5	43
Luglio	23	38
Agosto	22,5	50
Settembre	19	47
Ottobre	13,5	82
Novembre	6,5	77
Dicembre	3	50

Fatte queste ipotesi, l'equazione di bilancio 4.02 si riduce alla forma seguente:

$$L_r = I + \Delta U_{RSU} - Vap - B \quad (4.24)$$

Vengono considerate nulle le infiltrazioni nel corpo della discarica da parte di acque di superficie o di profondità e le perdite attraverso l'impermeabilizzazione.

Per i calcoli si adotta una notazione a doppio pedice, dove il primo rappresenta il numero dello strato, mentre il secondo gli anni trascorsi a partire dall'inizio del riempimento.

Il modello idraulico quindi assimila la produzione di percolato in discarica ad un sistema composto da serbatoi disposti in cascata pari al numero degli strati. E' possibile quindi seguire l'evoluzione nel tempo solo dei rifiuti depositati al primo anno, che costituiscono cioè il primo strato, e ricondurre i calcoli di tutti gli altri strati a questo.

Prendendo come riferimento un rapporto 5/1 tra altezza dei rifiuti e del ricoprimento, a cui corrisponde quindi 1/6 dell'altezza totale dello strato, si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} W_{MRumido} &= \text{peso umido del materiale di ricoprimento} = y_{MR} \cdot h_{MR} \cdot S = \\ &= 1800 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 1 = 900 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{RSUumido} &= \text{peso umido del rifiuto} = y_{RSU} \cdot h_{RSU} \cdot S = \\ &= 950 \cdot \frac{5}{6} \cdot 3 \cdot 1 = 2375 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$W_{RSUsecco} = \text{peso secco del rifiuto} = W_{RSUumido} \cdot 0,65 = 1543,75 \text{ kg}$$

$$U_{RSU} = \text{umidità del rifiuto} = 2375 - 1543,75 = 831,25 \text{ kg}$$

La portata massica entrante  $Q_e$  nel corso di ciascun anno di esercizio è data da:

$$Q_{e0} = P_e \cdot S \cdot y_{H_2O} = 0,646 \cdot 1 \cdot 1000 = 646 \text{ kg/anno}$$

Mentre la quantità di acqua in un anno e mezzo risulta:  $Q_e = 990 \text{ kg}$

## PRIMO STRATO

Al termine del primo anno e mezzo, il primo strato è completato, quindi  $I(1, \frac{3}{2}) = Q_e$ . Dal modello BIO risulta che il biogas prodotto durante il primo anno e mezzo ammonta a:

$$v(1, \frac{3}{2}) = (2,04 + 6,11/2) = 5,095 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

Da qui possiamo ricavare il consumo di acqua nota la merceologia dei rifiuti e la loro composizione:

$$V_{\text{gas}}(1, \frac{3}{2}) = v(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{RSU\text{secco}} = 5,095 \cdot 1,54375 = 7,87 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas}}(1, \frac{3}{2}) = V_{\text{gas}}(1, \frac{3}{2}) \cdot \rho_{\text{gas}} = 7,87 \cdot 1,3 = 10,231 \text{ kg}$$

Per ricavare il consumo di acqua, bisogna ricorrere alla stechiometria. Per una tonnellata di rifiuto la composizione in kg e le frazioni velocemente e lentamente putrescibili risultano come segue:

**Tabella 4.21: composizione massica del rifiuto, SORB e SOLB**

Componente	Peso secco kg	C kg	H kg	O kg	N kg
<b>SORB</b>					
Residui alimentari	6,4	3,072	0,4096	2,4064	0,1664
Carta	21,6	9,396	1,296	9,504	0,0648
Cartone	18,4	8,096	1,0856	8,2064	0,0552
Rifiuto vegetale	5,6	2,6768	0,336	2,128	0,1904
<b>Totale</b>	<b>52</b>	<b>23,2408</b>	<b>3,1272</b>	<b>22,2448</b>	<b>0,4768</b>
<b>SOLB</b>					
tessili	7,36	4,0848	0,60352	1,50144	0,52992

legno	4,8	2,376	0,288	2,0496	0,0096
<b>Totale</b>	12,16	6,4608	0,89152	3,55104	0,53952

Dove SORB e SOLB sono rispettivamente la frazione velocemente putrescibile e lentamente putrescibile dei rifiuti. Si risale alla composizione della SORB e della SOLB in termini di kg-moli noti il peso atomico e la composizione chimica:

### SORB

$$\text{moli}_C = \frac{23,2408}{12} = 1,94 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_H = \frac{3,1272}{1} = 3,13 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_O = \frac{22,2448}{16} = 1,39 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_N = \frac{0,4768}{14} = 0,034 \text{ mol}$$

### SOLB

$$\text{moli}_C = \frac{6,4608}{12} = 0,54 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_H = \frac{0,89152}{1} = 0,89 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_O = \frac{3,55104}{16} = 0,22 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_N = \frac{0,53952}{14} = 0,04 \text{ mol}$$

E' possibile quindi scriverne le formule stechiometriche:



In generale la stechiometria della fermentazione anaerobica è descritta dalla reazione 4.25:



Per ricavare i valori di  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  si risolve il sistema di equazioni, e le soluzioni sono le 4.26:

$$\alpha = \frac{4a - b - 2c + 3d}{4}$$

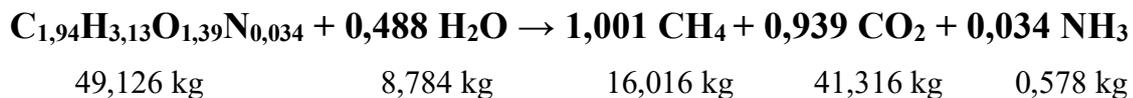
$$\beta = \frac{4a + b - 2c - 3d}{8} \quad (4.26)$$

$$\gamma = \frac{4a - b + 2c + 3d}{8}$$

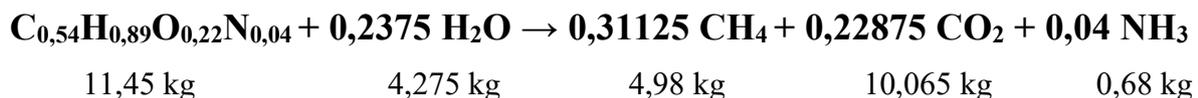
$$\delta = d$$

Per cui la stechiometria risulta come segue:

#### SORB



#### SOLB



Si ricava ora il consumo d'acqua  $C_{H_2O}$ :

$$C_{H_2O}(SORB) = \frac{8,784 \text{ kg}}{49,126 \text{ kg SORB}} = 0,18$$

$$C_{H_2O}(SOLB) = \frac{4,275 \text{ kg}}{11,45 \text{ kg SORB}} = 0,37$$

La SORB costituisce il 5,2% e la SOLB l'1,216% del rifiuto, quindi si calcola il consumo d'acqua medio-pesato:

$$C_{H_2O}(R.S.U) = 0,052 \cdot 0,18 + 0,01216 \cdot 0,37 = 0,014 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg rifiuto}}$$

Il peso specifico del metano è  $0,72 \text{ kg/Nm}^3$ , mentre per l'anidride carbonica  $1,98 \text{ kg/Nm}^3$ , per cui si possono ricavare dalla stechiometria i  $\text{Nm}^3$  di  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  prodotti, quindi la produzione specifica volumetrica di biogas trascurando l'ammoniaca, presente solo in quantità esigua:

Per la SORB:

$$\text{CH}_4 = \frac{16,016 \text{ kg}}{0,72 \text{ kg/Nm}^3} = 22,24 \text{ Nm}^3$$

$$\text{CO}_2 = \frac{41,316 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 20,87 \text{ Nm}^3$$

Per la SOLB:

$$\text{CH}_4 = \frac{4,98 \text{ kg}}{0,72 \text{ kg/Nm}^3} = 6,92 \text{ Nm}^3$$

$$\text{CO}_2 = \frac{10,065 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 5,08 \text{ Nm}^3$$

La produzione specifica volumetrica risulta:

$$v_s = \frac{22,24 + 20,87}{1000} + \frac{4,98 + 5,08}{1000} = 0,053 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg rifiuto}}$$

La produzione specifica volumetrica di biogas è  $0,053 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , il valore ottenuto è teorico in quanto calcolato in condizioni ottimali in cui tutta la frazione organica putrescibile viene convertita e il valore di umidità è ottimizzato al processo, il modello BIO-5 attribuisce alla produzione specifica volumetrica il valore  $0,04596 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ . Per calcolare il consumo di acqua, a fini cautelativi, si usa il valore teorico, poiché considera un quantitativo inferiore di acqua reagita e quindi una produzione di percolato superiore. Si vedrà come l'apporto negativo di acqua di reazione al bilancio idrico sia trascurabile rispetto ai fenomeni di piovosità, ne conseguirà che la produzione di percolato sarà data nella sua totalità dalle piogge. Il consumo specifico di acqua per  $\text{Nm}^3$  di biogas prodotto risulta pari a:

$$C_{\text{H}_2\text{O}(\text{biogas})}\left(1, \frac{3}{2}\right) = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,053} = 0,26 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{ biogas}}$$

Si ottiene quindi il termine  $B\left(1, \frac{3}{2}\right)$ :

$$B\left(1, \frac{3}{2}\right) = C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas}}\left(1, \frac{3}{2}\right) = 0,26 \cdot 7,87 = 2,05 \text{ kg}$$

Il valore di B risulta trascurabile rispetto alla piovosità annua, che corrisponde quindi al termine maggiormente impattante sul bilancio idrico del sistema. Applicando l'equazione di stato dei gas perfetti si trovano le moli di H<sub>2</sub>O in stato vapore per m<sup>3</sup> di biogas. Si considera una temperatura di 18° C (cioè 291 K), a questa T corrisponde una tensione di vapore saturo p<sub>v</sub> = 1317,225 Pa:

$$n = \frac{p_v}{RT} = \frac{1317,225}{8,314 \cdot 291} = 0,54 \frac{\text{moli di vapore}}{\text{Nm}^3 \text{ di biogas}}$$

Da cui:

$$\text{Vap}(1, \frac{3}{2}) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{\text{gas}}(1, \frac{3}{2}) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 7,87 = 0,0765 \text{ kg}$$

Si noti che anche il contributo di Vap risulta del tutto trascurabile rispetto alle piogge.

$$\begin{aligned} W_{\text{RSUsecco}}(1, \frac{3}{2}) &= W_{\text{RSUsecco}} - [ W_{\text{gas}}(1, \frac{3}{2}) - B(1, \frac{3}{2}) ] = \\ &= 1543,75 - (10,231 - 2,05) = 1535,57 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, \frac{3}{2}) = 1535,57 \cdot \frac{35}{65} = 826,85 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{H}_2\text{O}}(1, \frac{3}{2}) &= \text{contenuto di acqua nel rifiuto} = U_{\text{RSU}}(1, \frac{3}{2}) + I(1, \frac{3}{2}) - B(1, \frac{3}{2}) - \text{Vap}(1, \frac{3}{2}) = \\ &= 837,4 + 990 - 2,05 - 0,0765 = 1825,3 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ora si può calcolare il peso del materiale sovraincombente il baricentro dello strato di cui si intende calcolare la capacità di campo:

$$\begin{aligned} W_{\text{MS}}(1, \frac{3}{2}) &= W_{\text{MRumido}} + \frac{1}{2} \cdot [ W_{\text{RSUsecco}}(1, \frac{3}{2}) + W_{\text{H}_2\text{O}}(1, \frac{3}{2}) ] = \\ &= 900 + \frac{1}{2} \cdot [ 1535,57 + 1825,3 ] = 2580,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

E la capacità di campo risulta dalla 4.07:

$$CC(1, \frac{3}{2}) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(1, \frac{3}{2})}{4500 + W_{\text{MS}}(1, \frac{3}{2})} = 0,4$$

Da qui è possibile calcolare la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere:

$$U_{\text{ass}}(1, \frac{3}{2}) = CC(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{\text{RSUsecco}}(1, \frac{3}{2}) = 0,4 \cdot 1535,57 = 614,23 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RSU}(1, \frac{3}{2}) = U_{RSU}(1, \frac{3}{2}) - U_{ass}(1, \frac{3}{2}) = 826,85 - 614,23 = 212,62 \text{ kg}$$

E con la 4.02 si ricava il percolato prodotto dal primo strato dopo il primo anno e mezzo:

$$\begin{aligned} L_r(1, \frac{3}{2}) &= I(1, \frac{3}{2}) + \Delta U_{RS}(1, \frac{3}{2}) - B(1, \frac{3}{2}) - V_{ap}(1, \frac{3}{2}) = \\ &= 990 + 212,62 - 2,05 - 0,0765 = 1200,5 \text{ kg} = 1,2005 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

## SECONDO STRATO

Trascorsi tre anni anche il secondo strato è completato e  $I(1,3) = L_r(1, \frac{3}{2})$ . Nel primo strato il processo anaerobico produce circa 8,145 Nm<sup>3</sup>/t di biogas:

$v(1, 3) = (5,09 + 6,11/2) = 8,145 \text{ Nm}^3/\text{t}$  (produzione in un anno e mezzo ponderata considerando un andamento lineare)

$$V_{gas}(1, 3) = v(1, 3) \cdot W_{RSU_{secco}}(1, \frac{3}{2}) = 8,145 \cdot 1,53557 = 12,5 \text{ Nm}^3$$

$$W_{gas}(1, 3) = V_{gas}(1, 3) \cdot \rho_{gas} = 12,5 \cdot 1,3 = 16,25 \text{ kg}$$

La produzione specifica volumetrica di biogas è 0,053 Nm<sup>3</sup>/kg, e il consumo specifico di acqua per Nm<sup>3</sup> di biogas prodotto risulta pari a:

$$C_{H_2O}(\text{biogas}) = \frac{C_{H_2O}(\text{R.S.U})}{0,043} = 0,26 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$B(1, 3) = C_{H_2O}(\text{biogas}) \cdot V_{gas}(1, 3) = 0,26 \cdot 12,5 = 3,25 \text{ kg}$$

$$V_{ap}(1, 3) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{gas}(1, 3) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 12,5 = 0,12 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{RSU_{secco}}(1,3) &= W_{RSU_{secco}}(1, \frac{3}{2}) - [ W_{gas}(1, 3) - B(1, 3) ] = \\ &= 1535,6 - (16,25 - 3,25) = 1522,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{RSU}(1, 3) = U_{ass}(1, \frac{3}{2}) = 614,2 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{H_2O}(1, 3) &= U_{RSU}(1, 3) + I(1, 3) - B(1, 3) - V_{ap}(1, 3) = \\ &= 614,2 + 1200,5 - 3,25 - 0,12 = 1811 \text{ kg} \end{aligned}$$

Si calcola nuovamente il peso del materiale sovraincombente:

$$W_{MS}(1, 3) = 2 \cdot W_{MRumido} + W_{RSUsecco}(2, 3) + U_{ass}(2, 3) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(1, 3) + W_{H_2O}(1, 3)] =$$

$$= 1800 + 1535,6 + 614,2 + \frac{1}{2} \cdot [1522,6 + 1811] = 5616,6 \text{ kg}$$

E la capacità di campo risulta come di seguito:

$$CC(1, 3) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(1,3)}{4500 + W_{MS}(1,3)} = 0,3$$

E la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere risulta:

$$U_{ass}(1, 3) = CC(1, 3) \cdot W_{RSUsecco}(1, 3) = 0,3 \cdot 1522,6 = 456,8 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RS}(1, 3) = U_{RSU}(1, 3) - U_{ass}(1, 3) = 614,2 - 456,8 = 157,4 \text{ kg}$$

Ricorrendo alla 4.02 si ricava nuovamente il percolato prodotto dal primo strato dopo 3 anni:

$$L_r(1, 3) = I(1, 3) + \Delta U_{RS}(1, 3) - B(1, 3) - Vap(1, 3) =$$

$$= 1200,5 + 157,4 - 3,25 - 0,12 = 1354,5 \text{ kg} = 1,3545 \text{ m}^3$$

### TERZO STRATO

Trascorsi i 4 anni anche l'ultimo strato è completato, e  $I(1, 4) = L_r(1, 3)$ . Nel primo strato il processo anaerobico produce  $4,26 \text{ Nm}^3/\text{t}$  di biogas. Siccome l'ultimo strato è di 2 m vanno ripetute alcune valutazioni:

$$W_{MRumido}(3, 4) = \text{peso umido del materiale di ricoprimento} = y_{MR} \cdot h_{MR} \cdot S =$$

$$= 1800 \cdot \frac{1}{6} \cdot 2 \cdot 1 = 600 \text{ kg}$$

$$W_{RSUumido}(3, 4) = \text{peso umido del rifiuto} = y_{RSU} \cdot h_{RSU} \cdot S =$$

$$= 950 \cdot \frac{5}{6} \cdot 2 \cdot 1 = 1583,3 \text{ kg}$$

$$W_{RSUsecco}(3, 4) = \text{peso secco del rifiuto} = W_{RSUumido} \cdot 0,65 = 1029,145 \text{ kg}$$

$$U_{RSU}(3, 4) = \text{umidità del rifiuto} = 1583,3 - 1029,145 = 554,155 \text{ kg}$$

Il terzo strato è completato in un anno e la produzione specifica dopo un anno dal deposito del rifiuto è  $2,04 \text{ Nm}^3/\text{t}$ :

$$V_{gas}(3, 4) = 2,04 \cdot 1,029145 = 2,01 \text{ Nm}^3$$

$$C_{H_2O}(\text{biogas}(3,4)) = \frac{C_{H_2O}(\text{R.S.U})}{0,053} = 0,26 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$B(3, 4) = 0,26 \cdot 2,01 = 0,52 \text{ kg} \quad \text{questo contributo è trascurabile}$$

$$\text{Vap}(3, 4) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 2,01 = 0,2 \text{ kg} \quad \text{questo contributo è trascurabile}$$

$$\begin{aligned} W_{H_2O}(3, 4) &= U_{RSU}(3, 4) + I(3, 4) - B(3, 4) - \text{Vap}(3, 4) = \\ &= 554 + 646 = 1200 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{MS}(3, 4) &= W_{MRumido}(3, 4) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(3, 4) + W_{H_2O}(3, 4)] = \\ &= 600 + \frac{1}{2} \cdot [1029 + 1200] = 2229 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$CC(3, 4) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(3,4)}{4500 + W_{MS}(3,4)} = 0,42$$

$$U_{ass}(3,4) = CC(3, 4) \cdot W_{RSUsecco}(3, 4) = 432 \text{ kg}$$

$$V_{gas}(1, 4) = v(1, 4) \cdot W_{RSUsecco}(1, 3) = 4,26 \cdot 1,5226 = 6,5 \text{ Nm}^3$$

$$W_{gas}(1, 4) = V_{gas}(1, 4) \cdot \rho_{gas} = 6,65 \cdot 1,3 = 8,45 \text{ kg}$$

La produzione specifica volumetrica di biogas è 4,26 Nm<sup>3</sup>/t, e il consumo di acqua per Nm<sup>3</sup> di biogas prodotto risulta pari a:

$$B(1, 4) = C_{H_2O}(\text{biogas}) \cdot V_{gas}(1, 4) = 0,26 \cdot 6,5 = 1,7 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(1, 4) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{gas}(1, 4) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 6,5 = 0,06 \text{ kg} \quad \text{è trascurabile}$$

$$\begin{aligned} W_{RSUsecco}(1, 4) &= W_{RSUsecco}(1, 3) - [W_{gas}(1, 4) - B(1, 4)] = \\ &= 1522 - (8,45 - 1,7) = 1515,25 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{RSU}(1, 4) = U_{ass}(1, 3) = 457 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{H_2O}(1, 4) &= \text{contenuto di acqua nel rifiuto} = \\ &= U_{RSU}(1, 4) + I(1, 4) - B(1, 4) - \text{Vap}(1, 4) = 457 + 1354,5 = 1811 \text{ kg} \end{aligned}$$

Si calcola nuovamente il peso del materiale sovraincombente:

$$\begin{aligned}
 W_{MS}(1, 4) &= 2 \cdot W_{MRumido} + W_{MRumido}(3, 4) + W_{RSUsecco}(2, 4) + U_{ass}(2, 4) + W_{RSUsecco}(3, 4) + \\
 &+ U_{ass}(3, 4) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(1, 4) + W_{H_2O}(1, 4)] = \\
 &= 1800 + 600 + 1522,6 + 457 + 1029 + 432 + \frac{1}{2} \cdot [1515,25 + 1811] = 7503,7 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

E la capacità di campo risulta come di seguito:

$$CC(1, 4) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(1,4)}{4500 + W_{MS}(1,4)} = 0,256$$

E la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere risulta:

$$U_{ass}(1, 4) = CC(1, 4) \cdot W_{RSUsecco}(1, 4) = 0,256 \cdot 1515,25 = 388 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RS}(1, 4) = U_{RSU}(1, 4) - U_{ass}(1, 4) = 457 - 388 = 69 \text{ kg}$$

Con la 4.02 si ricava infine il percolato prodotto dal primo strato dopo 4 anni:

$$\begin{aligned}
 L_r(1, 4) &= I(1, 4) + \Delta U_{RS}(1, 4) - B(1, 4) - Vap(1, 4) = \\
 &= 1354,5 + 69 - 1,7 - 0,06 = 1421,7 \text{ kg} = 1,4217 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

E' evidente che la produzione di biogas non ha effetti significativi sulla produzione di percolato, che quindi risulta influenzato unicamente dalla piovosità.

In fase attiva risulta pertanto la produzione di percolato in tabella 4.22:

**Tabella 4.22: gestione anaerobica, produzione di percolato in fase attiva**

Anni	Percolato prodotto (m <sup>3</sup> prodotti/m <sup>2</sup> di superficie)
1,5	1,2005
3	1,3545
4	1,4217

Dopo la fine del quarto anno gli spazi per il conferimento sono esauriti, si passa quindi alla fase passiva della gestione, e il calcolo delle piogge efficaci viene effettuato attraverso la stima dei termini di ruscellamento ed evotraspirazione (anche se quest'ultimo fenomeno rappresenta un'aliquota molto ridotta rispetto ad altri termini). Con riferimento ai valori di piovosità mensile inseriti, adottando coefficienti di ruscellamento corrispondenti a pendenze minori del 10% (la pendenza delle scarpate fuori terra si assume del 6%) di un terreno di ricoprimento con granulometria di argilla limosa, è possibile ricavare in tabella 4.23 i ruscellamenti mensili come aliquote delle piovosità con la formula 4.03:

**Tabella 4.23: ruscellamenti mensili espressi come frazioni della piovosità**

<b>Mese</b>	<b>Piovosità mensile [mm]</b>	<b>Coefficienti di ruscellamento c</b>	<b>Ruscellamento mensile [mm]</b>
Gennaio	41	0,576	23,6
Febbraio	49	0,648	31,8
Marzo	56	0,515	28,8
Aprile	55	0,349	19,2
Maggio	58	0,320	18,6
Giugno	43	0,133	5,7
Luglio	38	0,104	3,95
Agosto	50	0,104	5,2
Settembre	47	0,166	7,8
Ottobre	82	0,432	35,4
Novembre	77	0,504	38,8
Dicembre	50	0,576	28,8

Ora si calcola l'indice termico annuo  $I_t$  per valutare l'evotraspirazione potenziale, con le temperature medie mensili inserite in tabella 4.24 si ottiene il seguente valore:

**Tabella 4.24: temperature medie mensili**

<b>Mese</b>	<b>T media [°C]</b>
Gennaio	1,5
Febbraio	4,5
Marzo	9
Aprile	12
Maggio	16,5
Giugno	20,5
Luglio	23
Agosto	22,5
Settembre	19
Ottobre	13,5
Novembre	6,5
Dicembre	3

$$I_t = \sum_1^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514} = 55,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Considerando la durata media dell'insolazione diurna alla latitudine 44°, si possono ricavare i valori di  $C_i$  in tabella 4.25:

**Tabella 4.25: valori dei coefficienti  $C_i$  in funzione dell'insolazione media diurna**

Mese	durata media dell'insolazione diurna (lat. 44°) [ore]	$C_i$
Gennaio	9,2	0,8
Febbraio	10,8	0,9
Marzo	12	1
Aprile	13,2	1,1
Maggio	14,4	1,2
Giugno	15,6	1,3
Luglio	14,4	1,2
Agosto	14,4	1,2
Settembre	13,2	1,1
Ottobre	10,8	0,9
Novembre	9,2	0,8
Dicembre	9,2	0,8

Quindi usando la formula di Thorntwaite (4.04) si ottengono i valori di evotraspirazione potenziale in tabella 4.26:

$$ET = 16 \cdot \frac{10 \cdot T_i}{I_t} \cdot C_i$$

**Tabella 4.26: valori di evotraspirazione potenziale mensili**

Mese	Evotraspirazione potenziale [mm]
Gennaio	3,45
Febbraio	11,65
Marzo	25,9
Aprile	38
Maggio	57
Giugno	76,7
Luglio	79,4
Agosto	77,7

Settembre	60
Ottobre	35
Novembre	15
Dicembre	6,9

$$P_e = P - R - ET < 0 \quad (4.27)$$

La quantità di acqua evotraspirata nei mesi estivi è superiore alla piovosità media di questi, apparentemente ci si trova quindi in situazione di deficit idrologico, tuttavia va considerato che la pioggia caduta e l'evotraspirazione sono fenomeni caratterizzati da durate diverse, poiché il primo si riferisce alla pioggia che cade in tutto il mese, ma solo nei giorni piovosi, mentre il secondo è ripartito in tutti i giorni del mese. Secondo questo ragionamento, per valutare meglio la differenza tra pioggia caduta e l'aliquota evotraspirata si ragiona su base giornaliera, ovvero tenendo conto dei giorni di pioggia si valuta l'evotraspirazione effettiva in quel numero di giorni, si ottengono quindi i risultati in tabella 4.27:

**Tabella 4.27: evotraspirazione effettiva mensile, calcolata tenendo conto dei giorni di pioggia**

Mese	Piovosità media mensile [mm]	Giorni di pioggia	Evotraspirazione potenziale [mm]	Evotraspirazione effettiva [mm]
Gennaio	41	9	3,45	1
Febbraio	49	6	11,65	2,3
Marzo	56	7	25,9	6
Aprile	55	6	38	7,6
Maggio	58	6	57	11,4
Giugno	43	6	76,7	15,3
Luglio	38	4	79,4	10,6
Agosto	50	5	77,7	13
Settembre	47	5	60	10
Ottobre	82	9	35	10,5
Novembre	77	7	15	3,5
Dicembre	50	11	6,9	2,5

Per cui si ricavano i risultati in tabella 4.28:

**Tabella 4.28: pioggia efficace mensile, calcolata tenendo conto dell'evotraspirazione effettiva**

Mese	Piovosità mensile [mm]	Ruscaldamento mensile [mm]	Evotraspirazione effettiva [mm]	Pioggia efficace [mm]
Gennaio	41	23,6	1	16,4
Febbraio	49	31,8	2,3	15
Marzo	56	28,8	6	21,2
Aprile	55	19,2	7,6	28,2
Maggio	58	18,6	11,4	28
Giugno	43	5,7	15,3	22
Luglio	38	3,95	10,6	23,5
Agosto	50	5,2	13	32
Settembre	47	7,8	10	29,2
Ottobre	82	35,4	10,5	36,1
Novembre	77	38,8	3,5	34,7
Dicembre	50	28,8	2,5	18,7

La pioggia efficace annua risulta quindi di 305 mm/anno. Vi è presenza di una barriera impermeabile (argilla) di mezzo metro, per cui viene a determinarsi un processo di filtrazione governato dalla legge di Darcy, viene a formarsi quindi una falda sospesa che permea nella zona sottostante. Considerando un'altezza del battente  $H = 305$  mm, spessore dello strato  $h_s = 50$  cm, e coefficiente di permeabilità di quest'ultimo  $K_s = 10^{-8}$  m/s si ha un afflusso in discarica pari a:

$$q = \frac{I}{A} = K_s \cdot \frac{H}{h_s} = 192,4 \frac{\text{mm}}{\text{anno m}^2} = 192,4 \frac{\text{kg}}{\text{anno m}^2} = 192,4 \frac{\text{l}}{\text{anno m}^2}$$

### TERZO STRATO

Per lo strato di rifiuti superficiale, ovvero il terzo strato, tenendo conto dello strato di sigillatura di 50 cm e il cui peso specifico  $\rho_a$  sia  $2000 \text{ kg/m}^3$ , la produzione di biogas  $v(3, 5)$  è  $6,11 \text{ Nm}^3/\text{t}$  (equivale alla produzione specifica di biogas dopo due anni dal deposito), risulta quanto segue:

$$V_{\text{gas}}(3, 5) = 6,11 \cdot 1,029145 = 6,29 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas}}(3, 5) = 6,29 \cdot 1,3 = 8,18 \text{ kg}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{biogas}}(3,5) = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,053} = 0,26 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$B(3, 5) = 0,26 \cdot 6,29 = 1,6 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(3, 5) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 6,29 = 0,06 \text{ kg è trascurabile}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) &= W_{\text{RSUsecco}}(3, 4) - [W_{\text{gas}}(3, 5) - B(3, 5)] = \\ &= 1029 - [8,18 - 1,6] = 1022,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{RSU}(3, 5) = U_{ass}(3, 4) = 432 \text{ kg}$$

$$I(3, 5) = 192,4 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$W_{H_2O}(3, 5) = U_{RSU}(3, 5) + I(3, 5) - B(3, 5) - Vap(3, 5) = \\ = 432 + 192,4 - 1,6 - 0,06 = 622,7 \text{ kg}$$

$$W_{MS}(3, 5) = W_{MRumido}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(3, 5) + W_{H_2O}(3, 5)] = \\ = 600 + \frac{1}{2} \cdot [1022,4 + 622,7] = 1422,6 \text{ kg}$$

$$CC(3, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(3,5)}{4500+W_{MS}(3,5)} = 0,468$$

$$U_{ass}(3, 5) = CC(3, 5) \cdot W_{RSUsecco}(3, 5) = 478,5 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{RSU}(3, 5) = U_{RSU}(3, 5) - U_{ass}(3, 5) = 432 - 478,5 = -46,5 \text{ kg}$$

Con la 4.02 si ricava quindi la produzione di percolato del terzo strato al quinto anno:

$$L_r(3, 5) = I(3, 5) + \Delta U_{RS}(3, 5) - B(3, 5) - Vap(3, 5) = \\ = 192,4 - 46,5 - 1,6 - 0,06 = 144,2 \text{ kg} = 0,1442 \text{ m}^3$$

## SECONDO STRATO

$$V_{gas}(2, 5) = V_{gas}(1, 4) = 6,5 \text{ Nm}^3$$

$$W_{gas}(2, 5) = W_{gas}(1, 4) = 27,13 \cdot 1,3 = 8,45 \text{ kg}$$

$$B(2, 5) = B(1, 4) = 0,26 \cdot 6,5 = 1,7 \text{ kg}$$

$$Vap(2, 5) = Vap(1, 4) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 6,5 = 0,06 \text{ kg trascurabile}$$

$$W_{RSUsecco}(2, 5) = W_{RSUsecco}(1, 4) = 1515,25 \text{ kg}$$

$$U_{RSU}(2, 5) = U_{RSU}(1, 4) = 457 \text{ kg}$$

$$L_r(3, 5) = 144,2 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$W_{H_2O}(2, 5) = U_{RSU}(2, 5) + L_r(3, 5) - B(2, 5) - Vap(2, 5) = \\ = 457 + 144,2 - 1,7 - 0,06 = 599,4 \text{ kg}$$

$$W_{MS}(2, 5) = W_{MRumido}(2, 5) + W_{MRumido}(3, 5) + W_{RSUsecco}(3, 5) + U_{ass}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(2, \\ 5) + W_{H_2O}(2, 5)] = \\ = 900 + 600 + 1022,4 + 478,5 + \frac{1}{2} \cdot [1515,25 + 599,4] = 4058,2 \text{ kg}$$

$$CC(2, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(2,5)}{4500+W_{MS}(2,5)} = 0,34$$

$$U_{ass}(2, 5) = CC(2, 5) \cdot W_{RSUsecco}(2, 5) = 515,2 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{RSU}(2, 5) = U_{RSU}(2, 5) - U_{ass}(2, 5) = 457 - 515,2 = -58,2 \text{ kg}$$

Attraverso la consueta 4.02 si ricava il percolato prodotto dal secondo strato al quinto anno:

$$L_r(2, 5) = L_r(3, 5) + \Delta U_{RS}(2, 5) - B(2, 5) - Vap(2, 5) = \\ = 144,2 - 58,2 - 1,7 - 0,06 = 84,2 \text{ kg} = 0,0842 \text{ m}^3$$

## PRIMO STRATO

La produzione di biogas durante il quinto anno è di  $3,58 \text{ Nm}^3/\text{t}$ , quindi:

$$V_{\text{gas}}(1, 5) = 3,58 \cdot 1,51525 = 5,42 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas}}(1, 5) = 5,42 \cdot 1,3 = 7 \text{ kg}$$

$$B(1, 5) = 0,26 \cdot 5,42 = 1,4 \text{ kg}$$

$$V_{\text{ap}}(1, 5) = 0,54 \cdot 0,018 \cdot 5,42 = 0,05 \text{ kg}$$

$$W_{\text{RSUsecco}}(1, 5) = W_{\text{RSUsecco}}(1, 4) - [W_{\text{gas}}(1, 5) - B(1, 5)] = \\ = 1515,25 - [7 - 1,4] = 1509,7 \text{ kg}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, 5) = U_{\text{ass}}(1, 4) = 388 \text{ kg}$$

$$L_r(2, 5) = 84,2 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 5) = U_{\text{RSU}}(1, 5) + L_r(2, 5) - B(1, 5) - V_{\text{ap}}(1, 5) = \\ = 388 + 84,2 - 1,4 - 0,05 = 470,7 \text{ kg}$$

$$W_{\text{MS}}(1, 5) = 2 \cdot W_{\text{MRumido}}(1, 5) + W_{\text{MRumido}}(3, 5) + \rho_a \cdot h_s + W_{\text{RSUsecco}}(2, 5) + U_{\text{ass}}(2, 5) + \\ + W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) + U_{\text{ass}}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSUsecco}}(1, 5) + W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 5)] = \\ = 1800 + 600 + 1000 + 1515,25 + 515,2 + 1022,4 + 478,5 + \frac{1}{2} \cdot [1509,7 + 470,7] = 7921,55 \text{ kg}$$

$$CC(1, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(1,5)}{4500 + W_{\text{MS}}(1,5)} = 0,25$$

$$U_{\text{ass}}(1, 5) = CC(1, 5) \cdot W_{\text{RSUsecco}}(1, 5) = 377 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{\text{RSU}}(1, 5) = U_{\text{RSU}}(1, 5) - U_{\text{ass}}(1, 5) = 388 - 377 = 11 \text{ kg}$$

Si calcola infine la produzione di percolato del primo strato al quinto anno:

$$L_r(1, 5) = L_r(2, 5) + \Delta U_{\text{RS}}(1, 5) - B(1, 5) - V_{\text{ap}}(1, 5) = \\ = 84,2 + 11 - 1,4 - 0,05 = 94 \text{ kg} = 0,094 \text{ m}^3$$

Al termine del quinto anno la produzione di percolato ammonta a  $94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{anno}}$ , cioè circa  $2,57 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$ . Il valore trovato corrisponde circa all'11% della piovosità annua, ed è in linea con

la letteratura che suggerisce valori che vanno tra  $2-10 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$  per piovosità annue tra 600 e 900 mm.

Per modellare la produzione di percolato negli anni successivi al primo anno di chiusura si può adottare il modello esponenziale decrescente descritto in precedenza:

$$P_k = a e^{-ct_k}$$

Dove:

- Il parametro  $a = 2 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}} = 0,094 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{anno}}$  sia la produzione di percolato un anno dopo il termine del capping;
- Il coefficiente sia  $c = 0,1$  da stime sperimentali;

Per cui si hanno i risultati in tabella 4.29 l'andamento come in figura 4.15:

**Tabella 4.29: gestione anaerobica,  
percolato prodotto in 40 anni**

<b>Anni</b>	<b>c · t<sub>k</sub></b>	<b>Percolato prodotto [m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · anno)]</b>
1,5	0,15	1,2005
3	0,3	1,3545
4	0,4	1,4217
5	0,5	0,0940
6	0,6	0,0516
7	0,7	0,0467
8	0,8	0,0422
9	0,9	0,0382
10	1	0,0346
11	1,1	0,0313
12	1,2	0,0283
13	1,3	0,0256
14	1,4	0,0232
15	1,5	0,0210
16	1,6	0,0190
17	1,7	0,0172
18	1,8	0,0155
19	1,9	0,0141
20	2	0,0127
21	2,1	0,0115
22	2,2	0,0104
23	2,3	0,0094
24	2,4	0,0085
25	2,5	0,0077
26	2,6	0,0070
27	2,7	0,0063
28	2,8	0,0057
29	2,9	0,0052
30	3	0,0047

31	3,1	0,0042
32	3,2	0,0038
33	3,3	0,0035
34	3,4	0,0031
35	3,5	0,0028
36	3,6	0,0026
37	3,7	0,0023
38	3,8	0,0021
39	3,9	0,0019
40	4	0,0017



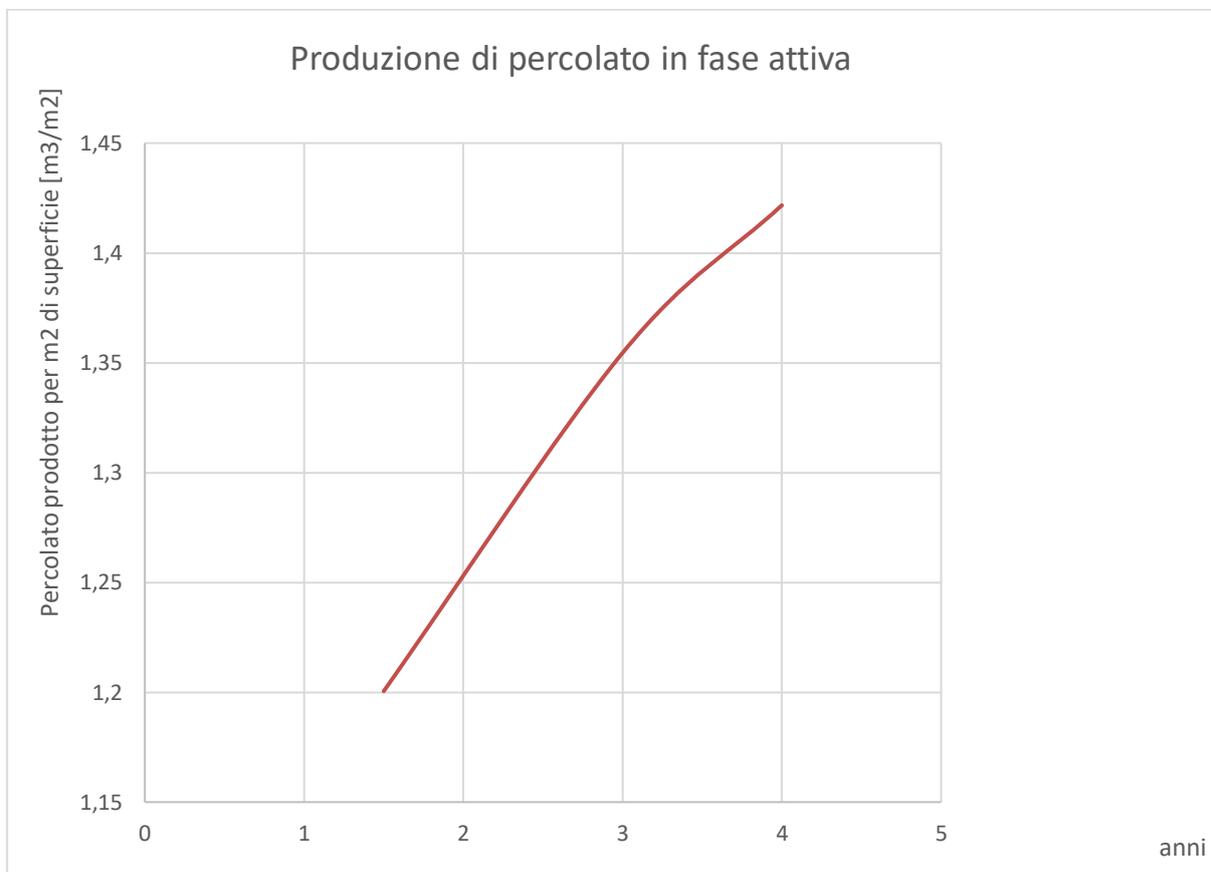
Figura 4.15: gestione anaerobica, andamento della produzione di percolato per m<sup>2</sup> di superficie in 40 anni

Di cui in fase attiva come in tabella 4.22 e in figura 4.16:

Tabella 4.22: gestione anaerobica, produzione di percolato in fase attiva

Anni	Percolato prodotto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> di superficie)
------	---

1,5	1,2005
3	1,3545
4	1,4217



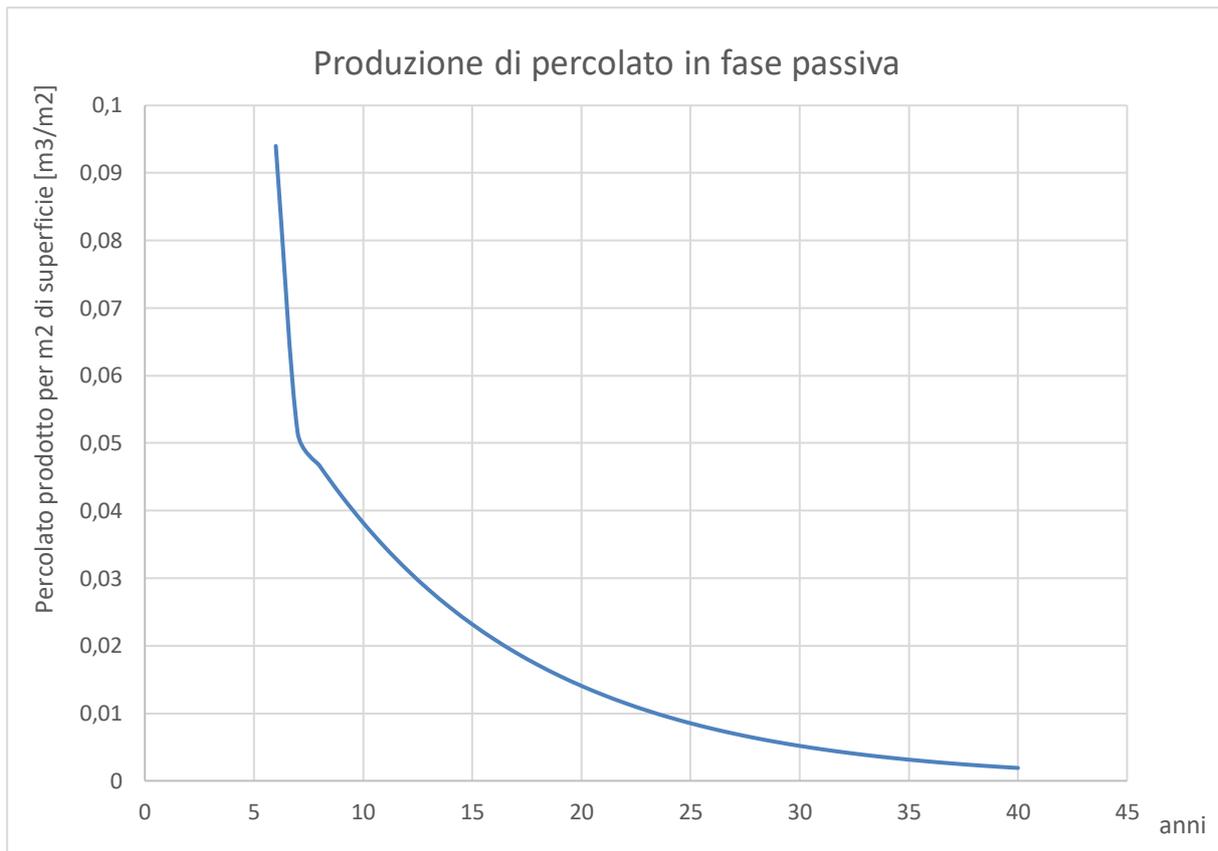
**Figura 4.16:** gestione anaerobica, andamento della produzione di percolato in fase attiva

Mentre in fase passiva si hanno i risultati in tabella 4.30 e l'andamento in figura 4.17:

**Tabella 4.30:** produzione di percolato in fase passiva

Anni	Percolato prodotto [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>superficie</sub> ]
5	0,0940
6	0,0516
7	0,0467
8	0,0422
9	0,0382
10	0,0346
11	0,0313

12	0,0283
13	0,0256
14	0,0232
15	0,0210
16	0,0190
17	0,0172
18	0,0155
19	0,0141
20	0,0127
21	0,0115
22	0,0104
23	0,0094
24	0,0085
25	0,0077
26	0,0070
27	0,0063
28	0,0057
29	0,0052
30	0,0047
31	0,0042
32	0,0038
33	0,0035
34	0,0031
35	0,0028
36	0,0026
37	0,0023
38	0,0021
39	0,0019
40	0,0017



**Figura 4.17: gestione anaerobica, andamento della produzione di percolato in fase passiva**

Come ci si aspetta, in fase attiva il percolato prodotto è molto maggiore che in fase passiva, poiché la presenza del capping riduce drasticamente il quantitativo di acqua infiltrata in discarica. Dopo il primo anno di chiusura risulta che la produzione di percolato è circa il 5% di quello prodotto in fase di riempimento, dopodichè la caduta esponenziale dei valori di produzione fa sì che dopo 15 anni il percolato prodotto sia ridotto al 44% del valore dopo la chiusura. Per arrivare ad una diminuzione del 90% è necessario aspettare oltre 27 anni. A fini pratici, tuttavia, la produzione di percolato stimata dopo il capping raggiunge in breve valori bassissimi, dopo 27 anni si avrebbe una produzione di appena 6 l/m<sup>2</sup>, valore più che accettabile e verosimile, considerando che dopo 30 anni può verificarsi il fenomeno di deterioramento delle barriere di protezione. Seguendo un approccio più realistico, è ragionevole assumere che non vi sia alcuna infiltrazione di acqua dopo il completamento del capping, in quanto la presenza dello strato drenante soprastante l'argilla consente il rapido allontanamento delle acque di pioggia infiltratesi nel terreno, rispetto alla fenomenologia di filtrazione attraverso il materiale argilloso.

### 4.2.3 Gestione aerobica: produzione di percolato in fase attiva e passiva

I dati di partenza sono sempre gli stessi, quindi:

- La discarica in oggetto è costituita da 3 strati sovrapposti, i primi due di  $h_{1,2} = 3$  m e completati nell'arco di 1,5 anni ciascuno, mentre l'ultimo di  $h_3 = 2$  m è riempito in 1 anno;
- I rifiuti depositati hanno un peso specifico di  $950 \text{ kg/m}^3$ ;
- Il loro contenuto di umidità è del 35%;
- La composizione dei rifiuti è come in tabella 4.19:

Tabella 4.19: composizione stimata del rifiuto

Componente	Peso %	H <sub>2</sub> O % peso	% Peso secco			
			C	H	O	N
Inerti vari	88	4	0,5	0,1	0,4	< 0,1
Residui alimentari	3,20	80	48	6,4	37,6	2,6
rifiuti vegetali e altri cellulosici	2,80	80	47,8	6	38	3,4
carta	2,40	10	43,5	6	44	0,3
cartone	2	8	44	5,9	44,6	0,3
tessili	0,80	8	55,5	8,2	20,4	7,2
legno	0,80	40	49,5	6	42,7	0,2

- Il peso specifico del materiale di ricoprimento sia  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ ;
- Sia il materiale di ricoprimento intermedio che quello finale sono a capacità di campo, per cui  $\Delta U_c = 0$  e  $\Delta U_r = 0$ ;
- La pendenza della superficie a discarica ultimata sia del 6%;
- Per semplicità si usa una base di calcolo con superficie unitaria  $S_u = 1 \text{ m}^2$ , per cui tutte le stime sono calcolate per unità di superficie;

La piovosità efficace  $P_e$  è di 646 mm/anno, quindi in un anno e mezzo 990 mm/anno e la piovosità media e la temperatura media siano distribuite come in tabella 4.20:

Tabella 4.20: piovosità media mensile e temperature medie mensili della zona

Mese	T[°C]	P[mm/mese]
Gennaio	1,5	41
Febbraio	4,5	49
Marzo	9	56

Aprile	12	55
Maggio	16,5	58
Giugno	20,5	43
Luglio	23	38
Agosto	22,5	50
Settembre	19	47
Ottobre	13,5	82
Novembre	6,5	77
Dicembre	3	50

Fatte queste ipotesi, l'equazione di bilancio 4.02 si riduce alla forma seguente:

$$L_r = I + \Delta U_{RS} - V_{ap} - B \quad (4.24)$$

Vengono considerate nulle le infiltrazioni nel corpo della discarica da parte di acque di superficie o di profondità e le perdite attraverso l'impermeabilizzazione.

Si adotta una notazione a doppio pedice precedente, dove il primo rappresenta il numero dello strato, mentre il secondo gli anni trascorsi a partire dall'inizio del riempimento;

Il modello idraulico quindi assimila la produzione di percolato in discarica ad un sistema composto da serbatoi disposti in cascata pari al numero degli strati. E' possibile quindi seguire l'evoluzione nel tempo solo dei rifiuti depositati al primo anno, che costituiscono cioè il primo strato, e ricondurre i calcoli di tutti gli altri strati a questo.

Prendendo come riferimento un rapporto 5/1 tra altezza dei rifiuti e del ricoprimento, a cui corrisponde quindi 1/6 dell'altezza totale dello strato, si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} W_{MRumido} &= \text{peso umido del materiale di ricoprimento} = y_{MR} \cdot h_{MR} \cdot S = \\ &= 1800 \cdot \frac{1}{6} \cdot 3 \cdot 1 = 900 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{RSUumido} &= \text{peso umido del rifiuto} = y_{RSU} \cdot h_{RSU} \cdot S = \\ &= 950 \cdot \frac{5}{6} \cdot 3 \cdot 1 = 2375 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$W_{RSUsecco} = \text{peso secco del rifiuto} = W_{RSUumido} \cdot 0,65 = 1543,75 \text{ kg}$$

$$U_{RSU} = \text{umidità del rifiuto} = 2375 - 1543,75 = 831,25 \text{ kg}$$

La portata massica entrante  $Q_e$  nel corso di ciascun anno di esercizio è data da:

$$Q_{e0} = P_e \cdot S \cdot y_{H_2O} = 0,054 \cdot 1 \cdot 1000 = 646 \text{ kg/anno}$$

Mentre la quantità di acqua in un anno e mezzo risulta:  $Q_e = 990 \text{ kg}$

A differenza della reazione anaerobica, nella fermentazione aerobica si produce vapore acqueo, inoltre visto che l'aerazione del sistema non è ideale, bisogna considerare che si verifichino anche fenomeni anaerobici, seppur in quantità molto minore. Per ricavare la produzione di vapore e il consumo di acqua, bisogna ricorrere alla stechiometria. Per una tonnellata di rifiuto la composizione in kg e le frazioni velocemente e lentamente putrescibili risultano come in tabella 4.21:

**Tabella 4.21: composizione massica del rifiuto**

Componente	Peso secco kg	C kg	H kg	O kg	N kg
<b>SORB</b>					
Residui alimentari	6,4	3,072	0,4096	2,4064	0,1664
Carta	21,6	9,396	1,296	9,504	0,0648
Cartone	18,4	8,096	1,0856	8,2064	0,0552
Rifiuto vegetale	5,6	2,6768	0,336	2,128	0,1904
<b>Totale</b>	<b>52</b>	<b>23,2408</b>	<b>3,1272</b>	<b>22,2448</b>	<b>0,4768</b>
<b>SOLB</b>					
tessili	7,36	4,0848	0,60352	1,50144	0,52992
legno	4,8	2,376	0,288	2,0496	0,0096
<b>Totale</b>	<b>12,16</b>	<b>6,4608</b>	<b>0,89152</b>	<b>3,55104</b>	<b>0,53952</b>

Dove SORB e SOLB sono rispettivamente la frazione velocemente putrescibile e lentamente putrescibile dei rifiuti. Si risale alla composizione della SORB e della SOLB in termini di kg-moli noti il peso atomico e la composizione chimica:

### SORB

$$\text{moli}_C = \frac{23,2408}{12} = 1,94 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_H = \frac{3,1272}{1} = 3,13 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_O = \frac{22,2448}{16} = 1,39 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_N = \frac{0,4768}{14} = 0,034 \text{ mol}$$

### SOLB

$$\text{moli}_C = \frac{6,4608}{12} = 0,54 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_H = \frac{0,89152}{1} = 0,89 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_O = \frac{3,55104}{16} = 0,22 \text{ mol}$$

$$\text{moli}_N = \frac{0,53952}{14} = 0,04 \text{ mol}$$

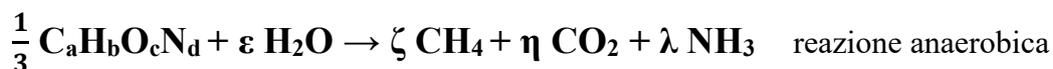
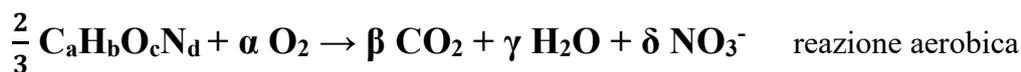
E' possibile quindi scriverne le formule stechiometriche:



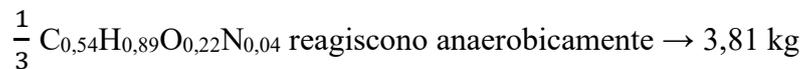
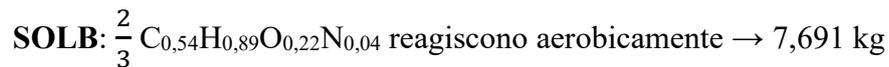
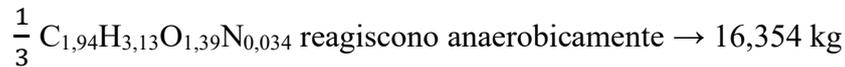
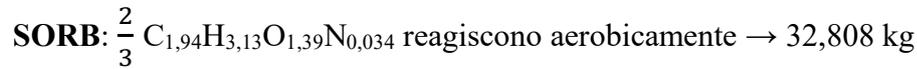
Nel sistema avvengono le seguenti reazioni:



Prima di ricavare i coefficienti stechiometrici è necessaria una premessa: come anticipato nel calcolo della produzione di biogas con gestione aerobica, si può ipotizzare che il trattamento con aria riduca la quantità di rifiuto reagibile anaerobicamente dei 2/3, quindi solo 1/3 del rifiuto reagisce per fermentazione anaerobica, mentre 2/3 reagiscono aerobicamente. Per le reazioni possiamo dire che:



Su una tonnellata devono reagire 49 kg di rifiuto per la SORB e 11,45 kg per la SOLB, il resto è inerte e non reagisce. Per le formule stechiometriche SORB e SOLB risultano quindi le seguenti composizioni e masse reagenti:



Detto ciò, per ricavare i valori dei coefficienti stechiometrici si risolvono i due sistemi di equazioni, ottenendo le soluzioni 4.27 e 4.28:

$$\alpha = \frac{4a+b-2c+6d}{4}$$

$$\beta = a \tag{4.27}$$

$$\gamma = \frac{b}{2}$$

$$\delta = d$$

$$\varepsilon = \frac{4x-y-2w+3z}{4}$$

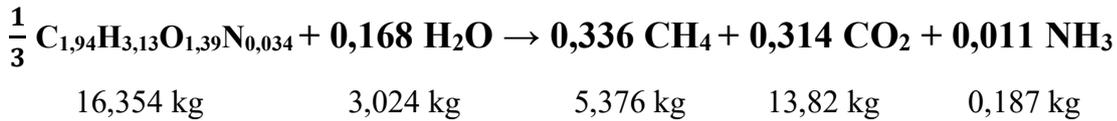
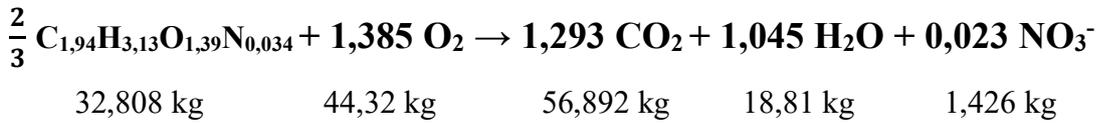
$$\zeta = \frac{4x+y-2w-3z}{8} \tag{4.28}$$

$$\eta = \frac{4x-y+2w+3z}{8}$$

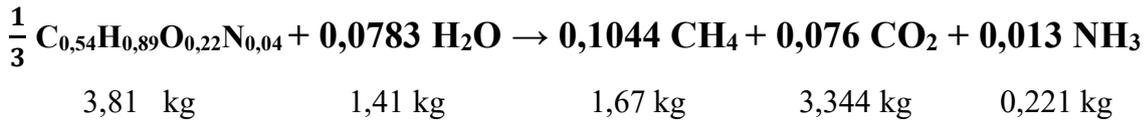
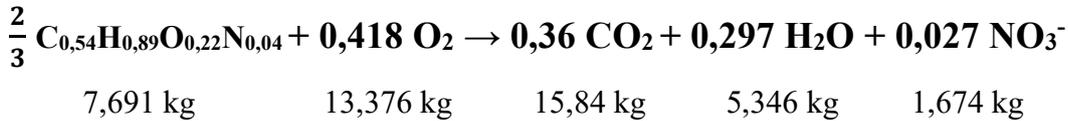
$$\lambda = z$$

Per cui la stechiometria risulta come segue:

### SORB



### SOLB



Ricavata la stechiometria, per proseguire è necessario ricavare la quantità annua di biogas aerobico prodotto, per sapere quanta H<sub>2</sub>O viene prodotta anno per anno. Per effettuare i calcoli è necessario valutare le produzioni progressive e orarie di biogas anaerobico (CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> al 50%) e aerobico (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O circa al 50%). Il modello BIO-5 non fornisce in maniera diretta la produzione aerobica, tuttavia il dato è ricavabile dalla stechiometria. Si ipotizza che tutto il biogas anaerobico prodotto corrisponda in quantità al biogas prodotto con gestione 100% anaerobica ma, invece di essere al 50% in metano, lo è solo all'8%, mentre la CO<sub>2</sub> è al 92%. Il biogas prodotto aerobicamente è invece composto da CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O al 50%, quindi per ricavarne la produzione è necessario scorporare la CO<sub>2</sub> anaerobica da quella aerobica, partendo dall'equazione 4.28 e arrivando alla 4.32:

$$CO_{2tot} = \text{biogas producibile con trattamento anaerobico al 100\%} \cdot 0,92 \text{ [Nm}^3\text{/t]} \quad (4.28)$$

$$CO_{2anaerobica} = \frac{\text{biogas anaerobico prodotto con gestione aerobica}}{2} \text{ [Nm}^3\text{/t]} \quad (4.29)$$

$$CO_{2aerobica} = CO_{2tot} - CO_{2anaerobica} \text{ [Nm}^3\text{/t]} \quad (4.30)$$

E' possibile ricavare l'acqua prodotta dalla stechiometria:

$$H_2O_{prodotta} = \frac{CO_2}{v_{CO_2}} \cdot v_{H_2O} \quad (4.31)$$

$$\text{Biogas aerobico prodotto} = CO_{2aerobica} + H_2O_{prodotta} \text{ [Nm}^3\text{/t]} \quad (4.32)$$

Secondo questa ipotesi, il biogas anaerobico si sviluppa in 40 anni con la composizione in tabella 4.31:

**Tabella 4.31: biogas anaerobico prodotto (CO<sub>2</sub> al 92% e CH<sub>4</sub> all'8%), CO<sub>2</sub> totale prodotta e metano prodotto**

<b>Anni</b>	<b>Biogas prodotto (CO<sub>2</sub> al 92% e CH<sub>4</sub> all'8%) [Nm<sup>3</sup>/t]</b>	<b>CO<sub>2</sub> totale prodotta [Nm<sup>3</sup>/t]</b>	<b>CH<sub>4</sub> prodotto [Nm<sup>3</sup>/t]</b>
1	2,04	1,88	0,17
2	8,15	7,50	0,67
3	13,24	12,18	1,09
4	17,50	16,10	1,44
5	21,08	19,40	1,74
6	24,12	22,19	1,99
7	26,70	24,56	2,20
8	28,91	26,59	2,38
9	30,81	28,35	2,54
10	32,46	29,86	2,68
11	33,89	31,18	2,80
12	35,15	32,34	2,90
13	36,26	33,36	2,99
14	37,24	34,26	3,07
15	38,12	35,07	3,14
16	38,90	35,78	3,21
17	39,59	36,43	3,27
18	40,22	37,01	3,32
19	40,79	37,53	3,37
20	41,31	38,00	3,41
21	41,78	38,44	3,45
22	42,20	38,83	3,48
23	42,59	39,19	3,51
24	42,95	39,51	3,54
25	43,28	39,81	3,57
26	43,57	40,09	3,59
27	43,85	40,34	3,62
28	44,10	40,57	3,64
29	44,33	40,79	3,66
30	44,55	40,98	3,68
31	44,75	41,17	3,69
32	44,93	41,33	3,71

33	45,10	41,49	3,72
34	45,25	41,63	3,73
35	45,39	41,76	3,74
36	45,53	41,88	3,76
37	45,65	42,00	3,77
38	45,76	42,10	3,78
39	45,87	42,20	3,78
40	<b>45,96</b>	42,29	3,79

In tabella 4.32 invece sono ricavate le produzioni di CO<sub>2</sub> e acqua sulla base delle ipotesi precedenti, quindi la produzione di biogas aerobico e la produzione di acqua (presente circa al 50% nel biogas aerobico prodotto).

**Tabella 4.32: valutazione della CO<sub>2</sub> aerobica ed anaerobica per ricavare la produzione di acqua, quindi di biogas aerobico**

Anni	Biogas producibile con trattamento anaerobico al 100% (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	Biogas anaerobico prodotto con gestione aerobica (CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> al 50%) (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	Biogas aerobico prodotto (CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O al 50%) (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	CO <sub>2</sub> prodotta totale (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	CO <sub>2</sub> anaerobica (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	CO <sub>2</sub> aerobica (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]	H <sub>2</sub> O prodotta (produzione progressiva) [Nm <sup>3</sup> /t]
1	2,04	0,34	3,09	1,88	0,17	1,71	1,38
2	8,15	1,35	12,35	7,50	0,67	6,83	5,52
3	13,24	2,18	20,05	12,18	1,09	11,09	8,96
4	17,50	2,89	26,50	16,10	1,44	14,66	11,85
5	21,08	3,48	31,93	19,40	1,74	17,66	14,27
6	24,12	3,98	36,52	22,19	1,99	20,20	16,32
7	26,70	4,41	40,43	24,56	2,20	22,36	18,07
8	28,91	4,77	43,78	26,59	2,38	24,21	19,57
9	30,81	5,08	46,66	28,35	2,54	25,80	20,85
10	32,46	5,36	49,15	29,86	2,68	27,18	21,97
11	33,89	5,59	51,33	31,18	2,80	28,39	22,94
12	35,15	5,80	53,23	32,34	2,90	29,44	23,79
13	36,26	5,98	54,91	33,36	2,99	30,37	24,54
14	37,24	6,15	56,40	34,26	3,07	31,19	25,21
15	38,12	6,29	57,72	35,07	3,14	31,92	25,80
16	38,90	6,42	58,90	35,78	3,21	32,57	26,33
17	39,59	6,53	59,96	36,43	3,27	33,16	26,80

18	40,22	6,64	60,91	37,01	3,32	33,69	27,23
19	40,79	6,73	61,78	37,53	3,37	34,16	27,61
20	41,31	6,82	62,56	38,00	3,41	34,60	27,96
21	41,78	6,89	63,27	38,44	3,45	34,99	28,28
22	42,20	6,96	63,91	38,83	3,48	35,35	28,57
23	42,59	7,03	64,50	39,19	3,51	35,67	28,83
24	42,95	7,09	65,04	39,51	3,54	35,97	29,07
25	43,28	7,14	65,53	39,81	3,57	36,24	29,29
26	43,57	7,19	65,99	40,09	3,59	36,49	29,49
27	43,85	7,24	66,40	40,34	3,62	36,72	29,68
28	44,10	7,28	66,79	40,57	3,64	36,93	29,85
29	44,33	7,32	67,14	40,79	3,66	37,13	30,01
30	44,55	7,35	67,46	40,98	3,68	37,31	30,15
31	44,75	7,38	67,76	41,17	3,69	37,47	30,29
32	44,93	7,41	68,04	41,33	3,71	37,63	30,41
33	45,10	7,44	68,29	41,49	3,72	37,77	30,52
34	45,25	7,47	68,53	41,63	3,73	37,90	30,63
35	45,39	7,49	68,74	41,76	3,74	38,02	30,73
36	45,53	7,51	68,94	41,88	3,76	38,13	30,81
37	45,65	7,53	69,13	42,00	3,77	38,23	30,90
38	45,76	7,55	69,30	42,10	3,78	38,32	30,97
39	45,87	7,57	69,46	42,20	3,78	38,41	31,04
40	<b>45,96</b>	<b>7,58</b>	<b>69,60</b>	42,29	3,79	38,49	31,11

Con le suddette ipotesi e dalla stechiometria la produzione di biogas aerobico ammonta a 69,60 Nm<sup>3</sup>/t.

Si ricavano ora la produzione C<sub>H2O</sub> e il consumo C<sub>H2O</sub> d'acqua:

$$C'_{H_2O}(SORB) = \frac{18,81 \text{ kg}}{32,808 \text{ kg SORB}} = 0,57$$

$$C_{H_2O}(SORB) = \frac{3,024 \text{ kg}}{16,354 \text{ kg SORB}} = 0,185$$

$$C'_{H_2O}(SOLB) = \frac{5,346 \text{ kg}}{7,691 \text{ kg SORB}} = 0,70$$

$$C_{H_2O}(SOLB) = \frac{1,41 \text{ kg}}{3,81 \text{ kg SORB}} = 0,37$$

La SORB costituisce il 5,2% e la SOLB l'1,216% del rifiuto, quindi si calcolano la produzione e il consumo d'acqua medi-pesati:

$$C'_{H_2O}(R.S.U) = 0,052 \cdot 0,57 + 0,01216 \cdot 0,70 = 0,038 \frac{\text{kg H}_2\text{O prodotti}}{\text{kg rifiuto}}$$

$$C_{H_2O}(R.S.U) = 0,052 \cdot 0,185 + 0,01216 \cdot 0,37 = 0,014 \frac{\text{kg H}_2\text{O consumati}}{\text{kg rifiuto}}$$

Il peso specifico del metano è 0,72 kg/Nm<sup>3</sup>, per l'anidride carbonica 1,98 kg/Nm<sup>3</sup>, per il vapore acqueo circa 0,6 kg/Nm<sup>3</sup>, per cui si possono ricavare dalla stechiometria i Nm<sup>3</sup> di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O prodotti, quindi la produzione specifica volumetrica di biogas trascurando l'ammoniaca e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, presenti solo in quantità esigua. Per una tonnellata di rifiuto si hanno quindi:

Per la SORB:

$$CH_4 = \frac{5,376 \text{ kg}}{0,72 \text{ kg/Nm}^3} = 7,47 \text{ Nm}^3$$

$$CO_2 \text{ anaerobica} = \frac{13,82 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 7 \text{ Nm}^3$$

$$H_2O_{\text{prodotta}} = \frac{18,81 \text{ kg}}{0,6 \text{ kg/Nm}^3} = 31,35 \text{ Nm}^3$$

$$CO_2 \text{ aerobica} = \frac{56,892 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 28,73 \text{ Nm}^3$$

Per la SOLB:

$$CH_4 = \frac{1,67 \text{ kg}}{0,72 \text{ kg/Nm}^3} = 2,32 \text{ Nm}^3$$

$$CO_2 \text{ anaerobica} = \frac{3,344 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 1,7 \text{ Nm}^3$$

$$H_2O_{\text{prodotta}} = \frac{5,346 \text{ kg}}{0,6 \text{ kg/Nm}^3} = 8,91 \text{ Nm}^3$$

$$CO_2 \text{ aerobica} = \frac{15,84 \text{ kg}}{1,98 \text{ kg/Nm}^3} = 8 \text{ Nm}^3$$

Le produzioni specifiche volumetriche di biogas aerobico e anaerobico risultano:

$$v_{s \text{ anaerobica}} = \frac{7,47 + 7}{1000} + \frac{2,32 + 1,7}{1000} = 0,02 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg rifiuto}} = 20 \frac{\text{Nm}^3}{\text{t rifiuto}}$$

$$v_{s \text{ aerobica}} = \frac{28,73 + 31,35}{1000} + \frac{8 + 8,91}{1000} = 0,077 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg rifiuto}} = 77 \frac{\text{Nm}^3}{\text{t rifiuto}}$$

Come per la gestione anaerobica, la produzione teorica di biogas aerobico e anaerobico ricavabili dal modello ( $\approx 70 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per biogas aerobico e  $\approx 7,6 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per biogas anaerobico) differiscono leggermente da quelle teoriche ( $\approx 77 \text{ Nm}^3/\text{t}$  e  $\approx 20 \text{ Nm}^3/\text{t}$ ), questo perché la produzione teorica non tiene conto di eventuali fattori limitanti, che il modello invece considera attraverso il coefficiente di produzione, e questo spiega la riduzione della quantità di biogas producibile. Per il calcolo successivo, come per il caso completamente anaerobico, si usa il valore teorico calcolato, e si vedrà come anche in questo caso la quantità di acqua consumata e prodotta nelle reazioni sia trascurabile rispetto ai fenomeni di piovosità. Anche per la gestione aerobica ci si aspetta quindi che la produzione di percolato in termini quantitativi non differisca dalla gestione anaerobica, poiché il fenomeno produttivo è influenzato quasi totalmente dalle piogge e non dalle reazioni. Nella 4.33 tabella per maggiore chiarezza sono riassunti i valori di produzione biogas anaerobico, aerobico e di acqua di reazione anno per anno.

**Tabella 4.33: produzione di acqua anno per anno e produzioni di biogas anaerobico ed aerobico**

Anni	Produzione annua di biogas anaerobico [Nm <sup>3</sup> /t/anno]	Produzione annua di biogas aerobico [Nm <sup>3</sup> /t/anno]	Produzione annua di H <sub>2</sub> O [Nm <sup>3</sup> /t]
1	0,34	3,09	1,38
2	1,01	9,26	4,14
3	0,84	7,71	3,45
4	0,70	6,45	2,88
5	0,59	5,43	2,43
6	0,50	4,59	2,05
7	0,43	3,91	1,75
8	0,36	3,35	1,50
9	0,31	2,88	1,29
10	0,27	2,50	1,12
11	0,24	2,17	0,97
12	0,21	1,91	0,85
13	0,18	1,68	0,75
14	0,16	1,49	0,66
15	0,14	1,32	0,59
16	0,13	1,18	0,53
17	0,12	1,06	0,47
18	0,10	0,95	0,43
19	0,09	0,86	0,39
20	0,09	0,78	0,35
21	0,08	0,71	0,32
22	0,07	0,65	0,29
23	0,06	0,59	0,26

24	0,06	0,54	0,24
25	0,05	0,49	0,22
26	0,05	0,45	0,20
27	0,05	0,42	0,19
28	0,04	0,38	0,17
29	0,04	0,35	0,16
30	0,04	0,32	0,14
31	0,03	0,30	0,13
32	0,03	0,28	0,12
33	0,03	0,25	0,11
34	0,03	0,23	0,10
35	0,02	0,22	0,10
36	0,02	0,20	0,09
37	0,02	0,19	0,08
38	0,02	0,17	0,08
39	0,02	0,16	0,07
40	0,02	0,15	0,07

## PRIMO STRATO

Al termine del primo anno e mezzo, il primo strato è completato, quindi  $I(1, \frac{3}{2}) = Q_e$ . Dal modello BIO risulta che il biogas prodotto anaerobicamente durante il primo anno e mezzo ammonta a:

$$v(1, \frac{3}{2}) = (0,34 + 1,01/2) = 0,845 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

$$V_{\text{gas anaerobico}}(1, \frac{3}{2}) = v(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{\text{RSUsecco}} = 0,845 \cdot 1,54375 = 1,3 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas anaerobico}}(1, \frac{3}{2}) = V_{\text{gas anaerobico}}(1, \frac{3}{2}) \cdot \rho_{\text{gas anaerobico}} = 1,3 \cdot 1,3 = 1,69 \text{ kg}$$

Mentre il biogas prodotto aerobicamente:

$$v(1, \frac{3}{2}) = (3,09 + 9,26/2) = 7,72 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(1, \frac{3}{2}) = v(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{\text{RSUsecco}} = 7,72 \cdot 1,54375 = 11,9 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(1, \frac{3}{2}) = V_{\text{gas aerobico}}(1, \frac{3}{2}) \cdot \rho_{\text{gas aerobico}} = 11,9 \cdot 1,3845 = 16,5 \text{ kg}$$

La produzione specifica volumetrica di biogas anaerobico è  $20 \text{ Nm}^3/\text{t} = 0,02 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , mentre per il biogas aerobico è  $77 \text{ Nm}^3/\text{t} = 0,077 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , il consumo specifico di acqua per  $\text{Nm}^3$  di biogas prodotto risulta pari a:

$$C_{\text{H}_2\text{O biogas anaerobico}}(1, \frac{3}{2}) = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,02} = 0,7 \frac{\text{kg H}_2\text{O consumati}}{\text{Nm}^3 \text{ biogas}}$$

Mentre per la produzione specifica di acqua si ha il seguente riscontro:

$$C'_{\text{H}_2\text{O biogas aerobico}}(1, \frac{3}{2}) = \frac{C'_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,077} = 0,5 \frac{\text{kg H}_2\text{O prodotti}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

Ci si aspetta questo risultato poiché il biogas aerobico è al 50% in H<sub>2</sub>O per ipotesi, inoltre l'acqua prodotta è già stata calcolata anno per anno grazie alle ipotesi precedenti e alla stechiometria, per il primo anno e mezzo si stima quindi una produzione di acqua pari a:

$$v_{\text{H}_2\text{O}}(1, \frac{3}{2}) = (1,38 + 4,14/2) = 3,45 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

$$V_{\text{acqua}}(1, \frac{3}{2}) = v_{\text{H}_2\text{O}}(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{\text{RSUsecco}} = 3,45 \cdot 1,54375 = 5,33 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{acqua}}(1, \frac{3}{2}) = V_{\text{acqua}}(1, \frac{3}{2}) \cdot \rho_{\text{vapore}} = 5,33 \cdot 0,6 = 3,2 \text{ kg}$$

Si ottiene quindi il termine  $B(1, \frac{3}{2})$ , stavolta considerato come differenza tra acqua prodotta e acqua consumata nelle reazioni, ovvero la produzione/consumo netto/o di acqua:

$$\begin{aligned} B(1, \frac{3}{2}) &= C'_{\text{H}_2\text{O aerobico}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas aerobico}}(1, \frac{3}{2}) - C_{\text{H}_2\text{O anaerobico}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas anaerobico}}(1, \frac{3}{2}) = \\ &= 0,5 \cdot 11,9 - 0,7 \cdot 1,3 = 5,04 \text{ kg} \end{aligned}$$

In netto l'acqua viene prodotta, come ci si aspetta. Applicando l'equazione di stato dei gas perfetti si trovano le moli di H<sub>2</sub>O in stato vapore per m<sup>3</sup> di biogas, ovvero le moli presenti come umidità, da non confondere con l'acqua prodotta dalla reazione. Si considera una temperatura di 50° C (cioè 323 K), a questa T corrisponde una tensione di vapore saturo  $p_v = 12335 \text{ Pa}$ :

$$n = \frac{p_v}{RT} = \frac{12335}{8,314 \cdot 323} = 4,59 \frac{\text{moli di vapore}}{\text{Nm}^3 \text{di biogas}}$$

Da cui:

$$V_{\text{ap}}(1, \frac{3}{2}) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{\text{gas tot}}(1, \frac{3}{2}) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (11,9 + 1,3) = 1,1 \text{ kg}$$

Ora si può procedere analogamente al caso anaerobico, ma tenendo presente che l'acqua prodotta è già conteggiata in  $W_{\text{gas totale}}(1, \frac{3}{2})$ , per cui si ricorre al termine  $B'(1, \frac{3}{2}) = C_{\text{H}_2\text{O anaerobico}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas anaerobico}}(1, \frac{3}{2})$ , che rappresenta semplicemente la parte di acqua consumata in reazione:

$$\begin{aligned} W_{\text{RSUsecco}}(1, \frac{3}{2}) &= W_{\text{RSUsecco}} - [ W_{\text{gas totale}}(1, \frac{3}{2}) - B'(1, \frac{3}{2}) ] = \\ &= 1543,75 - (16,5 + 1,69 - 0,7 \cdot 1,3) = 1526,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, \frac{3}{2}) = 1526,5 \cdot \frac{35}{65} = 822 \text{ kg}$$

Qui invece occorre considerare il termine  $B(1, \frac{3}{2})$ :

$$W_{H_2O}(1, \frac{3}{2}) = \text{contenuto di acqua nel rifiuto} = U_{RSU}(1, \frac{3}{2}) + I(1, \frac{3}{2}) + B(1, \frac{3}{2}) - \text{Vap}(1, \frac{3}{2}) = 822 + 990 + 5,04 - 1,1 = 1816 \text{ kg}$$

Ora si può calcolare il peso del materiale sovraincombente il baricentro dello strato di cui si intende calcolare la capacità di campo:

$$W_{MS}(1, \frac{3}{2}) = W_{MRumido} + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(1, \frac{3}{2}) + W_{H_2O}(1, \frac{3}{2})] = 900 + \frac{1}{2} \cdot [1526,5 + 1816] = 2571,3 \text{ kg}$$

E la capacità di campo risulta come di seguito:

$$CC(1, \frac{3}{2}) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(1, \frac{3}{2})}{4500 + W_{MS}(1, \frac{3}{2})} = 0,4$$

Da qui è possibile calcolare la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere:

$$U_{ass}(1, \frac{3}{2}) = CC(1, \frac{3}{2}) \cdot W_{RSUsecco}(1, \frac{3}{2}) = 0,4 \cdot 1526,5 = 610,6 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RS}(1, \frac{3}{2}) = U_{RSU}(1, \frac{3}{2}) - U_{ass}(1, \frac{3}{2}) = 822 - 610,6 = 211,4 \text{ kg}$$

Attraverso la 4.02 si stima la produzione di percolato del primo strato dopo un anno e mezzo:

$$L_r(1, \frac{3}{2}) = I(1, \frac{3}{2}) + \Delta U_{RS}(1, \frac{3}{2}) + B(1, \frac{3}{2}) - \text{Vap}(1, \frac{3}{2}) = 990 + 211,4 + 5,04 - 1,1 = 1205,3 \text{ kg} = 1,2053 \text{ m}^3$$

## SECONDO STRATO

Trascorsi tre anni anche il secondo strato è completato e  $I(1, 3) = L_r(1, \frac{3}{2})$ . Dal modello BIO risulta che il biogas prodotto anaerobicamente durante il secondo anno e mezzo ammonta a:

$$v_{anaerobico}(1, 3) = (0,84 + 1,01/2) = 1,345 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

$$V_{gas \text{ anaerobico}}(1, 3) = v_{anaerobico}(1, 3) \cdot W_{RSUsecco}(1, \frac{3}{2}) = 1,345 \cdot 1,5265 = 2,05 \text{ Nm}^3$$

$$W_{gas \text{ anaerobico}}(1, 3) = V_{gas \text{ anaerobico}}(1, 3) \cdot \rho_{gas \text{ anaerobico}} = 2,05 \cdot 1,3 = 2,7 \text{ kg}$$

Mentre il biogas prodotto aerobicamente:

$$v_{\text{aerobico}}(1, 3) = (7,71 + 9,26/2) = 12,34 \text{ Nm}^3/\text{t}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(1, 3) = v_{\text{aerobico}}(1, 3) \cdot W_{\text{RSUsecco}} = 12,34 \cdot 1,5265 = 18,8 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(1, 3) = V_{\text{gas aerobico}}(1, 3) \cdot \rho_{\text{gas aerobico}} = 18,8 \cdot 1,3845 = 26 \text{ kg}$$

La produzione specifica volumetrica di biogas anaerobico è  $20 \text{ Nm}^3/\text{t} = 0,02 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , mentre per il biogas aerobico è  $77 \text{ Nm}^3/\text{t} = 0,077 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ , il consumo specifico di acqua per  $\text{Nm}^3$  di biogas prodotto risulta pari a:

$$C_{\text{H}_2\text{O biogas anaerobico}} = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,02} = 0,7 \frac{\text{kg H}_2\text{O consumati}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

Mentre per la produzione specifica di acqua:

$$C'_{\text{H}_2\text{O biogas aerobico}} = \frac{C'_{\text{H}_2\text{O}}(\text{R.S.U})}{0,077} = 0,5 \frac{\text{kg H}_2\text{O prodotti}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

Si ottiene quindi il termine B(1, 3):

$$\begin{aligned} B(1, 3) &= C'_{\text{H}_2\text{O aerobico}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas aerobico}}(1, 3) - C_{\text{H}_2\text{O anaerobico}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas anaerobico}}(1, 3) = \\ &= 0,5 \cdot 18,8 - 0,7 \cdot 2,05 = 8 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$V_{\text{ap}}(1, 3) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{\text{gas}}(1, 3) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (2,05 + 18,8) = 1,72 \text{ kg}$$

$$B'(1, 3) = 0,7 \cdot 2,05 = 1,4 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{RSUsecco}}(1, 3) &= W_{\text{RSUsecco}}(1, \frac{3}{2}) - [W_{\text{gas}}(1, 3) - B'(1, 3)] = \\ &= 1526,5 - (2,7 + 26 - 1,4) = 1499,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, 3) = U_{\text{ass}}(1, \frac{3}{2}) = 610,6 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 3) &= U_{\text{RSU}}(1, 3) + I(1, 3) + B(1, 3) - V_{\text{ap}}(1, 3) = \\ &= 610,6 + 1205,3 + 8 - 1,72 = 1822,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

Si calcola nuovamente il peso del materiale sovraincombente:

$$\begin{aligned} W_{\text{MS}}(1, 3) &= 2 \cdot W_{\text{MRumido}} + W_{\text{RSUsecco}}(2, 3) + U_{\text{ass}}(2, 3) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSUsecco}}(1, 3) + W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 3)] = \\ &= 1800 + 1526,5 + 610,6 + \frac{1}{2} \cdot [1499,2 + 1822,2] = 5598 \text{ kg} \end{aligned}$$

E la capacità di campo risulta come di seguito:

$$CC(1, 3) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(1,3)}{4500 + W_{MS}(1,3)} = 0,32$$

E la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere risulta:

$$U_{ass}(1, 3) = CC(1, 3) \cdot W_{RSU_{secco}}(1, 3) = 0,32 \cdot 1499,2 = 479,7 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RS}(1, 3) = U_{RSU}(1, 3) - U_{ass}(1, 3) = 610,6 - 479,7 = 131 \text{ kg}$$

E' possibile calcolare il percolato che il primo strato produce dopo 3 anni:

$$\begin{aligned} L_r(1, 3) &= I(1, 3) + \Delta U_{RS}(1, 3) + B(1, 3) - Vap(1, 3) = \\ &= 1205,3 + 131 + 8 - 1,72 = 1342,6 \text{ kg} = 1,3426 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

### TERZO STRATO

Trascorsi i 4 anni anche l'ultimo strato è completato, e  $I(1, 4) = L_r(1, 3)$ . Nel primo strato il processo anaerobico produce  $0,70 \text{ Nm}^3/\text{t}$  di biogas anaerobico e  $6,45 \text{ Nm}^3/\text{t}$  di biogas aerobico. Siccome l'ultimo strato è di 2 m vanno aggiunte alcune valutazioni:

$$\begin{aligned} W_{MR_{umido}}(3, 4) &= \text{peso umido del materiale di ricoprimento} = y_{MR} \cdot h_{MR} \cdot S = \\ &= 1800 \cdot \frac{1}{6} \cdot 2 \cdot 1 = 600 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{RSU_{umido}}(3, 4) &= \text{peso umido del rifiuto} = y_{RSU} \cdot h_{RSU} \cdot S = \\ &= 950 \cdot \frac{5}{6} \cdot 2 \cdot 1 = 1583,3 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$W_{RSU_{secco}}(3, 4) = \text{peso secco del rifiuto} = W_{RSU_{umido}} \cdot 0,65 = 1029,145 \text{ kg}$$

$$U_{RSU}(3, 4) = \text{umidità del rifiuto} = 1583,3 - 1029,145 = 554,155 \text{ kg}$$

Il terzo strato è completato in un anno e la produzione specifica dopo un anno dal deposito del rifiuto è  $0,34 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per il biogas anaerobico,  $3,09 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per il biogas aerobico:

$$V_{\text{gas anaerobico}}(3, 4) = 0,34 \cdot 1,029145 = 0,35 \text{ Nm}^3$$

$$C_{H_2O_{biogas}} = 0,7 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$C'_{\text{H}_2\text{O}_{\text{biogas}}} = 0,5 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$B(3, 4) = 0,5 \cdot 3,09 - 0,7 \cdot 0,35 = 1,3 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(3, 4) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (3,09 + 0,35) = 0,28 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{H}_2\text{O}}(3, 4) &= U_{\text{RSU}}(3, 4) + I(3, 4) + B(3, 4) - \text{Vap}(3, 4) = \\ &= 554,155 + 990 + 1,3 - 0,28 = 1545,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{MS}}(3, 4) &= W_{\text{MRumido}}(3, 4) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(3, 4) + W_{\text{H}_2\text{O}}(3, 4)] = \\ &= 600 + \frac{1}{2} \cdot [1029,145 + 1545,2] = 1887,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$CC(3, 4) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(3,4)}{4500 + W_{\text{MS}}(3,4)} = 0,44 \text{ kg}$$

$$U_{\text{ass}}(3, 4) = CC(3, 4) \cdot W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(3, 4) = 453 \text{ kg}$$

La produzione di biogas è 0,70 Nm<sup>3</sup>/t (anaerobico) e 6,45 Nm<sup>3</sup>/t (aerobico) per il primo strato al terzo anno:

$$V_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) = v_{\text{anaerobico}}(1, 4) \cdot W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(1, 3) = 0,70 \cdot 1,4992 = 1,05 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) = V_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) \cdot \rho_{\text{gas anaerobico}} = 1,05 \cdot 1,3 = 1,37 \text{ kg}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(1, 4) = v_{\text{aerobico}}(1, 4) \cdot W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(1, 3) = 6,45 \cdot 1,4992 = 9,67 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(1, 4) = V_{\text{gas aerobico}}(1, 4) \cdot \rho_{\text{gas aerobico}} = 9,67 \cdot 1,3845 = 13,4 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} B(1, 4) &= C'_{\text{H}_2\text{O}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas aerobico}}(1, 4) - C_{\text{H}_2\text{O}}(\text{biogas}) \cdot V_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) = \\ &= 0,5 \cdot 9,67 - 0,7 \cdot 1,05 = 4,1 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Vap}(1, 4) = n \cdot \text{massa molecolare} \cdot V_{\text{gas}}(1, 4) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (9,67 + 1,05) = 0,9 \text{ kg}$$

$$B'(1, 4) = 0,7 \cdot 1,05 = 0,74 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(1,4) &= W_{\text{RSU}_{\text{secco}}}(1, 3) - [W_{\text{gas}}(1, 4) - B'(1, 4)] = \\ &= 1499,2 - (1,37 + 13,4 - 0,74) = 1485,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, 4) = U_{\text{ass}}(1, 3) = 479,7 \text{ kg}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 4) = \text{contenuto di acqua nel rifiuto} =$$

$$= U_{RSU}(1, 4) + I(1, 4) + B(1, 4) - Vap(1, 4) = 479,7 + 1342,6 + 4,1 - 0,89 = 1825,5 \text{ kg}$$

Si calcola nuovamente il peso del materiale sovraincombente:

$$\begin{aligned} W_{MS}(1, 4) &= 2 \cdot W_{MRumido} + W_{MRumido}(3, 4) + W_{RSUsecco}(2, 3) + U_{ass}(2, 3) + W_{RSUsecco}(3, 4) + \\ &+ U_{ass}(3, 4) + \frac{1}{2} \cdot [W_{RSUsecco}(1, 4) + W_{H_2O}(1, 4)] = \\ &= 1800 + 600 + 1526,5 + 610,6 + 1029,145 + 453 + \frac{1}{2} \cdot [1485,2 + 1825,5] = 7674,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

E la capacità di campo risulta come di seguito:

$$CC(1, 4) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{MS}(1,3)}{4500 + W_{MS}(1,3)} = 0,25$$

E la quantità di acqua che lo strato di rifiuto può mantenere risulta:

$$U_{ass}(1, 4) = CC(1, 4) \cdot W_{RSUsecco}(1, 4) = 0,25 \cdot 1485,2 = 371 \text{ kg}$$

Si conosce l'umidità iniziale del rifiuto, per cui:

$$\Delta U_{RS}(1, 4) = U_{RSU}(1, 4) - U_{ass}(1, 4) = 479,7 - 371 = 108,4 \text{ kg}$$

Ora si calcola la produzione di percolato prodotto dal primo strato al quarto anno:

$$\begin{aligned} L_r(1, 4) &= I(1, 4) + \Delta U_{RS}(1, 4) + B(1, 4) - Vap(1, 4) = \\ &= 1342,6 + 108,4 + 4,1 - 0,89 = 1454,2 \text{ kg} = 1,4542 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

In fase attiva risulta pertanto la produzione di percolato in tabella 4.34:

**Tabella 4.34: gestione aerobica, produzione di percolato in fase attiva**

Anni	Percolato prodotto ( $\text{m}^3_{\text{prodotti}}/\text{m}^2_{\text{di superficie}}$ )
1,5	1,2053
3	1,3426
4	1,4542

Dopo la fine del quarto anno gli spazi per il conferimento sono esauriti, si passa quindi alla fase passiva della gestione, e il calcolo delle piogge efficaci viene effettuato attraverso la stima dei termini di ruscellamento ed evotraspirazione (anche se quest'ultimo fenomeno rappresenta un'aliquota molto ridotta rispetto ad altri termini). Con riferimento ai valori di piovosità mensile inseriti, adottando coefficienti di ruscellamento corrispondenti a pendenze minori del 10% (la pendenza delle scarpate fuori terra si assume del 6%) di un terreno di ricoprimento con granulometria di argilla limosa, è possibile ricavare in tabella 4.23 i ruscellamenti mensili come aliquote delle piovosità:

**Tabella 4.23: ruscellamenti mensili espressi come frazioni della piovosità**

<b>Mese</b>	<b>Piovosità mensile [mm]</b>	<b>Coefficienti di ruscellamento c</b>	<b>Ruscellamento mensile [mm]</b>
Gennaio	41	0,576	23,6
Febbraio	49	0,648	31,8
Marzo	56	0,515	28,8
Aprile	55	0,349	19,2
Maggio	58	0,320	18,6
Giugno	43	0,133	5,7
Luglio	38	0,104	3,95
Agosto	50	0,104	5,2
Settembre	47	0,166	7,8
Ottobre	82	0,432	35,4
Novembre	77	0,504	38,8
Dicembre	50	0,576	28,8

Ora si calcola l'indice termico annuo  $I_t$  per valutare l'evotraspirazione potenziale, con le temperature medie mensili inserite in tabella 4.23, si ottiene il valore:

**Tabella 4.24: temperature medie mensili**

<b>Mese</b>	<b>T media [°C]</b>
Gennaio	1,5
Febbraio	4,5
Marzo	9
Aprile	12
Maggio	16,5
Giugno	20,5
Luglio	23
Agosto	22,5
Settembre	19
Ottobre	13,5
Novembre	6,5
Dicembre	3

$$I_t = \sum_1^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1,514} = 55,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Considerando la durata media dell'insolazione diurna alla latitudine 44°, si possono ricavare i valori di  $C_i$  in tabella 4.25:

**Tabella 4.25: valori dei coefficienti  $C_i$  in funzione dell'insolazione media diurna**

Mese	durata media dell'insolazione diurna (lat. 44°) [ore]	$C_i$
Gennaio	9,2	0,8
Febbraio	10,8	0,9
Marzo	12	1
Aprile	13,2	1,1
Maggio	14,4	1,2
Giugno	15,6	1,3
Luglio	14,4	1,2
Agosto	14,4	1,2
Settembre	13,2	1,1
Ottobre	10,8	0,9
Novembre	9,2	0,8
Dicembre	9,2	0,8

Quindi usando la formula di Thorntwaite si ottiene il valore di evotraspirazione potenziale:

$$ET = 16 \cdot \frac{10 \cdot T_i}{I_t} \cdot C_i$$

**Tabella 4.26: valori di evotraspirazione potenziale mensili**

Mese	Evotraspirazione potenziale [mm]
Gennaio	3,45
Febbraio	11,65
Marzo	25,9
Aprile	38
Maggio	57
Giugno	76,7
Luglio	79,4

Agosto	77,7
Settembre	60
Ottobre	35
Novembre	15
Dicembre	6,9

$$P_e = P - R - ET < 0$$

La quantità di acqua evotraspirata nei mesi estivi è superiore alla piovosità media di questi, apparentemente ci si trova quindi in situazione di deficit idrologico, tuttavia va considerato che la pioggia caduta e l'evotraspirazione sono fenomeni caratterizzati da durate diverse, poiché il primo si riferisce alla pioggia che cade in tutto il mese, ma solo nei giorni piovosi, mentre il secondo è ripartito in tutti i giorni del mese. Secondo questo ragionamento, per valutare meglio la differenza tra pioggia caduta e l'aliquota evotraspirata si ragiona su base giornaliera, ovvero tenendo conto dei giorni di pioggia si valuta l'evotraspirazione effettiva in quel numero di giorni, ottenendo i risultati in tabella 4.27:

**Tabella 4.27: evotraspirazione effettiva mensile, calcolata tenendo conto dei giorni di pioggia**

Mese	Piovosità media mensile [mm]	Giorni di pioggia	Evotraspirazione potenziale [mm]	Evotraspirazione effettiva [mm]
Gennaio	41	9	3,45	1
Febbraio	49	6	11,65	2,3
Marzo	56	7	25,9	6
Aprile	55	6	38	7,6
Maggio	58	6	57	11,4
Giugno	43	6	76,7	15,3
Luglio	38	4	79,4	10,6
Agosto	50	5	77,7	13
Settembre	47	5	60	10
Ottobre	82	9	35	10,5
Novembre	77	7	15	3,5
Dicembre	50	11	6,9	2,5

Per cui risultano i valori in tabella 4.28:

**Tabella 4.28: pioggia efficace mensile, calcolata tenendo conto dell'evotraspirazione effettiva**

Mese	Piovosità mensile [mm]	Ruscigliamento mensile [mm]	Evotraspirazione effettiva [mm]	Pioggia efficace [mm]
Gennaio	41	23,6	1	16,4
Febbraio	49	31,8	2,3	15
Marzo	56	28,8	6	21,2
Aprile	55	19,2	7,6	28,2
Maggio	58	18,6	11,4	28
Giugno	43	5,7	15,3	22
Luglio	38	3,95	10,6	23,5
Agosto	50	5,2	13	32
Settembre	47	7,8	10	29,2
Ottobre	82	35,4	10,5	36,1
Novembre	77	38,8	3,5	34,7
Dicembre	50	28,8	2,5	18,7

La pioggia efficace annua risulta quindi di 305 mm/anno. Vi è presenza di una barriera impermeabile (argilla) di mezzo metro, per cui viene a determinarsi un processo di filtrazione governato dalla legge di Darcy, viene a formarsi quindi una falda sospesa che permea nella zona sottostante. Considerando un'altezza del battente  $H = 305$  mm, spessore dello strato  $h_s = 50$  cm, e coefficiente di permeabilità di quest'ultimo  $K_s = 10^{-8}$  m/s si ha un afflusso in discarica pari a:

$$q = \frac{I}{A} = K_s \cdot \frac{H}{h_s} = 192,4 \frac{\text{mm}}{\text{anno m}^2} = 192,4 \frac{\text{kg}}{\text{anno m}^2} = 192,4 \frac{\text{l}}{\text{anno m}^2}$$

### TERZO STRATO

Per lo strato di rifiuti superficiale, ovvero il terzo strato, tenendo conto dello strato di sigillatura di 50 cm e il cui peso specifico  $\rho_a$  sia  $2000 \text{ kg/m}^3$ , risulta quanto segue:

$$V_{\text{gas anaerobico}}(3, 5) = 1,01 \cdot 1,029145 = 1,04 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas anaerobico}}(3, 5) = 1,04 \cdot 1,3 = 1,35 \text{ kg}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(3, 5) = 9,26 \cdot 1,029145 = 9,53 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(3, 5) = 9,53 \cdot 1,3845 = 13,2 \text{ kg}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 0,7 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$C'_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{Nm}^3 \text{biogas}}$$

$$B(3, 5) = 0,5 \cdot 9,53 - 0,7 \cdot 1,04 = 4 \text{ kg}$$

$$B'(3, 5) = 0,7 \cdot 1,04 = 0,7 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(3, 5) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (1,04 + 9,53) = 0,9 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) &= W_{\text{RSUsecco}}(3, 4) - [W_{\text{gas}}(3, 5) - B'(3, 5)] = \\ &= 1029,145 - [1,04 + 13,2 - 0,7] = 1015,6 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$U_{\text{RSU}}(3, 5) = U_{\text{ass}}(3, 4) = 453 \text{ kg}$$

$$I(3, 5) = 192,4 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{H}_2\text{O}}(3, 5) &= U_{\text{RSU}}(3, 5) + I(3, 5) + B(3, 5) - \text{Vap}(3, 5) = \\ &= 453 + 192,4 + 4 - 0,9 = 648,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{MS}}(3, 5) &= W_{\text{MRumido}}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) + W_{\text{H}_2\text{O}}(3, 5)] = \\ &= 600 + \frac{1}{2} \cdot [1015,6 + 648,5] = 1432 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$CC(3, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(3,5)}{4500 + W_{\text{MS}}(3,5)} = 0,47$$

$$U_{\text{ass}}(3, 5) = CC(3, 5) \cdot W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) = 477 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{\text{RSU}}(3, 5) = U_{\text{RSU}}(3, 5) - U_{\text{ass}}(3, 5) = 463 - 477 = -14 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} L_r(3, 5) &= I(3, 5) + \Delta U_{\text{RS}}(3, 5) - B(3, 5) - \text{Vap}(3, 5) = \\ &= 192,4 - 14 + 4 - 0,9 = 181,5 \text{ kg} = 0,1815 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

## SECONDO STRATO

$$\begin{aligned} V_{\text{gas anaerobico}}(2, 5) &= V_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) = v_{\text{anaerobico}}(1, 4) \cdot W_{\text{RSUsecco}}(1, 3) = 0,70 \cdot 1,4992 = \\ &= 1,05 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

$$W_{\text{gas anaerobico}}(2, 5) = W_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) = V_{\text{gas anaerobico}}(1, 4) \cdot \rho_{\text{gas anaerobico}} = 1,05 \cdot 1,3 = 1,37 \text{ kg}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(2, 5) = V_{\text{gas aerobico}}(1, 4) = v_{\text{aerobico}}(1, 4) \cdot W_{\text{RSUsecco}}(1, 3) = 6,45 \cdot 1,4992 = 9,67 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(2, 5) = W_{\text{gas aerobico}}(1, 4) = V_{\text{gas aerobico}}(1, 4) \cdot \rho_{\text{gas aerobico}} = 9,67 \cdot 1,3845 = 13,4 \text{ kg}$$

$$B(2, 5) = B(1, 4) = 4,1 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(2, 5) = \text{Vap}(1, 4) = 0,9 \text{ kg}$$

$$W_{\text{RSUsecco}}(2, 5) = W_{\text{RSUsecco}}(1, 4) = 1485,2 \text{ kg}$$

$$U_{\text{RSU}}(2, 5) = U_{\text{RSU}}(1, 4) = 479,7 \text{ kg}$$

$$L_r(3, 5) = 181,5 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{H}_2\text{O}}(2, 5) &= U_{\text{RSU}}(2, 5) + L_r(3, 5) + B(2, 5) - \text{Vap}(2, 5) = \\ &= 479,7 + 181,5 + 4,1 - 0,9 = 664 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{MS}}(2, 5) &= W_{\text{MRumido}}(2, 5) + W_{\text{MRumido}}(3, 5) + W_{\text{RSUsecco}}(3, 5) + U_{\text{ass}}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSUsecco}}(2, \\ &5) + W_{\text{H}_2\text{O}}(2, 5)] = \\ &= 900 + 600 + 1015,6 + 477 + \frac{1}{2} \cdot [1485,2 + 664] = 4067,2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$CC(2, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(2,5)}{4500 + W_{\text{MS}}(2,5)} = 0,34$$

$$U_{\text{ass}}(2, 5) = CC(2, 5) \cdot W_{\text{RSUsecoco}}(2, 5) = 505 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{\text{RSU}}(2, 5) = U_{\text{RSU}}(2, 5) - U_{\text{ass}}(2, 5) = 479,7 - 505 = -25,3 \text{ kg}$$

$$L_r(2, 5) = L_r(3, 5) + \Delta U_{\text{RS}}(2, 5) + B(2, 5) - \text{Vap}(2, 5) =$$

$$= 181,5 - 25,3 + 4,1 - 0,9 = 159,4 \text{ kg} = 0,1594 \text{ m}^3$$

## PRIMO STRATO

La produzione di biogas del primo strato durante il quinto anno è di  $0,59 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per il biogas anaerobico e  $5,43 \text{ Nm}^3/\text{t}$  per il biogas aerobico, quindi:

$$V_{\text{gas anaerobico}}(1, 5) = v_{\text{anaerobico}}(1, 5) \cdot W_{\text{RSUsecoco}}(1, 4) = 0,59 \cdot 1,4852 = 0,88 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas anaerobico}}(1, 5) = V_{\text{gas anaerobico}}(1, 5) \cdot \rho_{\text{gas anaerobico}} = 0,88 \cdot 1,3 = 1,1 \text{ kg}$$

$$V_{\text{gas aerobico}}(1, 5) = v_{\text{aerobico}}(1, 5) \cdot W_{\text{RSUsecoco}}(1, 4) = 5,43 \cdot 1,4852 = 8 \text{ Nm}^3$$

$$W_{\text{gas aerobico}}(1, 5) = V_{\text{gas aerobico}}(1, 5) \cdot \rho_{\text{gas aerobico}} = 8 \cdot 1,3845 = 11,1 \text{ kg}$$

$$B(1, 5) = 0,5 \cdot 8 - 0,7 \cdot 0,88 = 3,4 \text{ kg}$$

$$B'(1, 5) = 0,7 \cdot 0,88 = 0,62 \text{ kg}$$

$$\text{Vap}(1, 5) = 4,59 \cdot 0,018 \cdot (0,88 + 8) = 0,7 \text{ kg}$$

$$W_{\text{RSUsecoco}}(1, 5) = W_{\text{RSUsecoco}}(1, 4) - [W_{\text{gas}}(1, 5) - B'(1, 5)] =$$

$$= 1485,2 - [1,1 + 11,1 - 0,62] = 1473,6 \text{ kg}$$

$$U_{\text{RSU}}(1, 5) = U_{\text{ass}}(1, 4) = 371 \text{ kg}$$

$$L_r(2, 5) = 159,4 \frac{\text{kg}}{\text{anno}}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 5) = U_{\text{RSU}}(1, 5) + L_r(2, 5) + B(1, 5) - \text{Vap}(1, 5) =$$

$$= 371 + 159,4 + 3,4 - 0,7 = 533 \text{ kg}$$

$$W_{\text{MS}}(1, 5) = 2 \cdot W_{\text{MRumido}}(1, 5) + W_{\text{MRumido}}(3, 5) + \rho_a \cdot h_s + W_{\text{RSUsecoco}}(2, 5) + U_{\text{ass}}(2, 5) +$$

$$+ W_{\text{RSUsecoco}}(3, 5) + U_{\text{ass}}(3, 5) + \frac{1}{2} \cdot [W_{\text{RSUsecoco}}(1, 5) + W_{\text{H}_2\text{O}}(1, 5)] =$$

$$= 1800 + 600 + 1000 + 1485,2 + 505 + 1015,6 + 477 + \frac{1}{2} \cdot [1473,6 + 533] = 7886 \text{ kg}$$

$$CC(1, 5) = 0,6 - 0,55 \cdot \frac{W_{\text{MS}}(1,5)}{4500 + W_{\text{MS}}(1,5)} = 0,25$$

$$U_{\text{ass}}(1, 5) = CC(1, 5) \cdot W_{\text{RSUsecoco}}(1, 5) = 368 \text{ kg}$$

$$\Delta U_{\text{RSU}}(1, 5) = U_{\text{RSU}}(1, 5) - U_{\text{ass}}(1, 5) = 371 - 368 = 3 \text{ kg}$$

$$L_r(1, 5) = L_r(2, 5) + \Delta U_{\text{RS}}(1, 5) + B(1, 5) - \text{Vap}(1, 5) =$$

$$= 159,4 + 3 + 3,4 - 0,7 = 165 \text{ kg} = 0,165 \text{ m}^3$$

Al termine del quinto anno la produzione di percolato ammonta a  $159,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{anno}}$ , cioè circa  $4,37 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$ . Il valore trovato corrisponde circa all'25% della piovosità annua, ed è in linea

con la letteratura che suggerisce valori che vanno tra 2-10  $\frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$  per piovosità annue tra 600 e 900 mm.

Per modellare la produzione di percolato negli anni successivi al primo anno di chiusura si può adottare il modello esponenziale decrescente descritto in precedenza:

$$P_k = ae^{-ct_k}$$

Dove:

- Il parametro  $a = 4,37 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}} = 0,1594 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{anno}}$  sia la produzione di percolato un anno dopo il termine del capping;
- Il coefficiente sia  $c = 0,1$  da stime sperimentali;

Per cui si hanno i risultati in tabella 4.35 e l'andamento in figura 4.18:

**Tabella 4.35: gestione aerobica, produzione di percolato in 40 anni**

Anni	$c \cdot t_k$	Percolato prodotto [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{anno})$ ]
1,5	0,15	1,2053
3	0,3	1,3426
4	0,4	1,4542
5	0,5	0,1594
6	0,6	0,0875
7	0,7	0,0792
8	0,8	0,0716
9	0,9	0,0648
10	1	0,0586
11	1,1	0,0531
12	1,2	0,0480
13	1,3	0,0434
14	1,4	0,0393
15	1,5	0,0356
16	1,6	0,0322
17	1,7	0,0291
18	1,8	0,0263
19	1,9	0,0238

20	2	0,0216
21	2,1	0,0195
22	2,2	0,0177
23	2,3	0,0160
24	2,4	0,0145
25	2,5	0,0131
26	2,6	0,0118
27	2,7	0,0107
28	2,8	0,0097
29	2,9	0,0088
30	3	0,0079
31	3,1	0,0072
32	3,2	0,0065
33	3,3	0,0059
34	3,4	0,0053
35	3,5	0,0048
36	3,6	0,0044
37	3,7	0,0039
38	3,8	0,0036
39	3,9	0,0032
40	4	0,0029



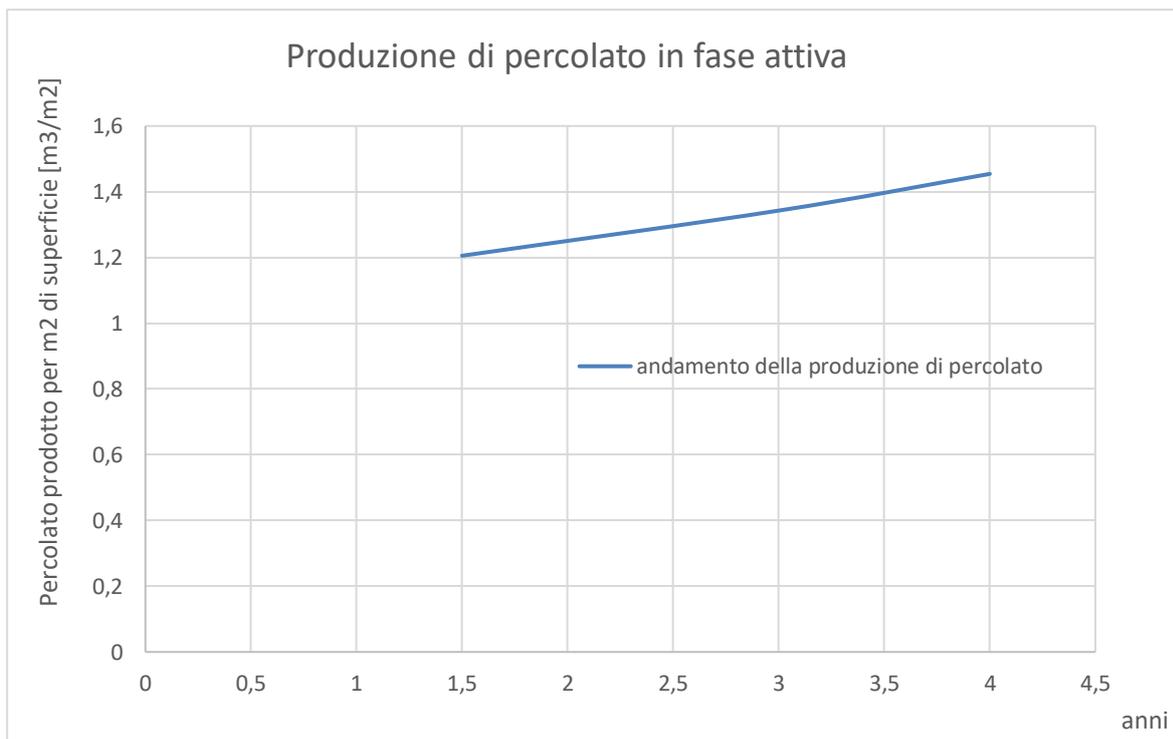
**Figura 4.18: gestione aerobica, andamento della produzione di percolato per m<sup>2</sup> di superficie in 40 anni**

In fase attiva si rimanda ai risultati in tabella 4.34:

**Tabella 4.34: gestione aerobica, produzione di percolato in fase attiva**

Anni	Percolato prodotto (m <sup>3</sup> prodotti/m <sup>2</sup> di superficie)
1,5	1,2053
3	1,3426
4	1,4542

In figura 4.19 si ha l'andamento grafico:



**Figura 4.19: gestione aerobica, andamento della produzione di percolato in fase attiva**

Mentre in fase passiva si hanno i risultati in tabella 4.36 e l'andamento in figura 4.20:

**Tabella 4.36: gestione aerobica, produzione di percolato in fase passiva**

Anni	Percolato prodotto [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> <sub>superficie</sub> ]
5	0,1594
6	0,0875
7	0,0792
8	0,0716
9	0,0648
10	0,0586
11	0,0531
12	0,0480
13	0,0434
14	0,0393
15	0,0356
16	0,0322
17	0,0291

18	0,0263
19	0,0238
20	0,0216
21	0,0195
22	0,0177
23	0,0160
24	0,0145
25	0,0131
26	0,0118
27	0,0107
28	0,0097
29	0,0088
30	0,0079
31	0,0072
32	0,0065
33	0,0059
34	0,0053
35	0,0048
36	0,0044
37	0,0039
38	0,0036
39	0,0032
40	0,0029



**Tabella 4.20: gestione aerobica, andamento della produzione di percolato in fase passiva**

Le considerazioni sono le medesime del caso anaerobico. Dopo il primo anno di chiusura risulta che la produzione di percolato è circa il 11% di quello prodotto in fase di riempimento, dopodichè la caduta esponenziale dei valori di produzione fa sì che dopo 15 anni il percolato prodotto sia ridotto al 22% del valore dopo la chiusura. Per arrivare ad una diminuzione del 90% è necessario aspettare circa 24 anni. A fini pratici, tuttavia, la produzione di percolato stimata dopo il capping raggiunge in breve valori bassissimi, dopo 24 anni si avrebbe una produzione di appena 14 l/m<sup>2</sup>, valore più che accettabile e verosimile, considerando i fenomeni di deterioramento delle barriere di protezione. Anche in questo caso, con un approccio più realistico, è ragionevole assumere che non vi sia alcuna infiltrazione di acqua dopo il completamento del capping, in quanto la presenza dello strato drenante soprastante l'argilla consente il rapido allontanamento delle acque di pioggia infiltratesi nel terreno, rispetto alla fenomenologia di filtrazione attraverso il materiale argilloso.

#### 4.2.4 Confronto tra le produzioni di percolato

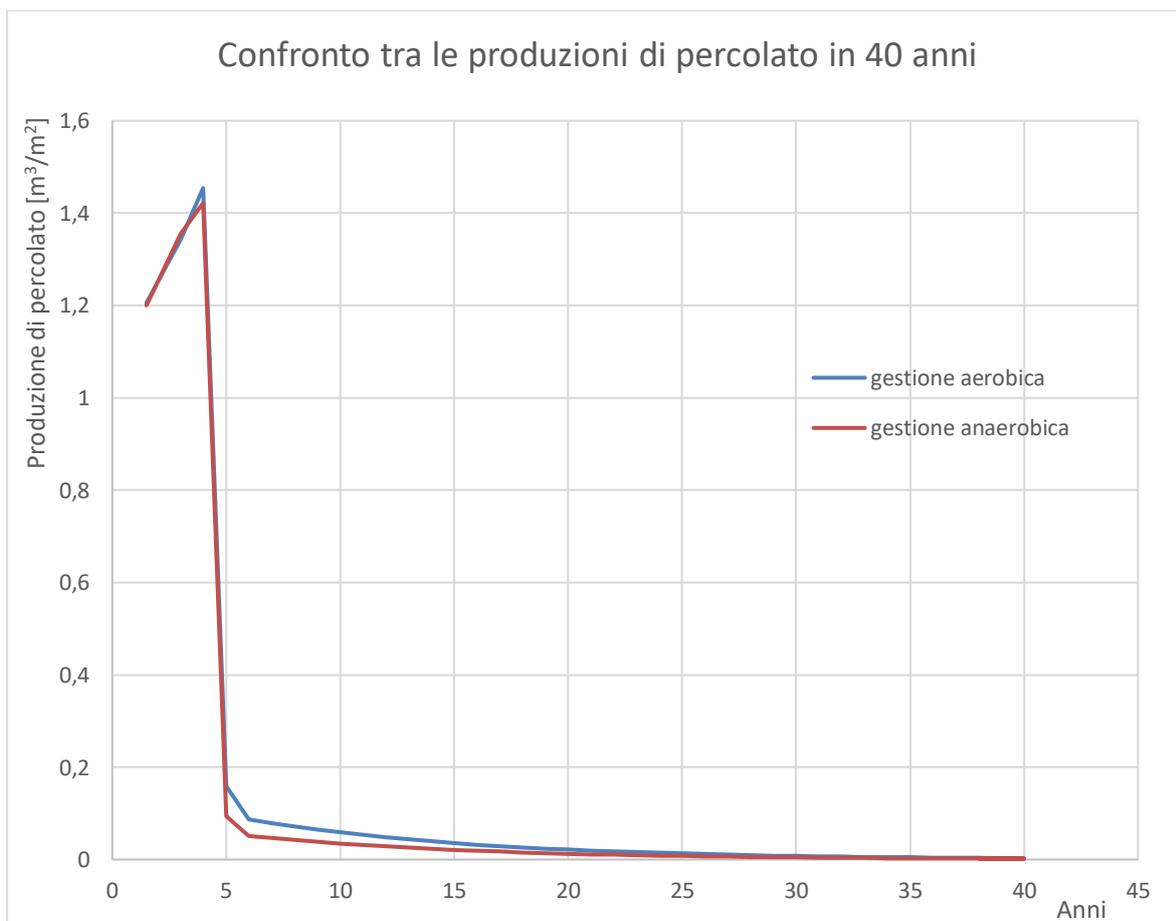
Come dimostrato dai calcoli, non vi sono quasi differenze tra le due modalità gestionali nella quantità di percolato che viene prodotto, poiché l'influenza delle reazioni differisce dai fenomeni di piovosità di circa due ordini di grandezza. In tabella 4.37 sono riassunti i risultati del confronto:

**Tabella 4.37: risultati del confronto tra gestione anaerobica ed aerobica per il percolato prodotto**

<b>Anni</b>	<b>Percolato prodotto con gestione anaerobica [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>superficie</sub>]</b>	<b>Percolato prodotto con gestione aerobica [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>superficie</sub>]</b>
1,5	1,2005	1,2053
3	1,3545	1,3426
4	1,4217	1,4542
5	0,094	0,1594
6	0,0516	0,0875
7	0,0467	0,0792
8	0,0422	0,0716
9	0,0382	0,0648
10	0,0346	0,0586
11	0,0313	0,0531
12	0,0283	0,0480
13	0,0256	0,0434
14	0,0232	0,0393
15	0,0210	0,0356
16	0,0190	0,0322
17	0,0172	0,0291
18	0,0155	0,0263
19	0,0141	0,0238
20	0,0127	0,0216
21	0,0115	0,0195
22	0,0104	0,0177
23	0,0094	0,0160
24	0,0085	0,0145
25	0,0077	0,0131
26	0,0070	0,0118
27	0,0063	0,0107

28	0,0057	0,0097
29	0,0052	0,0088
30	0,0047	0,0079
31	0,0042	0,0072
32	0,0038	0,0065
33	0,0035	0,0059
34	0,0031	0,0053
35	0,0028	0,0048
36	0,0026	0,0044
37	0,0023	0,0039
38	0,0021	0,0036
39	0,0019	0,0032
40	0,0017	0,0029

Graficamente si hanno gli andamenti nelle figure 4.21, 4.22 e 4.23:



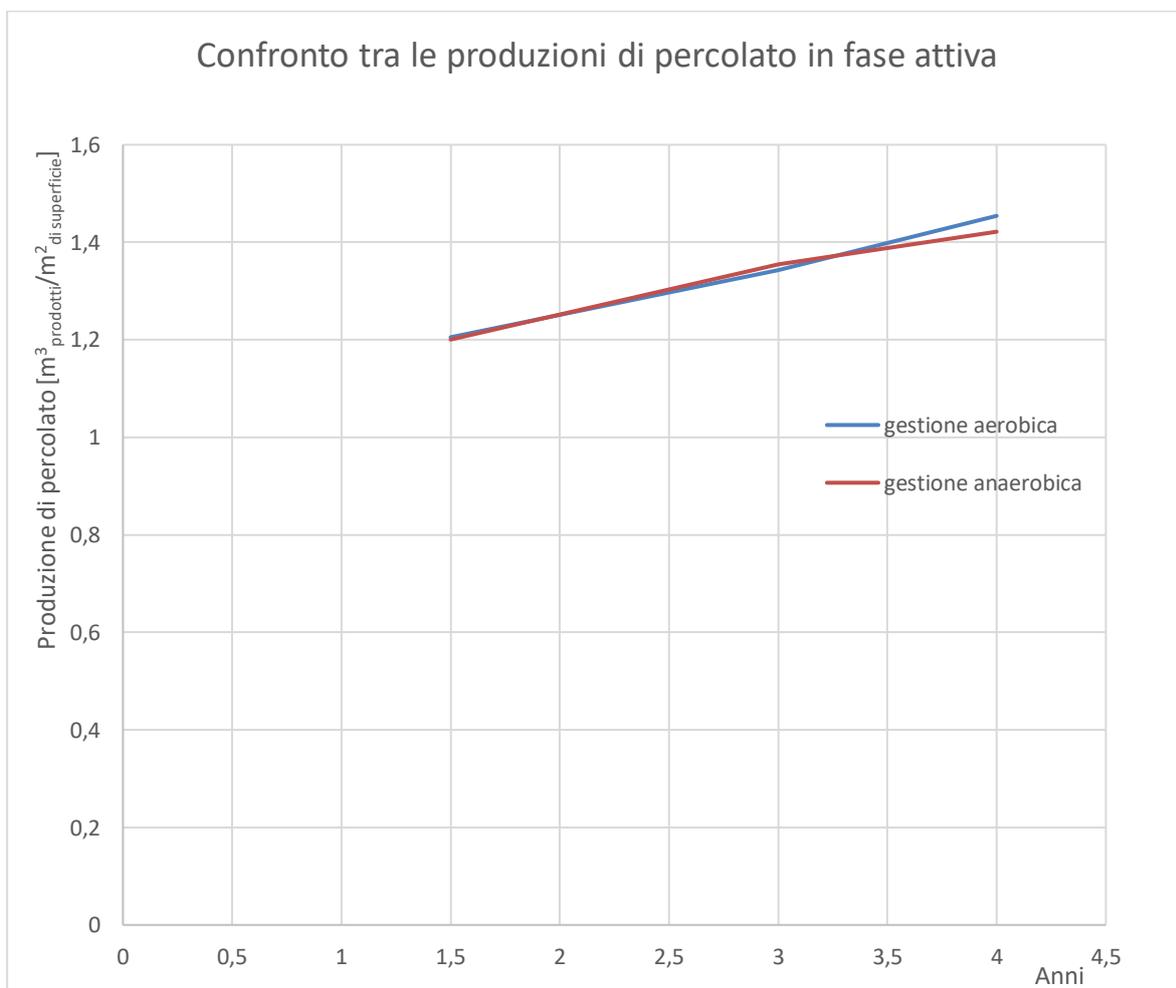
**Figura 4.21: confronto delle produzioni di percolato tra la gestione aerobica ed anaerobica in 40 anni**

Da questi risultati si deduce quanto predetto, ovvero che le reazioni influiscono minimamente sulla produzione di percolato, l'unica differenza che si può notare consiste nel diverso contributo che queste danno.

In fase attiva si hanno quindi i risultati in tabella 4.38 e l'andamento in figura 4. 22:

**Tabella 4.38: confronto delle produzioni di percolato in fase attiva tra la gestione aerobica ed anaerobica**

Anni	Percolato prodotto con gestione anaerobica [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> superficie]	Percolato prodotto con gestione aerobica [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> superficie]
1,5	1,2005	1,2053
3	1,3545	1,3426
4	1,4217	1,4542



**Figura 4.22: confronto delle produzioni di percolato in fase attiva tra la gestione aerobica ed anaerobica**

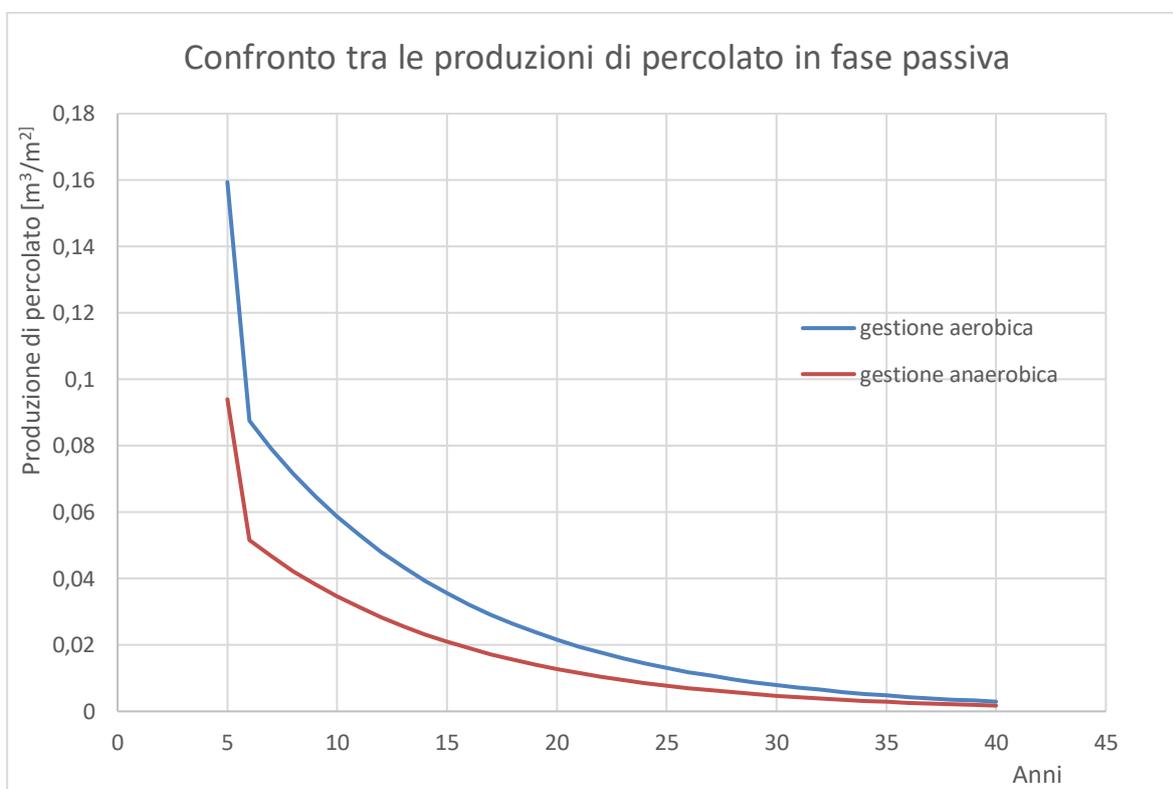
Durante la fase attiva, la fenomenologia di produzione del percolato è governata dalle piogge, per cui le reazioni che producono o consumano acqua non hanno impatto significativo, essendo inferiori di due/tre ordini di grandezza.

Mentre in fase passiva si hanno i valori in tabella 4.39 e gli andamenti in figura 4.23:

**Tabella 4.39: confronto delle produzioni di percolato in fase passiva tra la gestione aerobica ed anaerobica**

<b>Anni</b>	<b>Percolato prodotto con gestione anaerobica [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>superficie</sub>]</b>	<b>Percolato prodotto con gestione aerobica [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>superficie</sub>]</b>
5	0,0940	0,1594
6	0,0516	0,0875
7	0,0467	0,0792
8	0,0422	0,0716
9	0,0382	0,0648
10	0,0346	0,0586
11	0,0313	0,0531
12	0,0283	0,0480
13	0,0256	0,0434
14	0,0232	0,0393
15	0,0210	0,0356
16	0,0190	0,0322
17	0,0172	0,0291
18	0,0155	0,0263
19	0,0141	0,0238
20	0,0127	0,0216
21	0,0115	0,0195
22	0,0104	0,0177
23	0,0094	0,0160
24	0,0085	0,0145
25	0,0077	0,0131
26	0,0070	0,0118
27	0,0063	0,0107
28	0,0057	0,0097
29	0,0052	0,0088
30	0,0047	0,0079
31	0,0042	0,0072

32	0,0038	0,0065
33	0,0035	0,0059
34	0,0031	0,0053
35	0,0028	0,0048
36	0,0026	0,0044
37	0,0023	0,0039
38	0,0021	0,0036
39	0,0019	0,0032
40	0,0017	0,0029



**Figura 4.23: confronto delle produzioni di percolato in fase passiva tra la gestione aerobica ed anaerobica**

Le maggiori differenze si evidenziano durante la fase passiva, per la gestione anaerobica la produzione di percolato dopo il completamento del capping risulta  $94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{anno}}$ , cioè circa  $2,57 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$ , mentre per quella aerobica  $159,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{anno}}$ , ovvero circa  $4,37 \frac{\text{m}^3}{\text{ha giorno}}$ , quasi il doppio, questo perchè la produzione di biogas aerobico diminuisce il peso dei rifiuti che fermentano per  $\text{m}^2$  di superficie maggiormente rispetto al fenomeno anaerobico, e la capacità di campo risulta a sua volta ridotta. In entrambi i casi, i valori sono più che accettabili e in linea coi dati di letteratura. Va aggiunta un'ultima considerazione, se dal punto di vista

quantitativo il percolato non differisce di molto da una gestione all'altra, in termini qualitativi alcuni studi mostrano che vi sia una differenza sostanziale. Essendo la gestione aerobica un modello innovativo, non si hanno moltissimi dati di letteratura e studi a cui fare riferimento, tuttavia è possibile fare alcune considerazioni: il sistema aerobico prevede che il percolato raccolto possa essere ricircolato nel corpo discarica attraverso collettori verticali, e ciò comporta una riduzione dell'azoto nel percolato per mezzo dei processi di nitrificazione e denitrificazione del carbonio organico presente nei rifiuti, inoltre l'aerazione della discarica agisce positivamente sui parametri COD e BOD del liquido di percolazione e il suo trattamento risulta quindi meno oneroso, come mostra il seguente studio del 2000 che evidenzia le caratteristiche del percolato prodotto per differenti tipologie di discarica.

**Tabella 4.40: qualità del percolato nei diversi tipi di discarica (Hanascima - 2000 modificato)**

	<b>Parametro</b>	<b>Smaltimento</b>	<b>Dopo 6 mesi</b>	<b>Dopo 1 anno</b>	<b>Dopo 2 anni</b>
<b>Anaerobica</b>	BOD [mg/l]	40000-50000	40000-50000	30000-40000	10000-20000
	COD [mg/l]	40000-50000	40000-50000	30000-40000	10000-20000
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/l]	800-1000	1000	800	800-1000
	pH	Circa 6	Circa 6	Circa 6	Circa 6
<b>Semi-aerobica</b>	BOD [mg/l]	40000-50000	5000-6000	100-200	50
	COD [mg/l]	40000-50000	10000	1000-2000	1000
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/l]	800-1000	500	100-200	100
	pH	Circa 6	Circa 7	Circa 7,5	Circa 8
<b>Aerobica</b>	BOD [mg/l]	40000-50000	200-300	50	10
	COD [mg/l]	40000-50000	2000	1000	50-500
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/l]	800-1000	50	10	1-2
	pH	Circa 6	Circa 8,5	Circa 8,5	Circa 8,5

Secondo questo studio risulta evidente come la gestione aerobica porti vantaggi sicuramente in qualità, seppur non in quantità. Si può concludere che la suddetta modalità porta il percolato più velocemente al raggiungimento dei valori obiettivo QFD della normativa citata al capitolo 2.

## 5. Valutazioni di sostenibilità economica delle due gestioni

Per la valutazione dei costi e degli oneri finanziari è necessario stimare la durata della vita attiva della discarica, ovvero quattro anni, con una capacità complessiva di 480'000 t. Queste valutazioni hanno lo scopo di rapportare i costi di costruzione, gestione attiva e passiva dell'impianto nelle due modalità, aerobica ed anaerobica, al fine di stabilire quale delle due permetta una tariffa netta minima di smaltimento più bassa, dimostrando quindi quale gestione consenta la maggiore sostenibilità economica del processo. L'analisi viene condotta secondo le principali differenze stimate nei costi, e saranno esaminati i seguenti aspetti:

- Valutazione dei costi di allestimento;
- Valutazione dei costi di gestione operativa;
- Valutazione dei costi di gestione post-operativa;
- Bilancio economico complessivo per definire la tariffa netta minima di smaltimento;

E' necessario stabilire gli anni di gestione post-operativa per le due modalità gestionali, si considera che la fase post-operativa si concluda quando le emissioni residue arrivano al di sotto del 20% del limite normativo, quindi 10 anni per il caso aerobico e 25 anni per quello anaerobico.

Essenzialmente la stima si riduce al calcolo dei costi economici in tabella 5.1, ovvero le voci più rilevanti per il confronto gestione aerobica-anaerobica:

**Tabella 5.1: voci di conto economico rilevanti per il confronto**

<b>Costi</b>	<b>Gestione anaerobica</b>	<b>Gestione aerobica</b>	<b>Motivazione</b>
Realizzazione		>	La discarica aerobica richiede compressori per insufflare l'aria, e biofiltri per abbattere il metano, la discarica anaerobica invece necessita di una torcia o di un sistema di recupero del biogas.
Energia		>	Insufflare l'aria consuma ovviamente energia, anche la captazione è più onerosa perché la portata in gioco è maggiore.
Smaltimento percolato (gestione attiva)	>>		Il COD e il BOD nel percolato aerobico sono molto minori rispetto al caso anaerobico.
Costi di gestione passiva	>>		La fase passiva nel caso aerobico è più breve che nel caso anaerobico le emissioni di biogas si esauriscono prima.

### Differenze nei costi di realizzazione:

Per la discarica aerobica si prevede la seguente dotazione in più rispetto all'anaerobica:

- N° 3 compressori multistadio gas in parallelo;
- portata unitaria: 200 Nm<sup>3</sup>/h;
- portata complessiva: 600 Nm<sup>3</sup>/h;
- prevalenza in compressione > 200 hPa;
- potenza assorbita: 11 kW;
- N° 4 biofiltri con capacità di 150 Nm<sup>3</sup>/h ciascuno.

I costi per queste dotazioni sono riassunti in tabella 5.2:

**Tabella 5.2: gestione aerobica, costi supplementari per le apparecchiature**

Apparecchiature	Quantità	Capacità	Costo stimato
Compressori	3	200 Nm <sup>3</sup> /h	20'000 €
Biofiltri	4	150 Nm <sup>3</sup> /h	100'000 €
<b>Totale</b>	/	/	120'000 €

La differenza nei costi di realizzazione rapportata al quantitativo di rifiuti totali, 480000 t, porta ad un aumento per la gestione aerobica della tariffa di smaltimento di circa 0,25 €/t.

### Differenze nei consumi energetici:

Oltre al consumo dei compressori, anche la captazione per la gestione aerobica consuma più energia di quella anaerobica perché la portata di gas (aria + biogas) da captare nel primo caso è molto maggiore del secondo (solo biogas). La tabella 5.3 riassume la differenza in consumi energetici tra la gestione anaerobica, che prevede solo la captazione, e la gestione aerobica:

**Tabella 5.3: costi energetici per captazione e compressione**

Consumo energetico	Gestione anaerobica	Gestione aerobica
Captazione	1,5 kW	5 kW
Compressione	0	11 kW
<b>Consumo energetico totale</b>	1,5 kW	16 kW

Energia consumata annua per compressione e captazione per la gestione aerobica:  $E_{\text{aerobica}}$

$$E_{\text{aerobica}} = 16 \text{ [kW]} \cdot 24 \text{ [h]} \cdot 365 \text{ [giorni]} \cdot 10 \text{ [anni]} = 1'400'000 \text{ kWh}$$

Energia consumata annua per captazione per la gestione anaerobica:  $E_{\text{anaerobica}}$

$$E_{\text{anaerobica}} = 1,5 \text{ [kW]} \cdot 24 \text{ [h]} \cdot 365 \text{ [giorni]} \cdot 25 \text{ [anni]} = 330'000 \text{ kWh}$$

Costo energetico di 1 kWh = 0,054 € (valore per cui viene pagata l'energia escludendo tasse aggiuntive)

Consumo energetico compressori + captazione per la gestione aerobica =

$$= 1'400'000 \cdot 0,054 = 75'600 \text{ €}$$

Consumo energetico della captazione per la gestione anaerobica =  $330'000 \cdot 0,054 = 17'820 \text{ €}$

Costo per la potenza installata = 5 € / (kW·mese) (valore per cui viene pagata la potenza escludendo tasse aggiuntive)

Costo per potenza installata per la gestione aerobica =  $5 \cdot 10 \cdot 12 \cdot 16 = 9'600 \text{ €}$

Costo per potenza installata per la gestione anaerobica =  $5 \cdot 25 \cdot 12 \cdot 1,5 = 2'250 \text{ €}$

Costo energetico compressione + captazione + potenza installata per la gestione aerobica =  $9600 + 75'600 = 85'200 \text{ €}$

Costo energetico captazione + potenza installata per la gestione anaerobica =  $2'250 + 17'820 = 20'070 \text{ €}$

La differenza nei costi energetici rapportata al quantitativo di rifiuti totali, 480'000 t, porta ad un aumento della tariffa di smaltimento di circa 0,13 €/t per la gestione aerobica.

#### Differenze nei costi di smaltimento del percolato:

Si considera il percolato prodotto durante la fase attiva, poiché in fase passiva la produzione è drasticamente minore e non impatta sui costi, in tabella 5.3 sono riportate le produzioni per la due gestioni:

Tabella 5.4: costi di smaltimento per il percolato

	Gestione anaerobica	Gestione aerobica
<b>Percolato prodotto in fase attiva [m<sup>3</sup>]</b>	142'000	145'000
<b>COD</b>	10'000 - 20'000	< 2'000
<b>Costo di smaltimento al m<sup>3</sup></b>	75 €/ m <sup>3</sup> (60 – 90 €/ m <sup>3</sup> )	25 €/ m <sup>3</sup> (20 – 30 €/ m <sup>3</sup> )
<b>Costo di smaltimento totale</b>	10'650'000 €	3'625'000 €

La differenza tra i costi di smaltimento, ovvero 7'025'000 €, rapportata alle tonnellate complessive di rifiuto, 480'000 t, porta la gestione aerobica ad una riduzione di 14,6 €/t della tariffa di smaltimento rispetto a quella anaerobica.

### Differenze nei costi di gestione passiva:

Si è stabilito che la durata della gestione post-operativa finisse quando le emissioni fuggitive scendono al 20% del limite normativo di  $0,0005 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , quindi dalla figura 4.14 si ricava quanto riassunto in tabella 5.5:

**Tabella 5.5: durata della gestione passiva**

<b>Durata della gestione post-operativa</b>	
<b>Gestione anaerobica</b>	<b>Gestione aerobica</b>
25 anni	10 anni

Dall'esperienza si stima che 30 anni di post-gestione incidono su 10-15 €/t sulla tariffa di smaltimento del rifiuto, quindi 12,5 €/t come valore medio:

Costo di post-gestione per 30 anni =  $12,5 \cdot 480'000 = 6'000'000 \text{ €}$

Costo di post-gestione annuo =  $6'000'000 / 30 = 200'000 \text{ €/anno}$

Risparmio per la modalità aerobica =  $200'000 \cdot (25 - 10) = 3'000'000 \text{ €}$

La differenza tra i costi di post-gestione rapportata alle tonnellate totali di rifiuto, 480000 t, porta ad una riduzione della tariffa di smaltimento di 6,25 €/t a favore della modalità aerobica.

### Valutazione della differenza tra le tariffe:

In tabella 5.6 sono espresse le considerazioni finali sulle tariffe da imputare alle due modalità di gestione, presa come base di confronto la discarica anaerobica:

**Tabella 5.6: differenze in costi per le due gestioni in positivo e in negativo rispetto alla gestione anaerobica**

<b>Differenze in costi tra gestione anaerobica ed aerobica</b>	
Realizzazione	+0,25 €/t
Consumi energetici	+0,13 €/t
Smaltimento del percolato	-14,6 €/t
Gestione post-operativa	-6,25 €/t
<b>Totale</b>	<b>-20,5 €/t</b>

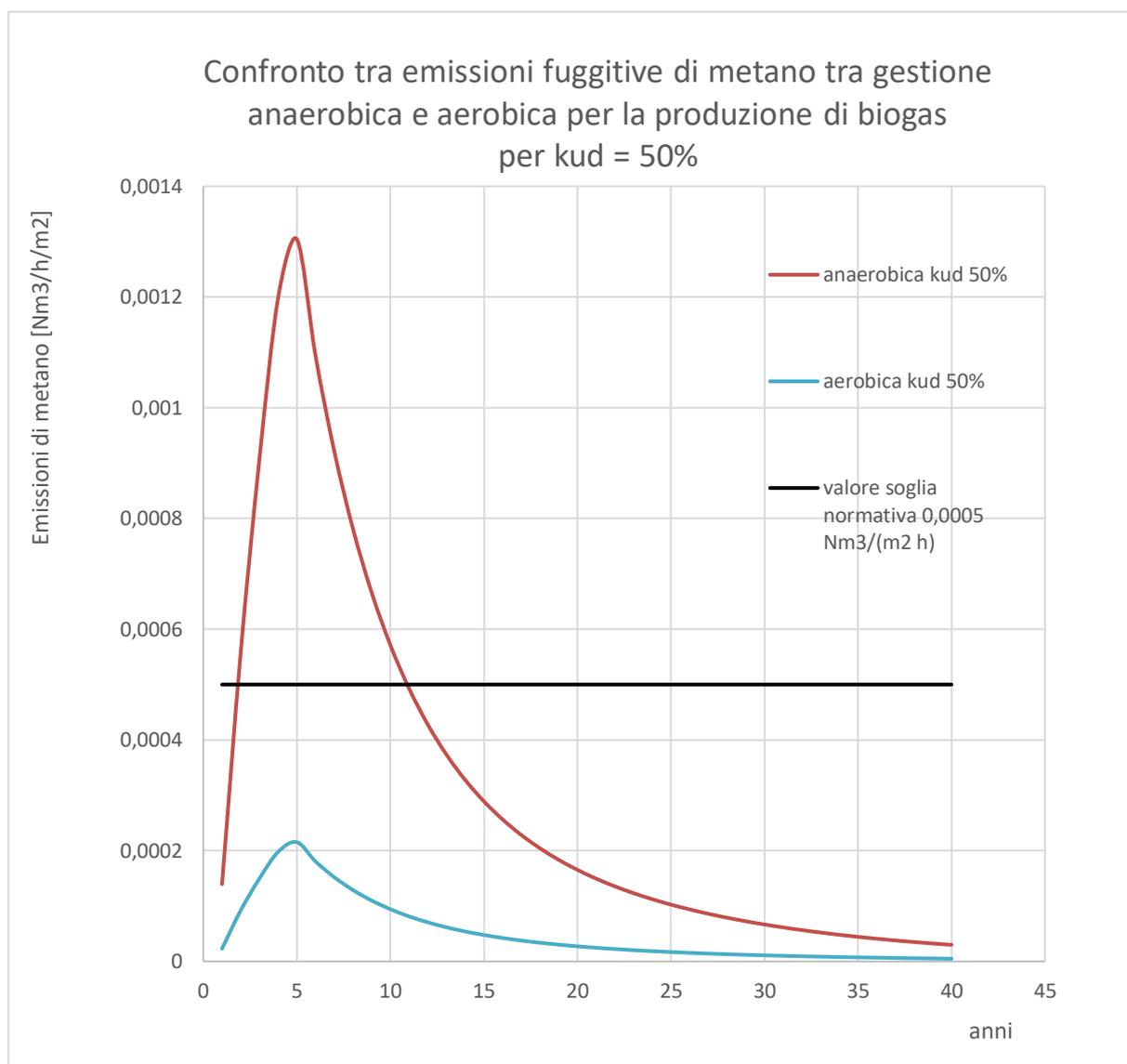
La differenza tra la tariffa di smaltimento per la discarica anaerobica ed aerobica differisce di circa 20 €/t a favore della seconda, e moltiplicando per le tonnellate di rifiuti totali, 480'000 t, si stima un risparmio di circa 10'000'000 €. Ponendo come esempio una tariffa di smaltimento per una discarica anaerobica di 120 €/t, un'eventuale gestione aerobica porterebbe tale valore a 100 €/t, e questo ulteriore fattore stabilisce che la modalità aerobica costituisce la miglior opzione anche dal punto di vista economico, riducendo la tariffa minima di smaltimento richiesta.

## 6. Conclusioni

Per concludere la trattazione, è necessario richiamare lo scopo prefissato al primo capitolo, rispondendo alla domanda “Una discarica può essere sostenibile?” Richiamando il concetto di sostenibilità ambientale citato più volte, ovvero “**Una discarica può essere definita sostenibile se raggiunge l’equilibrio ambientale nel tempo di una generazione, cioè 30-40 anni**”, è possibile stabilire che la risposta è affermativa, ma l’esito deve essere frutto di una consapevolezza maturata durante la fase di progettazione, ovvero una discarica nata con lo scopo di adempiere al criterio di sostenibilità, oltre che a chiudere il ciclo vita dei rifiuti. Si procede dunque a stabilire la modalità “migliore” e più “sostenibile” per gestire una discarica a servizio dell’economia circolare, riassunti i principali punti di confronto esaminati nel corso dei capitoli, e schematizzati in tabella 6.1 e nelle figure 6.1 e 6.2:

**Tabella 6.1: confronto tra le due gestioni per i vari aspetti esaminati**

<b>Valutazioni di confronto fra la gestione aerobica e anaerobica di una discarica</b>				
<b>Fattore di confronto</b>	<b>Gestione anaerobica</b>		<b>Gestione aerobica</b>	
	Possibile recupero energetico	Emissioni di metano	Possibile recupero energetico	Emissioni di metano
Biogas prodotto	Teoricamente sì, il metano è al 50% nel gas, ma la quantità è comunque molto bassa	Più alte e più durature nel tempo	No, metano presente al 2% nel gas	Sono più basse e si arrestano molto prima e già in fase di gestione attiva sono compatibili con l’ambiente
	Quantità	Qualità	Quantità	Qualità
Percolato prodotto	La quantità di percolato è più o meno la stessa, perché il fenomeno dipende dalle piogge	Parametri di smaltimento (es. COD e BOD) più elevati e onerosi da smaltire	/	La qualità del percolato è migliore, per cui lo smaltimento richiesto è meno oneroso
Durata della gestione post-operativa (in termini di raggiungimento del 20% del limite di emissioni)	25 anni		10 anni	
Costo di smaltimento per i conferitori del rifiuto (prestanti lo stesso margine di utile)	120 €/t		100 €/t	

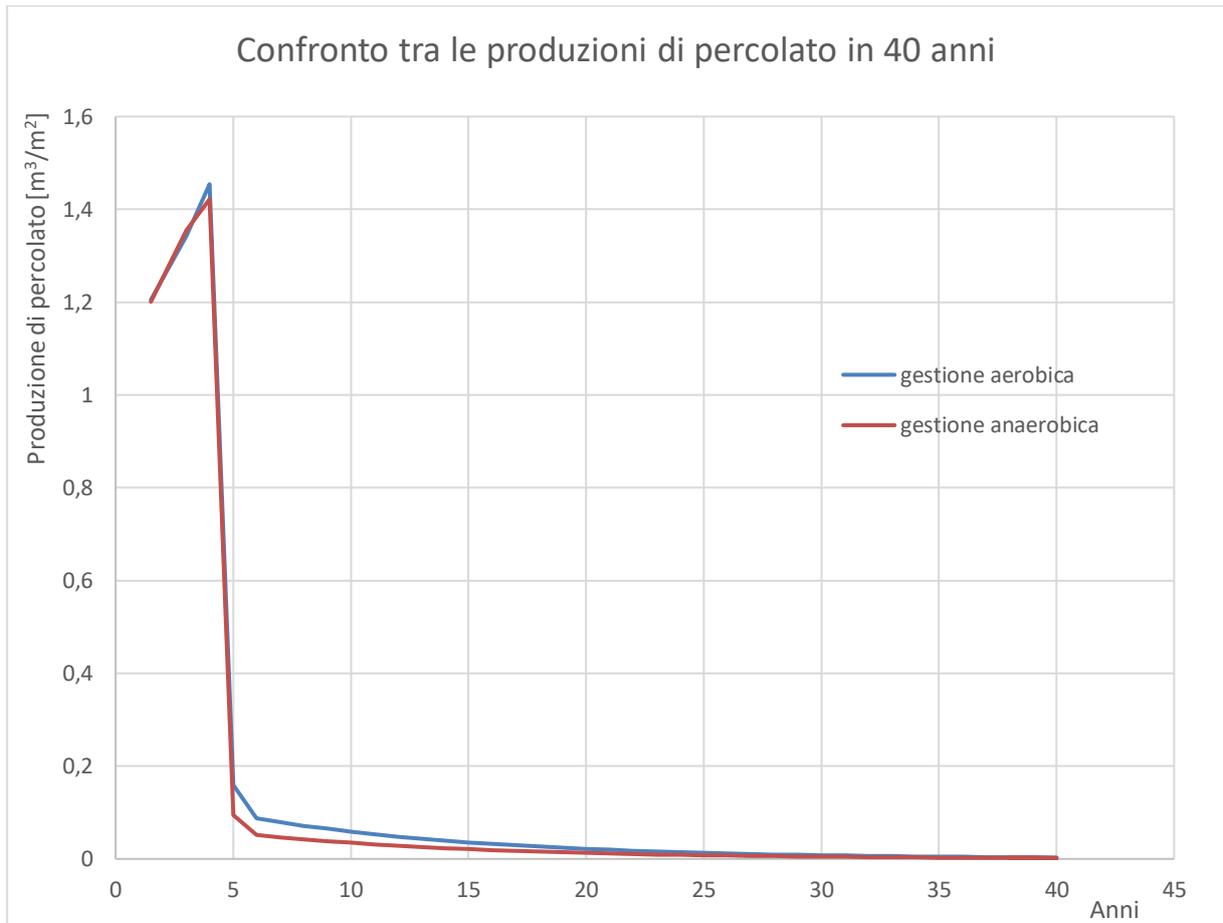


**Figura 6.1: Confronto tra le emissioni fuggitive di biogas per le due modalità gestionali in condizioni di umidità standard**

Come descritto in precedenza, il biogas prodotto con gestione anaerobica ha un alto contenuto di metano (50% del gas), quindi il recupero energetico è teoricamente possibile, il picco di maggior produzione è intorno al quinto anno, per poi calare bruscamente già negli anni seguenti. Si può concludere tuttavia che recuperare energeticamente il biogas non è conveniente per i seguenti motivi:

- La quantità di biogas producibile è molto bassa, ciò è dovuto al tipo di rifiuti scarsamente putrescibili o inerti conferibili in discarica;
- La bassa putrescibilità dei rifiuti e l'adeguato valore di umidità portano il picco massimo di produzione ad essere alto e ripido, ciò comporterebbe difficoltà nel dimensionare un motore elettrico per il recupero energetico del biogas, poiché se tarato per funzionare sul 50% del picco si romperebbe durante il quinto anno, se funzionasse invece per l'altezza del picco si avrebbe un recupero adeguato solo per quell'anno, mentre nei precedenti e successivi non si avrebbe un recupero energetico idoneo;

Questi due fattori portano a concludere che per una discarica a servizio dell'economia circolare il CH<sub>4</sub> è visto più come un inquinante che un combustibile, e ciò rende pressoché inutile recuperarlo, portando ad abatterlo tutto. La modalità aerobica in questo aspetto è migliore, poiché la modesta quantità di metano presente nel gas (aria al 75%, CO<sub>2</sub> al 23% e metano al 2%) ne migliora le prestazioni ambientali rispetto al caso anaerobico, portando le emissioni a valori molto più bassi e a un loro arresto in tempi molto più brevi, rimanendo al sotto dei limiti di emissione anche in fase di gestione attiva. Con la merceologia dei rifiuti scelta, entrambe le tipologie di gestione rispettano comunque il criterio di sostenibilità, ma risulta evidente che la gestione aerobica sia la scelta migliore.



**Figura 6.2: confronto tra le produzioni di percolato per le due modalità gestionali**

Per quanto riguarda il percolato non vi sono differenze apprezzabili in quantità, poiché sono i fenomeni di piovosità a controllarne la produzione, tuttavia le differenze in qualità evidenziate dallo studio in tabella 4.40 mostrano come una discarica gestita in modo aerobico porti vantaggi anche in termini di percolato, che risulta meno oneroso da smaltire. La tabella 6.2 conclude la trattazione schematizzando i principali vantaggi che il sistema aerobico comporta, dai risultati ottenuti dal confronto tra le due modalità.

Una discarica a servizio dell'economia circolare ha lo scopo di chiudere il ciclo vita della materia, ritirando la frazione di rifiuti non più recuperabile né valorizzabile, e per adeguare questo ruolo al criterio di sostenibilità è essenziale che l'impianto svolga il suo compito nel minor tempo possibile e soprattutto non creando impatti che possano compromettere l'ambiente. E' necessario quindi includere l'aspetto di sostenibilità ambientale sin dalla

progettazione, attribuendo alla discarica la funzione di chiudere il ciclo del rifiuto con la modalità gestionale più idonea, che risulta essere, da tutti i calcoli e le considerazioni effettuate, quella aerobica.

**Tabella 6.2: confronto finale tra le due gestioni per i vari aspetti esaminati, la gestione aerobica ha un'impiantistica più complessa di quella anaerobica, ma comporta migliori prestazioni ambientali ed economiche**

<b>VALUTAZIONI DI CONFRONTO FRA LA GESTIONE ANAEROBICA E AEROBICA DI UNA DISCARICA NELL'ECONOMIA CIRCOLARE</b>		
<b>PRESTAZIONI DI SOSTENIBILITA'</b>	<b>GESTIONE ANAEROBICA</b>	<b>GESTIONE AEROBICA</b>
PRESTAZIONI IMPIANTISTICHE: CONSUMI ENERGETICI	++	+
PRESTAZIONI AMBIENTALI: EMISSIONI DI BIOGAS E PERCOLATO	++	+++
PRESTAZIONI ECONOMICHE	+	++

## 7. Bibliografia

- Adani F, Tambone F., Genevini P. L., Calcaterra E. (1998). Stabilization of Municipal Solid Waste Fractions: a laboratory approach. Technology & Environment, UTA, International Edition, 1998.
- Blakey N.C., Bradshaw K., Reynolds P., Knox K. (1997). Bio-reactor landfill-A field trial of accelerated waste stabilisation. *Proceedings Sardinia 97. Sixth International Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, vol.I, 375-386.
- Brune M., Ramke H.G., Collins H.J., Hanert H.H. (1993). Incrustation processes in drainage systems of sanitary landfills. *Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, vol.II, 999-1035.
- Cossu R. (1995). The multi-barrier landfill and related engineering problems. *Proceedings Sardinia 95. Fifth International Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, vol.II, 3- 26.
- Cossu R., Raga R., Rossetti D., Experimental reduction of landfill emissions based on different concepts. The PAF model. *Proceedings Sardinia 2001. Eight International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, vol. I, 219-230.
- D'Antonio G. (1997). Trattamento dei rifiuti solidi urbani, Maggioli editore, Rimini, Italia.
- Emendo S.r.l (2018). Relazione Specialistica Gas Biologici, Progetto La Filippa 2.0, Sarezzano.
- Farquhar G.J. (1989). Overview of landfill liners using natural material. *Proceedings Sardinia 89. Second International Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, paper IX.
- Hanashima M. (1999). Pollution control and stabilization process by semiaerobic landfill type: the Fukuoka method. *Proceedings Sardinia 99. Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*. CISA, Cagliari, vol.I, 313-325.
- Higuchi S., Hanashima M. (1999). Wash-out solid waste landfill system. *Proceedings Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium*, eds. T.H. Christensen, R. Cossu, R. Stegmann, CISA Publisher, Italy, vol. I, 337-344.
- ISPRA (2016). Criteri tecnici per stabilire quando il trattamento non è necessario ai fini dello smaltimento dei rifiuti in discarica ai sensi dell'art. 48 della L. 28 dicembre 2015 n. 221, via Vitaliano Brancati, Roma.
- La Filippa 2.0 S.r.l. (2018). Relazione di presentazione del progetto, Progetto La Filippa 2.0, Genova.
- Magnano E. (2010) Biogas da discarica, EPC S.r.l., Roma.
- Regione Lombardia (2014). D.g.r. 7 ottobre 2014 - n. X/2461 Linee guida per la progettazione e gestione sostenibile delle discariche.
- Timothy G. Townsend *et al.* (2015). Sustainable Practices for Landfill Design and Operation, Springer Science + Business Media, New York, USA.



## **8. Raccomandazioni finali e ringraziamenti**

Un grande ringraziamento all'ingegner Federico Poli, alla sua disponibilità, al suo impegno, ai suoi preziosi consigli, e per avermi affiancato durante la stesura del mio lavoro, il suo contributo è stato fondamentale per farmi comprendere e applicare il concetto di sostenibilità ad una discarica, conciliando due tematiche contrapposte ma solamente in apparenza.

Un ringraziamento al geom. Enrico Magnano, che mi ha illustrato e spiegato il funzionamento del modello BIO-5 consentendomi di effettuare le simulazioni per le produzioni di biogas, inoltre mi ha fornito importanti conoscenze in ambito di discariche riguardo i parametri che controllano e regolano il fenomeno produttivo dei gas biologici.

Per ultimo, ma non per importanza, un ringraziamento alla mia famiglia, che mi ha sostenuto lungo questo difficile cammino dandomi la forza per rialzarmi nei momenti di maggiore difficoltà.



