

**POLITECNICO DI MILANO**  
**SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E**  
**IL TERRITORIO**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DO ALTO VALE DO ITAJAÍ (CEAVI)**  
**ENGENHARIA SANITÁRIA**



**ALBERTO PIZZOCCHERO**

**ANALISI DELLA PRODUZIONE DEI RESIDUI SOLIDI ORGANICI DELLA**  
**CITTA DI POMERODE (SC - BRASILE) E DIMENSIONAMENTO DI UN**  
**BIODIGESTORE ANAEROBICO PER IL LORO TRATTAMENTO**

**MILANO**

**2015**

**ALBERTO PIZZOCCHERO**

**ANALISI DELLA PRODUZIONE DEI RESIDUI SOLIDI ORGANICI DELLA  
CITTA DI POMERODE (SC - BRASILE) E DIMENSIONAMENTO DI UN  
BIODIGESTORE ANAEROBICO PER IL LORO TRATTAMENTO**

Relatore IT: Prof. Ficara Elena

Relatore BR: Prof. Priscila Kinas

Tesi di Laurea di  
Alberto Pizzocchero  
Matricola n. 815568

## **ESTRATTO**

Visto l'emergente problema del continuo aumento della produzione dei residui solidi urbani nelle città e di conseguenza una ricerca di nuove tipologie e metodologie di smaltimento, in questo elaborato si analizza in specifico il trattamento finale della frazione organica dei residui solidi urbani (FORSU) con la pianificazione primaria del dimensionamento parametrico di un biodigestore anaerobico. Come studio di caso è stata selezionata la città di Pomerode (SC) Brasile, dove si effettua una analisi sulla produzione dei residui solidi della città valutando la tipologia di raccolta, la previsione futura di produzione e la disposizione finale di questi residui. Utilizzando gli stessi indicatori di analisi utilizzati per la città brasiliana, si effettua una comparazione sulla produzione dei residui di quattro municipi italiani in provincia di Bergamo (IT): Albano Sant'Alessandro, Brusaporto, Pedrengo, Torre de' Roveri. Dopo aver comparato le due realtà produttive si possono verificare come la produzione di rifiuti non è influenzata solamente da indici popolazionali ma anche soprattutto da indici socio-economici. Dopo aver previsto una crescita popolazionale di entrambi gli agglomerati urbani, si stima la produzione futura dei residui solidi e eventuali metodi di trattamento. Concentrandosi sul caso di Pomerode e l'attuale sistema di trattamento (disposizione nella discarica di Timbò (SC)), si valuta l'impatto ambientale in termini di CH<sub>4</sub> immesso in atmosfera che questi residui generano con il metodo fornito dall'IPCC. Si sceglie poi come metodo alternativo di trattamento alla disposizione in discarica, il trattamento anaerobico con biodigestore a umido. Si effettua dunque una pianificazione preliminare del dimensionamento parametrico di un reattore a digestione anaerobica per produrre biogas dai residui solidi organici prodotti dalla città di Pomerode. Si stima poi la produzione di energia elettrica derivabile dal biogas generato e dopo una analisi economica del dimensionamento, si valuta il tempo di ritorno dell'investimento economico e la fattibilità del progetto. La scelta della costruzione o no del biodigestore è esclusivamente una scelta politica che l'amministrazione attuale brasiliana deve prendere. Si può notare che inizialmente non si lavora a pieno carico e quindi non si ha un immediato ritorno economico, ma si avranno benefici socio-economici-ambientali solo dopo la chiusura della discarica di Timbò, quando il biodigestore lavorerà a pieno carico e si avrà così un'alternativa di trattamento ambientalmente corretta e già funzionante.

**Parole chiave:** Frazione Organica di Residui Solidi Urbani (FORSU), Biodigestore anaerobico, Biogas.

## **ABSTRACT**

Given the emerging problem of continuous increasing production of municipal solid waste in cities and therefore a search for new types and methods of disposal, in this paper is analysed specifically the final treatment of the organic fraction of municipal solid waste (OMSW) with the primary planning of parametric dimensioning of a anaerobic biodigester. As a case study was selected the city of Pomerode (SC) Brazil, where is made an analysis on the production of solid waste in the city considering the type of collection, the future production and the final disposition of these residues. Using the same analysis indicators used in the Brazilian city, a comparison is made on the production of residues of four municipalities in the Italian province of Bergamo (IT): Albano Sant'Alessandro, Brusaporto, Pedrengo, Torre de Roveri (ABPT). After comparing the two cities is observed that the production is not only influenced by populational indices but especially by socio-economic indices. Having provided a populational growth of both urban areas, it is estimated a future production of solid waste and any treatment methods. By focusing on the case of Pomerode and the current treatment system (position in the Timbo (SC) landfill), assessing the environmental impact in terms of CH<sub>4</sub> emitted into the atmosphere that these residues generated by the method provided by the IPCC. It's choosed as an alternative method of treatment to the disposal in landfills, the anaerobic treatment with semi-dry biodigester. Therefore a primary planning is made of parametric dimensioning of an anaerobic reactor to produce biogas from organic solid wastes produced by the city of Pomerode. It's then estimated the production of electricity from biogas generated and after an economic analysis, it is estimated the returning time of investment and the economic feasibility of the project. The choice of building or not the biodigester is exclusively a political choice that the current administration should take. May be noticed that initially the biodigester is not working at full load and so there isn't an immediate economic return, but will have significant socio-economic-environmental resulST only after the closure of the Timbo's landfill, when the biodigester will work at full load and will be an environmentally correct and already working alternative treatment.

**Key Words:** OMSW ( Organic Municipal Solid Waste), Anaerobic Biodigester, Biogas.

## **NOMENCLATURA**

GHG = Greenhouse gases ( gas effetto stufa );

GH = Greenhouse effect ( effetto stufa );

CIB = Consorzio Italiano Biogas;

BG = Bergamo;

SC = Santa Catarina;

CHP = cogeneration heat and power ( cogenerazione di calore e potenza );

HRT = Hidraulic redention time ( tempo di residenza idraulica );

COD = domanda chimica di ossigeno;

ST = solidi totali;

SV = solidi totali volatili;

OLR = Organic Loading Rate ( carico organico volumetrico );

SRT = Sludge retention time ( tempo di residenza cellulare );

IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica;

ISU = Indice di Sviluppo Umano;

ISTAT = Istituto Nazionale di Statistica;

PIL = Prodotto interno lordo;

ONU = Organizzazione Nazioni Unite;

ABPT = Albano Sant' Alessandro, Brusaporto, Pedrengo, Torre de' Roveri;

FORSU = Frazione Organica Residui Solidi Urbani;

Figura 1.1 – Andamento popolazione mondiale	13
Figura 1.2 – Consumo mondiale di energia	14
Figura 1.3 – Tipo di biomassa	15
Figura 1.4 – Picco di petrolio	17
Figura 1.5 – Emissioni annuali antropogeniche	18
Figura 1.6 – Possibili utilizzi del biogas	21
Figura 1.7 – Microturbina	23
Tabella 1 – Produzione biogas per tipologia di substrato	27
Tabella 1.1 – Composizione chimica dei fanghi	28
Tabella 1.2 – Regolamento europeo per l'uso del biogas	29
Tabella 1.3 – Limite di sostanze tossiche presenti nei digestati in Germania	31
Tabella 1.4 – Decreti legislativi applicati in Italia	33
Tabella 2.1 – Composizione del biogas	34
Figura 2.1 – Processo anaerobico	35
Tabella 2.2 – Reazioni di produzione dei VFA	37
Tabella 2.3 – Reazioni in acetogenesi	38
Tabella 2.4 – Reazione dei microrganismi omoacetogeni	38
Tabella 2.5 – Metanogenesi acetoclastica e idrogenotrofa	39
Tabella 2.6 – Solfatogenesi	40
Tabella 2.7 – Relazione temperatura e HRT	41
Figura 2.2 – Effetto della temperatura sulla cinetica di degradazione	42
Tabella 2.8 – Comparazione tra mesofilia e termofilia	43
Tabella 2.9 – Solubilità dei gas	44
Figura 2.3 – Metanogenesi in funzione del pH	45
Figura 2.4 – Relazione tra HRT e OLR	50
Figura 2.5 – Digestore Standard	51
Figura 2.6 – Digestore ad alto carico	53
Figura 2.7 – Digestore a doppio carico	54
Tabella 3.1 – FCM	61
Tabella 3.2 – FCD per ogni componente	61
Figura 3 – Schema di pianificazione	63
Tabella 3.3 – Caratteristiche del processo di digestione	67
Tabella 3.4 – Processo umido	67
Tabella 3.5 – Processo semi-secco	68
Tabella 3.6 – Processo secco	68
Figura 3.0 – Bilancio di massa	73
Figura 3.1 – Localizzazione Pomerode	74
Figura 3.2 – Geomorfologia di Pomerode	75
Tabella 3.7 – Clima Pomerode	76
Tabella 3.8 – Popolazione di Pomerode	76
Figura 3.3 – Andamento della popolazione di Pomerode	76
Figura 3.4 – PIL Pomerode	77
Figura 3.5 – Mappa di Pomerode	79
Tabella 3.9 – Produzione dei rifiuti di Pomerode 2014	80
Figura 3.6 – Localizzazione Comuni Italiani	81
Figura 3.7 – Divisione Provincia di Bergamo	82
Tabella 3.10 – Caratteristiche Comuni Italiani	84
Tabella 3.11 – Clima Comuni Italiani	84
Tabella 3.12 – Tendenza popolazioni	85
Figura 3.8 – Andamento popolazioni Comuni Italiani	85

Tabella 3.13 – Calendario sistema di raccolta dei Comuni Italiani	88
Tabella 3.14 – Produzione rifiuti dei Comuni Italiani	91
Figura 3.9 – Tipologia di rifiuti dei Comuni Italiani	91
Tabella 4.1 – Confronto Pomerode e ABPT	94
Tabella 4.2 – Dati storici della popolazione di Pomerode	95
Figura 4.1 – Metodo aggiustamento lineare	96
Figura 4.2 – Metodo curva di potenza	96
Figura 4.3 – Metodo equazione esponenziale	96
Figura 4.4 – Metodo equazione logaritmica	96
Tabella 4.3 – Previsione di crescita della popolazione di Pomerode	97
Figura 4.5 – Metodo aggiustamento lineare	98
Figura 4.6 – Metodo curva di potenza	98
Figura 4.7 – Metodo equazione esponenziale	98
Figura 4.8 – Metodo equazione logaritmica	98
Tabella 4.4 – Previsione di crescita della popolazione di ABPT	99
Tabella 4.5 – Previsione di produzione caso A – Appendice VII	136
Tabella 4.6 – Previsione di produzione caso B – Appendice VIII	137
Tabella 4.7 – Previsione di produzione caso C – Appendice IX	138
Tabella 4.8 – Previsione di produzione ABPT – Appendice X	139
Tabella 4.9 – Parametri calcolo della produzione del volume di metano	103
Figura 4.9 – Emissioni di metano in discarica	105
Tabella 4.10 – Produzione giornaliera dei rifiuti in Pomerode	104
Tabella 4.11 – Valori OLR	105
Tabella 4.12 – Valori HRT	106
Tabella 4.13 – Volume di diluizione	108
Tabella 4.14 – Valori SPB	109
Tabella 4.15 – Produzione di biogas	109
Tabella 4.16 – Bilancio di massa	110
Tabella 4.17 – Produzione di energia elettrica	111
Tabella 4.18 – Tipo di reattori	112
Tabella 4.19 – Costo di investimento	113
Tabella 4.20 – Costi di gestione	114
Tabella 4.21 – Guadagni annuali	115
Figura 4.10 – Andamento costi, guadagni, ricavi	116

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>11</b>
1.1 OBIETTIVO.....	11
1.1.1 <i>Obiettivi specifici</i> .....	11
1.2 GIUSTIFICATIVA.....	12
1.3 INTRODUZIONE .....	12
1.3.1 <i>Fattore energetico</i> .....	16
1.3.2 <i>Fattore ambientale</i> .....	18
1.3.3 <i>Fattore economico sociale</i> .....	19
1.4 ALTERNATIVE DI UTILIZZO DEL BIOGAS .....	20
1.4.1 <i>Combustione diretta</i> .....	21
1.4.2 <i>Cogenerazione CHP</i> .....	21
1.4.3 <i>Micro turbine</i> .....	22
1.4.4 <i>Biometano</i> .....	23
1.5 MATRICI UTILIZZABILI PER DIGESTIONE ANAEROBICA .....	24
1.5.1 <i>Biomasse agroindustriali</i> .....	24
1.5.2 <i>Reflui zootecnici</i> .....	25
1.5.3 <i>Fanghi di depurazione</i> .....	27
1.5.4 <i>Frazione organica da raccolta differenziata</i> .....	28
1.6 LEGISLAZIONE .....	28
1.6.1 <i>Francia</i> .....	30
1.6.2 <i>Germania</i> .....	31
1.6.3 <i>Italia</i> .....	32
<b>2. PRODUZIONE DEL BIOGAS.....</b>	<b>34</b>
2.1 DIGESTIONE ANAEROBICA.....	34
2.1.1 <i>Idrolisi</i> .....	36
2.1.2 <i>Acidogenesi</i> .....	36
2.1.3 <i>Acetogenesi</i> .....	38
2.1.4 <i>Metanogenesi</i> .....	39
2.1.5 <i>Solfatogenesi</i> .....	40
2.2 PARAMETRI DI INFLUENZA DELLA AD .....	40
2.2.1 <i>Temperatura</i> .....	41
2.2.2 <i>pH</i> .....	44
2.2.3 <i>VFA Acidi grassi volatili</i> .....	45
2.2.4 <i>Ammoniaca NH<sub>3</sub></i> .....	46
2.2.5 <i>Pezzatura e Umidità</i> .....	46
2.2.6 <i>Macro e Micro nutrienti</i> .....	47
2.2.7 <i>COD domanda chimica di ossigeno</i> .....	47
2.3 PARAMETRI DI DIMENSIONAMENTO DI UN REATTORE.....	48
2.3.1 <i>Carico organico volumetrico ( OLR )</i> .....	48
2.3.2 <i>Tempo di residenza idraulico (HRT)</i> .....	49
2.3.3 <i>Tempo di residenza cellulare (SRT)</i> .....	50
2.4 TIPOLOGIE DI IMPIANTI .....	51



2.4.1	<i>Digestore standard (a freddo)</i> .....	51
2.4.2	<i>Digestore ad alto carico</i> .....	52
2.4.3	<i>Digestore a due stadi</i> .....	53
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>55</b>
3.1	INDICATORI DI PRODUZIONE DEI RIFIUTI .....	56
3.2	METODO DI PREVISIONE DI CRESCITA POPOLAZIONALE.....	57
3.3	CALCOLO IMPATTO AMBIENTALE DEI RIFIUTI IN DISCARICA.....	58
3.4	DIMENSIONAMENTO BIODIGESTORE .....	62
3.4.1	<i>Pianificazione</i> .....	63
3.4.2	<i>Dimensionamento</i> .....	69
3.5	POMERODE.....	73
3.5.1	<i>Fattori territoriali</i> .....	74
3.5.2	<i>Fattori socio-economici</i> .....	77
3.5.3	<i>Fattori di logistici della raccolta da parte delle amministrazioni</i> .....	77
3.5.4	<i>Quantità residui prodotti</i> .....	79
3.6	COMUNI ITALIANI .....	81
3.6.1	<i>Fattori territoriali</i> .....	82
3.6.2	<i>Fattori socio-economici</i> .....	85
3.6.3	<i>Fattori logistici della raccolta da parte delle amministrazioni</i> .....	86
3.6.4	<i>Quantità di rifiuti prodotti</i> .....	90
<b>4.</b>	<b>ANALISI DEI RISULTATI</b> .....	<b>93</b>
4.1	CONFRONTO TRA LE DUE REALTÀ .....	93
4.2	PREVISIONE DI CRESCITA POPOLAZIONALE .....	95
4.2.1	<i>Pomerode</i> .....	95
4.2.2	<i>Comuni italiani</i> .....	97
4.3	PREVISIONE DI PRODUZIONE DI RIFIUTI ORGANICI.....	99
4.3.1	<i>Pomerode</i> .....	100
4.4	IMPATTO AMBIENTALE DEI RESIDUI IN DISCARICA .....	102
4.5	DIMENSIONAMENTO BIODIGESTORE .....	104
4.5.1	<i>Contenuto %ST e %STV</i> .....	105
4.5.2	<i>Scelta della tipologia di processo</i> .....	105
4.5.3	<i>Scelta OLR o HRT</i> .....	105
4.5.4	<i>Quantità residui in entrata al sistema</i> .....	106
4.5.5	<i>Volume Digestore</i> .....	107
4.5.6	<i>Diluizione substrato</i> .....	107
4.5.7	<i>Produzione biogas</i> .....	108
4.5.8	<i>Bilancio di massa</i> .....	109
4.5.9	<i>Produzione energia elettrica</i> .....	110
4.5.10	<i>Costi di installazione e periodi di ritorno previsto</i> .....	112
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONE</b> .....	<b>117</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>121</b>

**7. APPENDICI..... 126**

# 1. INTRODUZIONE

## 1.1 Obiettivo

Lo sviluppo di questo lavoro si concentra sul dimensionamento e pianificazione dell'installazione di un bioreattore anaerobico che utilizza come substrato rifiuti organici prodotti dalla città di Pomerode (SC) in Brasile, per la produzione di biogas. Si valuta poi la fattibilità del progetto in termini di produzione di energia e costi di investimento, per poter verificare se è fattibile concentrarsi su questa forma di produzione di energia e trovare dunque un sistema alternativo di trattamento dei rifiuti organici prodotti in Pomerode per ridurre la loro collocazione nella discarica di Timbò (SC) e di conseguenza ridurre l'emissione di biogas in atmosfera. È anche effettuata la stessa analisi della quantità e qualità della produzione di rifiuti organici nelle aree urbane di quattro comuni italiani: Albano Sant'Alessandro, Brusaporto, Pedrengo e Torre de Roveri, in provincia di Bergamo. Con questa analisi si può fare un confronto tra la metodologia di raccolta dei rifiuti nelle città italiane e nella città brasiliana, in modo che, essendo previsto uno sviluppo futuro di Pomerode con le caratteristiche delle città bergamasche, è illustrato un modello funzionale e più efficiente di quello attualmente utilizzato in Brasile. Con l'efficientamento della raccolta dei rifiuti, migliora la qualità della FORSU entrante nel biodigestore anaerobico e di conseguenza migliorano i ricavi e la fattibilità del progetto.

### 1.1.1 Obiettivi specifici

- Analisi della produzione di rifiuti organici e del sistema di raccolta della città di Pomerode (SC);
- Analisi della produzione di rifiuti organici e del sistema di raccolta dell'agglomerato urbano dei Comuni italiani di: Albano, Brusaporto, Pedrengo, Torre de Roveri (BG);
- Confronto tra i due sistemi e possibili suggerimenti per migliorare la qualità dei rifiuti organici indirizzabili a un bioreattore anaerobico;
- Applicazione di un bioreattore anaerobico per produrre biogas e di conseguenza energia elettrica a partire dai residui;
- Pianificazione dell'installazione di un bioreattore anaerobico con i costi e la fattibilità del progetto;

- Quantificazione della diminuzione di rifiuti organici indirizzati in discarica e riduzione dell'immissione di gas serra in atmosfera;
- Analisi ambientale di costo beneficio e analisi economica di costo beneficio dell'applicazione di bioreattori anaerobici per smaltire rifiuti organici.

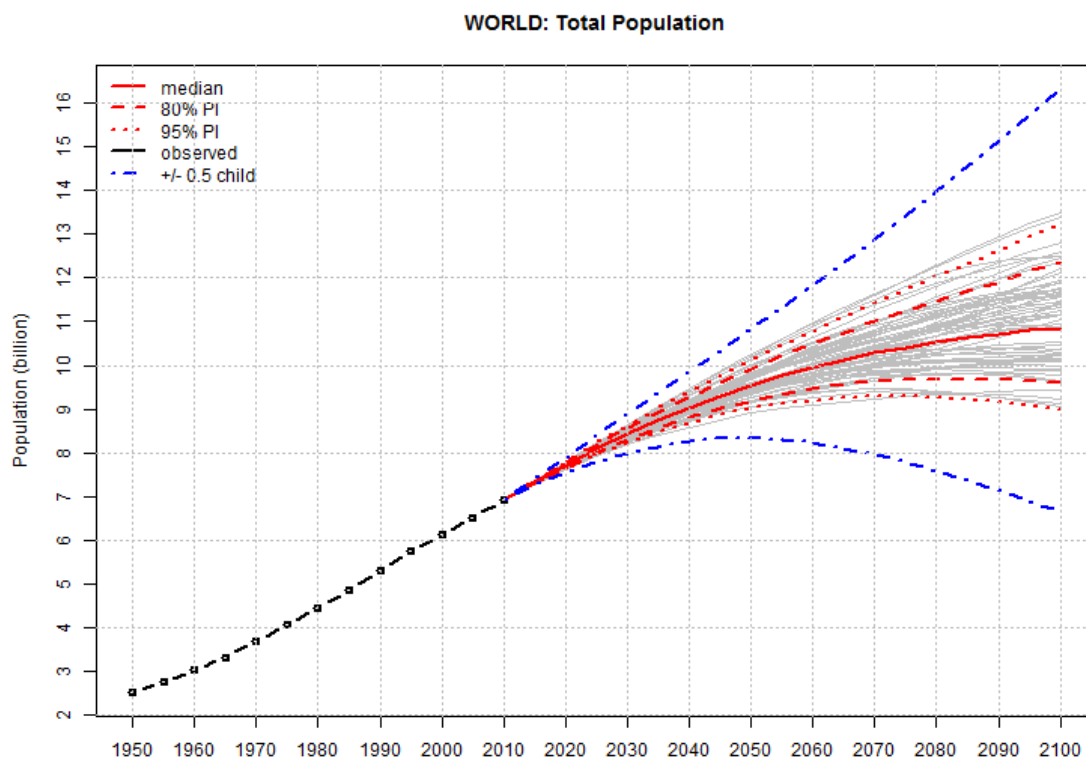
## **1.2 Giustificativa**

Il biogas si presenta come una nuova e valida alternativa di energia rinnovabile e facilmente producibile, generando vantaggi ambientali e socio-economici per la società e per l'ambiente stesso. Utilizzare questa forma di energia può ridurre i costi di gestione del sistema di raccolta dei rifiuti delle città, diminuire la quantità di residui inviati in discarica, creare una diversificazione energetica per il sostentamento delle funzioni della città analizzata.

## **1.3 Introduzione**

L'attuale aumento della popolazione mondiale porta a dover considerare diverse strategie future di sviluppo per soddisfare la crescente domanda di servizi e risorse. Il nostro pianeta non è in grado di supportare e di fornire tutte le richieste crescenti che la civiltà attuale sta domandando, per questo motivo è necessario trovare alternative ambientalmente sostenibili per permettere una vita equilibrata delle generazioni future.

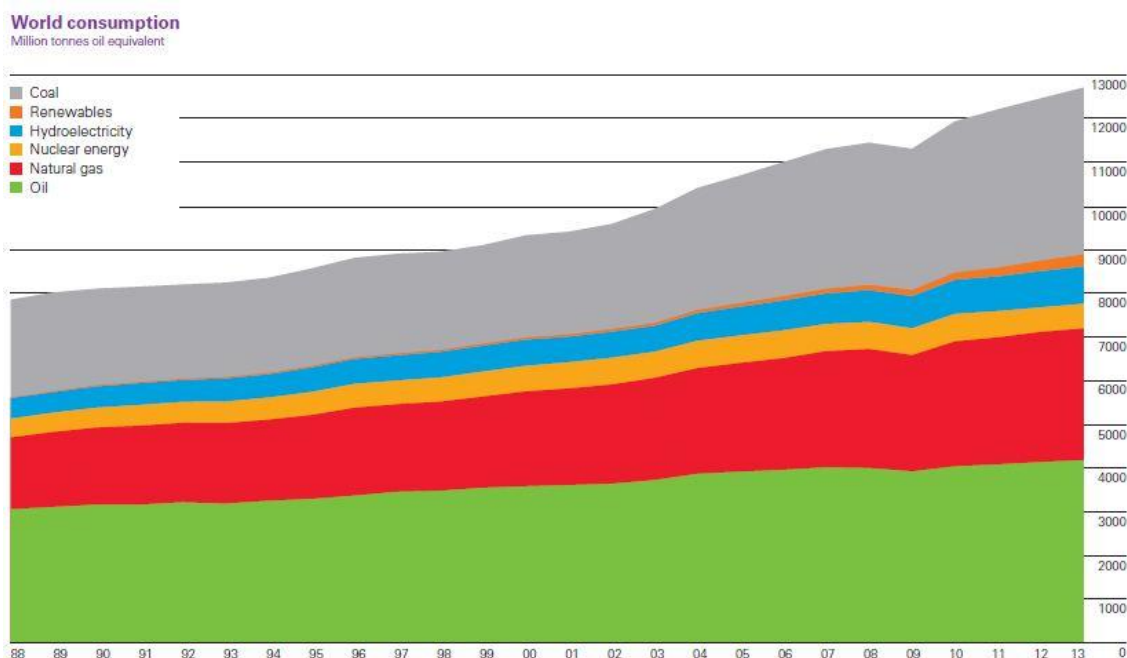
Ricerche stimano che la popolazione mondiale dovrebbe passare da 6,5 miliardi nel 2005 a quasi 9,2 miliardi nel 2050, con la maggior parte della crescita della popolazione nei paesi meno sviluppati (UN, 2014) Figura 1.1.



**Figura 1.1 – Il grafico mostra stime e proiezioni probabilistiche della popolazione totale di 233 paesi o aree, 35 aggregati geografici e 4 gruppi di reddito della Banca mondiale a partire dal luglio 2013. Le proiezioni si basano sulle proiezioni probabilistiche di fertilità totale e la speranza di vita alla nascita, sulla base di stime della revisione del 2012 del World Population Prospects. Queste proiezioni probabilistiche di fertilità totale e la speranza di vita alla nascita sono state effettuate con un Bayesian Hierarchical Model. Le cifre mostrano la (deterministica) variante alta e bassa della revisione del 2012 del World Population Prospects, così come la mediana probabilistica e il 80 e 95 per cento di intervalli di previsione delle proiezioni demografiche probabilistiche; Fonte (UN, 2014).**

Di particolare interesse è la popolazione nelle zone costiere che dovrebbe crescere da 1,2 miliardi di persone (c. 1990) tra il 1,8 e il 5,2 miliardi entro il 2080 (RABALAIS et. al. 2008). La crescita della popolazione aumenterà la domanda di cibo, terra, energia e altre risorse naturali portando ad una maggiore produzione agricola, maggiore produzione industriale, aumento di produzione di rifiuti solidi urbani, un maggiore combustione di combustibili e di conseguenza un aumento delle emissioni di gas serra, fino all'esaurimento della risorse.

Si considerano tutte le risorse naturali come le fonti alimentari, minerarie, idriche ed energetiche disponibili sulla Terra per l'uomo e a lui utili per la sopravvivenza della civiltà e per lo sviluppo di nuove tecnologie. Analizzando le risorse energetiche mondiali, si può notare che il consumo e la produzione di energia è aumentato del +2,3% nell'anno 2013, un netto aumento rispetto al +1,8% del 2012, con petrolio, carbone e energia nucleare a fare da traino a questo innalzamento. Nonostante tutto, la crescita del consumo energetico è al di sotto della media mondiale del +2,5% previsto nella media di 10 anni, con tutte le altre fonti energetiche in diminuzione escludendo appunto le precedentemente citate. Il petrolio rimane il leader mondiale tra le energie utilizzate con il 32,9% di consumo, ma ha abbassato il prezzo al barile che si è stabilmente posizionato al di sotto dei 100\$ per il terzo anno consecutivo. Le economie emergenti hanno rappresentato il +80% dell'aumento globale di consumo energetico ed è per questo motivo che bisogna analizzare quali tipologie di energie questi paesi intendono utilizzare per sostenere il loro sviluppo ed evitare così di dipendere ancora solamente da un'unica fonte energetica ampiamente già utilizzate come i combustibili fossili (BP, 2014) Figura 1.2.



**Figura 1.2 - Il consumo di energia primaria mondiale; Fonte (BP, 2014).**

Per sopperire a questo aumento della domanda energetica, bisogna guardare sempre più allo sviluppo e all'incremento di utilizzo delle energie rinnovabili come

quella solare, eolica, geotermica, di biomassa, combustibili alternativi e cioè tutte quelle fonti di energia che vengono consumate con una velocità pari alla loro velocità di rigenerazione (CENGEL e BOLES, 1998).

Una categoria di energia rinnovabile non ancora ampiamente sfruttata è l'energia derivante dalla biomassa che è *“la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”* ( Definizione di cui all' Art.2 della Direttiva 2009/28/CE ) Figura 1.3.

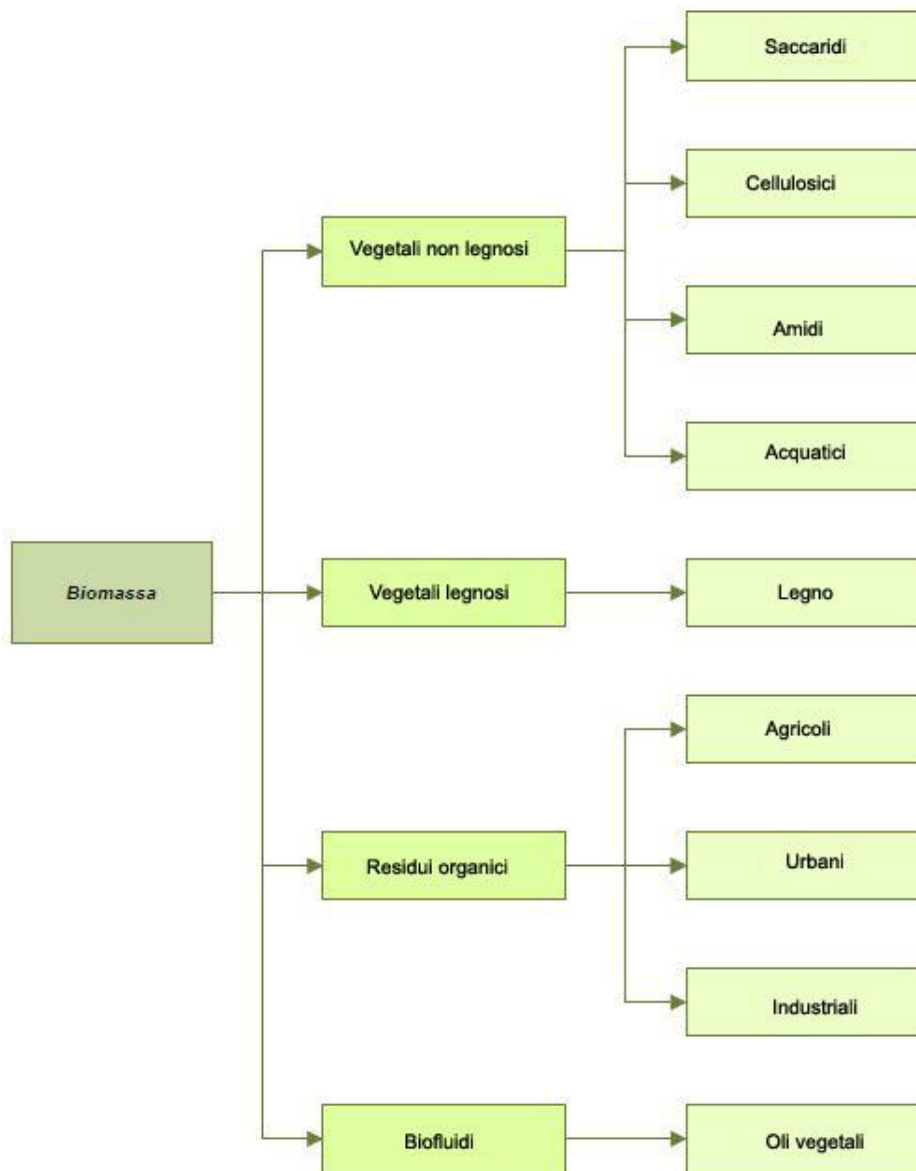


Figura 1.3 – Divisione tipologie di biomassa. Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME) (2004).

La biomassa è una forma di energia secondaria derivante dall'energia solare classificata come energia primaria. Ricordando che per energia primaria si intendono tutte le forme di energia reperibili in natura e utilizzabili in maniera diretta senza bisogno di ulteriore trasformazione ( combustibili fossili, energia solare ); per energia secondaria si intendono le forme di energia trasformate e derivate dall'energia primaria ( elettricità, benzina, vapore). La biomassa può anche essere classificata come fonte di energia primaria in quanto dopo la sua trasformazione in sottoprodotti può generare combustibile o dopo la sua diretta combustione può generare un'altra forma di energia secondaria come calore, elettricità, vapore.

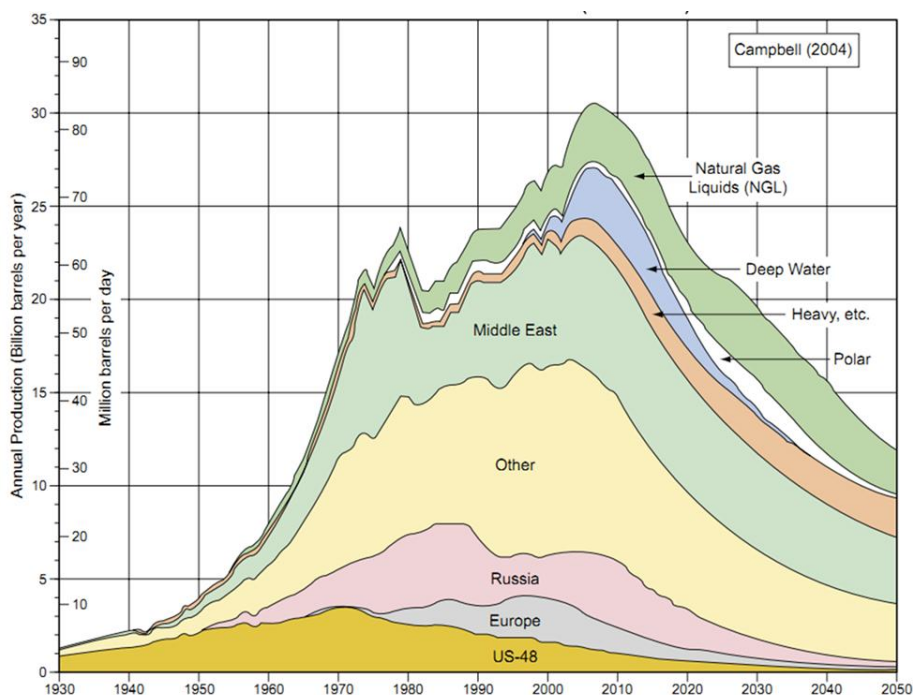
La biomassa, e i combustibili ad essa derivati, durante la combustione o la loro trasformazione energetica emettono in atmosfera la stessa quantità di CO<sub>2</sub> che viene assorbita dai vegetali durante il processo di crescita; chiudono il ciclo del carbonio con un bilancio nullo, non impattando l'ambiente. Non emettono in maniera eccessiva i gas causanti l'effetto serra GH e per questo motivo sono considerati combustibili "puliti". La biomassa viene dunque utilizzata a scopo energetico per produrre biocombustibili come bioetanolo, il biodiesel, il biometanolo, il biometano, il biodimetilene, gli idrocarburi sintetici, il bioidrogeno, gli olii vegetali. Viene inoltre considerata biomassa la produzione di piante come pioppi (*Silicaceae Populus*) e miscanto (*Miscanto Senensis*) per l'utilizzo della massa legnosa in centrali elettriche a biomassa. Una forma di utilizzo energetico attualmente esplorata è il biogas, prodotto da digestione o fermentazione anaerobica partendo da materiali di matrice organica, rifiuti organici, liquami di deiezioni animali.

### 1.3.1 Fattore energetico

L'attuale dipendenza energetica mondiale è basata principalmente sui combustibili fossili ( Figura 1.2 ), questo va a riflettersi sul commercio internazionale, sulle economie degli stati e sulle scelte politiche dei governi.

Studi discordanti mostrano quanto sarà possibile ancora dipendere solamente dai combustibili fossili, in Figura 1.4 è mostrato il grafico di Oil Peak che indica quale è il punto temporale approssimativo in cui si raggiunge la velocità massima di produzione globale di greggio, dopo il quale il tasso di produzione entra in fase di declino.





**Figura 1.4 – Grafico Oil Peak. Previsioni di produzione di petrolio nel corso del tempo. Fonte ( CAMPBELL 2004 ).**

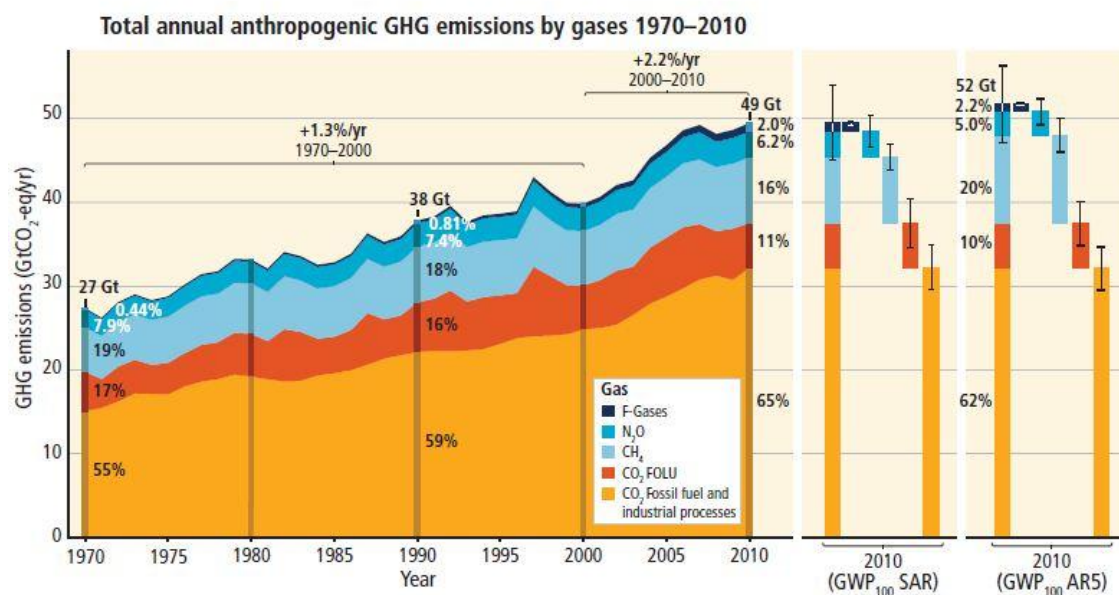
Il picco di produzione si stima che sia già stato raggiunto o deve avvenire nei prossimi anni. Per questo motivo i governi devono trovare strategie alternative per il sostentamento energetico delle attività economiche dei loro paesi. Inoltre, i combustibili fossili sono risorse limitate, concentrate in poche aree geografiche del nostro pianeta. Questo crea, per i paesi al di fuori di questa zona, uno status permanente e insicuro di dipendenza dalle importazioni di energia. La maggior parte dei paesi europei sono fortemente dipendenti dalle importazioni di energia fossili provenienti da regioni ricche di fonti come la Russia e il Medio Oriente. Lo sviluppo e l'attuazione di sistemi di energie rinnovabili come il biogas, sulla base di risorse nazionali e regionali a biomassa, aumenterà la sicurezza dell'approvvigionamento energetico nazionale e ridurre la dipendenza dai combustibili importati (SEADI, 2008).

Il biogas generato da digestione anaerobica, a differenza dei combustibili fossili, è permanentemente rinnovabile, visto che è prodotto da biomassa, e può dimostrarsi una valida alternativa per la diversificazione di utilizzo delle fonti energetiche. Può essere direttamente utilizzato in abitazioni per la cogenerazione di calore e acqua calda in una caldaia sostituendo il gas naturale; nelle industrie come gas di combustione per i diversi processi o per generazione di energia elettrica; in ambito agricolo può essere utilizzato

per fornire energia allo stesso impianto di allevamento o per i macchinari agricoli, trasformandosi in un processo produttivo autosostenibile; nei veicoli come combustibile dopo liquefazione (ALVES, 2000). Il biogas dunque non solo migliora il bilancio energetico di uno paese ma contribuisce alla conservazione delle risorse naturali e alla tutela dell'ambiente.

### 1.3.2 Fattore ambientale

La combustione di petrolio, carbone, gas naturale, lignite e tutti i combustibili fossili utilizzati nei processi industriali o dai mezzi di trasporto, generano CO<sub>2</sub> e altri gas denominati Green House Gases (GHG) che vengono immessi in atmosfera in maniera incontrollata. L'annuale incremento di biossido di carbonio e dei GHG (Figura 1.5) è responsabile dell'effetto serra (GH) causando l'aumento della temperatura globale e danni agli ecosistemi e agli equilibri dei cicli biologici.



**Figura 1.5 – Emissioni annuali antropogeniche di GHG (gigaton di CO<sub>2</sub> equivalente all'anno, GtCO<sub>2</sub>-eq / anno) per il periodo 1970-2010, dei gas: CO<sub>2</sub> da combustione di combustibili fossili e da processi industriali; CO<sub>2</sub> forestale e altri Land Use (FOLU); metano (CH<sub>4</sub>); protossido di azoto (N<sub>2</sub>O); gas fluorurati che rientrano nell'ambito del protocollo di Kyoto (F-gas). Fonte (IPCC, 2014).**

Anche la combustione di biogas produce CO<sub>2</sub>, ma la differenza principale, rispetto ai combustibili fossili, è che il carbonio presente nel biogas è stato preso

dall'atmosfera, per attività fotosintetica delle piante. Il ciclo del carbonio viene così chiuso entro un tempo molto breve (tra uno e qualche anno). La produzione di biogas riduce anche le emissioni di metano (CH<sub>4</sub>) e di protossido di azoto (N<sub>2</sub>O), prodotti dallo stoccaggio e l'utilizzo di concime animale non trattato come fertilizzante o dalla decomposizione dei residui solidi disposti in discariche. Il potenziale di gas serra del metano è superiore dell'anidride carbonica di 23 volte e rispetto al protossido di azoto di 296 volte. Per questi motivi la produzione di biogas è un'ottima alternativa per diminuire l'immissione dei GHG in atmosfera diminuendo il fenomeno dell'effetto serra e contribuendo a ridurre l'impatto ambientale della produzione industriale o dei trasporti.

### 1.3.3 Fattore economico sociale.

Un altro grande vantaggio che la produzione di biogas in reattori anaerobici può generare, è la diminuzione sostanziale della quantità di residui solidi organici che sarebbe indirizzata a discariche o ad altre tecniche di trattamento. L'aumento stimato della popolazione mondiale ( Figura 1.1 ) genera di conseguenza un'aumento della produzione di rifiuti solidi e di scarichi domestici. Fattori come l'indice di sviluppo umano, la rendita pro capite media e la politica nazionale di un paese sulla riduzione di rifiuti domestici, possono influenzare la quantità media di rifiuti generati per abitante in una determinata città, regione, paese (ALVES, 2000).

Il biogas dunque ha la grande caratteristica di trasformare un prodotto di scarto in substrato fondamentale per la reazione anaerobica nei reattori. Molti paesi Europei stanno incontrando delle difficoltà per l'eccessiva produzione di residui organici dalle industrie, dall'agricoltura e dalle stesse abitazioni. Utilizzando questa tecnologia si può ridurre notevolmente il volume di residui da trattare o da inviare in discariche; rispettando in questa maniera i sempre più ristretti regolamenti sui rifiuti della normativa Europea.

La diminuzione di rifiuti aumenta di conseguenza il tenore e la qualità di vita nelle città, nell'ambiente agricolo e abbassa i costi di gestione di un'azienda agricola che, invece di dover trattare a costi elevati i residui organici di allevamenti o coltivazioni, riutilizza questi come fonte energetica ricavandone un guadagno; oltre a produrre energia il substrato digerito, detto digestato, può essere riutilizzato come un ottimo fertilizzante ricco di azoto, fosforo, potassio e micronutrienti. Possiede un'ottimo

rapporto C/N e un odore decisamente ridotto, aiutando ad aumentare i nutrienti presenti nel suolo non dovendo quindi usare fertilizzanti chimici (SEADI, 2008).

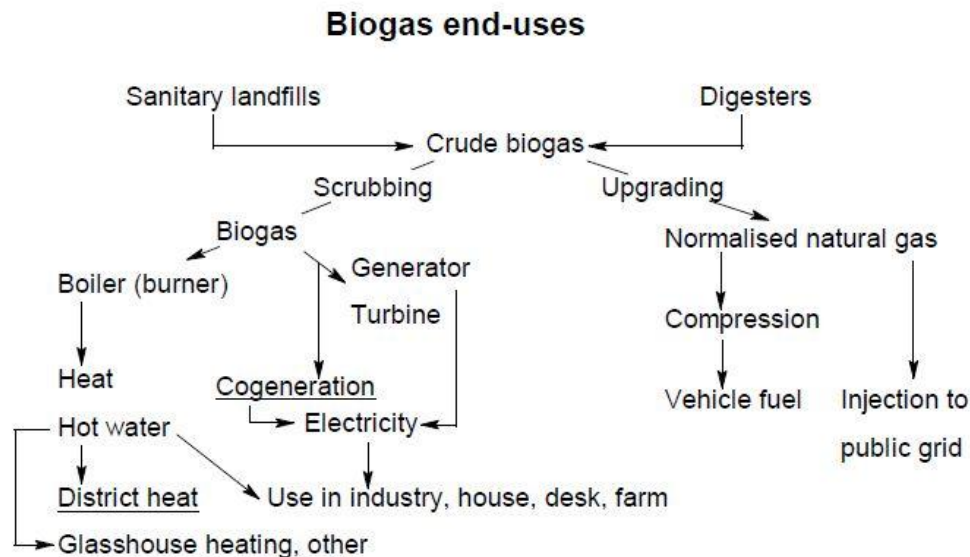
Altro fattore importante è la creazione di un nuovo mercato visto che la produzione di biogas necessita di forza lavoro per la produzione, immagazzinamento, trasporto, progettazione, costruzione e manutenzione di impianti. Tutto questo sviluppa un settore nazionale di biogas collaborando a creare nuovi posti di lavoro con interessante valore economico. In Italia, per esempio, il Consorzio Italiano Biogas ( CIB ) stima che sono installati circa 1300 impianti per una potenza installata di 1000 MWe; una produzione di 7.400 GWh di energia elettrica che nel 2013 copriva già il 10% di quella ottenuta da fonti rinnovabili. Ci sono investimenti per 4,5 miliardi, negli ultimi 5 anni, che hanno creato 12.000 nuovi posti di lavoro stabili e altamente qualificati (BRIZZO, 2015). L'Italia è terzo produttore al mondo dopo Germania e Cina e questi numeri sono in continuo aumento, dimostrando l'efficienza di questa energia pulita e l'alto contributo sostenibile che esso genera.

L'esempio Italiano può essere preso da modello per i mercati emergenti come quello brasiliano dove l'attività agricola è un settore importante dell'economia del paese essendo il primo produttore di carne bovina, quarto in quella avicola, terzo della carne suina. Nel 2005, l'agricoltura brasiliana occupava il primo posto nella produzione ed esportazione di zucchero (42% della produzione mondiale), etanolo (51%), caffè (26%), succo d'arancia (80%) e tabacco (29%); secondo produttore ed esportatore di soia (35% della produzione mondiale) e crusca a soia (25%); il mais è stato il quarto più grande produttore e il terzo esportatore (con il 35% della produzione). (USDA, 2005). Questa alta produzione genera di conseguenza un alto numero di residui organici che possono essere riutilizzati in un impianto a biogas.

#### **1.4 Alternative di utilizzo del biogas**

Ci sono diverse possibilità di utilizzo del biogas generato, che dipendono dalla quantità e dalla qualità del gas, dalla tipologia di produzione, dalla temperatura, dal tipo di substrato utilizzato e dal tempo di permanenza nel reattore. Il potere calorifico può dunque essere utilizzato in una combustione diretta per generare calore, come combustibile per veicoli, come cogenerazione di energia elettrica e calore Combined

Heat and Power (CHP), generazione con motori Gas-Otto, micro turbine o motori Stirling, in Figura 1.6 è schematizzato il possibile utilizzo (SEADI, 2008).



**Figura 1.6 – possibilità di utilizzo finale del biogas. Fonte (SEADI, 2008).**

Il potere energetico è associato alla quantità di metano contenuto, le percentuali dei diversi gas che compongono il biogas dipendono dal tipo di rifiuto utilizzato per la sua produzione. Nel capitolo 1.5 saranno analizzati i diversi substrati con la loro rispettiva capacità di generazione.

#### 1.4.1 Combustione diretta

La maniera più semplice di utilizzo è la combustione diretta in caldaie o bruciatori per generare calore. Il biogas può essere utilizzato direttamente dove prodotto o trasportato per gasdotti e successivamente bruciato. Per la combustione diretta il biogas non ha bisogno di essere trattato per migliorarne la qualità e il livello di contaminanti non limitano l'uso del gas.

#### 1.4.2 Cogenerazione CHP

La cogenerazione di energia e calore è molto utilizzata da molti paesi produttori di biogas avendo alte efficienze di produzione, permette un notevole risparmio

energetico rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di calore di energia elettrica/meccanica; si può arrivare infatti a superare il 90% di rendimento (circa 30% o più di rendimento elettrico e circa 60% di rendimento termico). Per la cogenerazione si utilizzano motori endotermici alternativi o microturbine. Nel primo caso si usano motori funzionanti a Ciclo Otto o a Ciclo Diesel modificato, mentre nel secondo caso si utilizzano turbomacchine a gas di derivazione aeronautica di piccole dimensioni (SRL).

Il gas utilizzato in cogenerazione deve essere precedentemente trattato per migliorarne la qualità e rimuoverne le impurezze perché la maggior parte dei motori a gas hanno limiti massimi per il contenuto di idrogeno solforato, idrocarburi alogenati e silossani. Un altro problema importante per l'efficienza energetica e economica di un impianto di cogenerazione a biogas è l'utilizzo del calore prodotto. Solitamente, la parte del calore viene utilizzato per il riscaldamento dei digestori e circa i 2/3 di tutta l'energia termica prodotta è utilizzata per esigenze esterne.

Un motore a Ciclo Otto funziona con aggiunta di aria per diminuire il monossido di carbonio emesso dopo la combustione. Questi tipi di motori richiedono biogas con almeno il 45% di contenuto di metano e sono generalmente utilizzati per impianti di produzione di circa 100kW (SEADI, 2008).

Al posto di un motore a Ciclo Otto può essere utilizzato un motore a Ciclo Stirling, che non ha una combustione interna ma esterna, funziona a ciclo chiuso utilizzando un gas come fluido termodinamico, solitamente aria o azoto, oppure elio o idrogeno nelle versioni ad alto rendimento. Quando è raggiunta una giusta differenza di temperatura tra il suo punto freddo e quello caldo, si innesca una pulsazione ciclica trasformata in moto alternato dei pistoni; essa continua fino a che è mantenuta la differenza di temperatura. Questa combustione esterna utilizzata può essere fornita dal biogas e dunque non è necessario un gas altamente depurato (NASO, 1991).

### 1.4.3 Micro turbine

In figura 1.7 è rappresentato il funzionamento di una microturbina a biogas, l'aria viene spinta nella camera di combustione ad alta pressione e miscelata con biogas. La miscela aria-biogas viene bruciata causando un aumento di temperatura e l'espansione della miscela di gas. I gas caldi vengono rilasciati attraverso la turbina, che

è collegata al generatore di energia elettrica. La capacità elettrica di microturbine è tipicamente inferiore a 200 kW (SEADI, 2008).

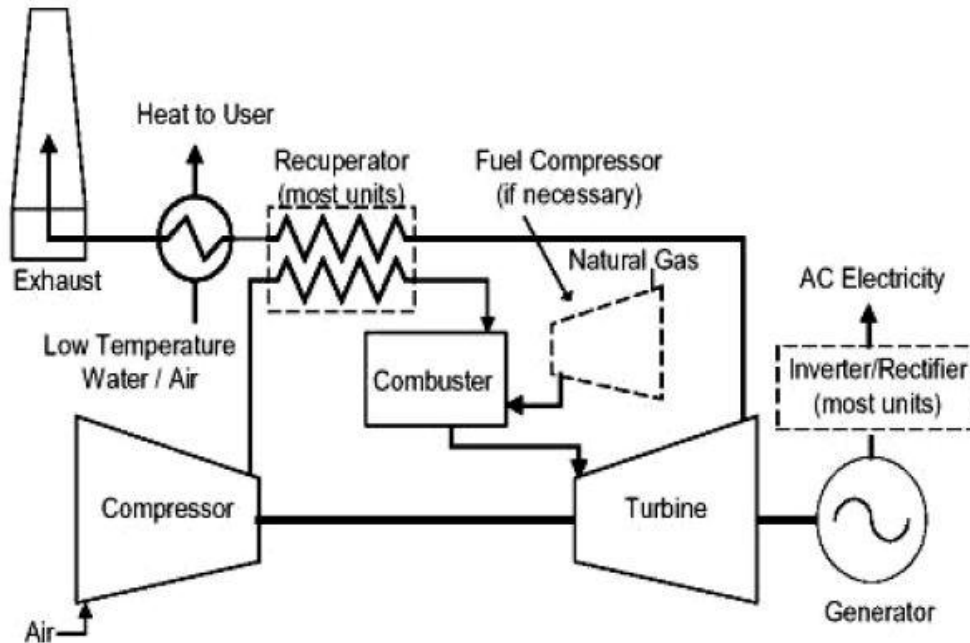


Figura 1.7 – funzionamento di una micro turbina a aria-biogas fonte (ESC).

#### 1.4.4 Biometano

Il biometano è prodotto dalla raffinazione del biogas raggiungendo una percentuale di contenuto di metano del 95%. Per ottenere questo livello di  $\text{CH}_4$  deve essere rimossa la  $\text{CO}_2$  presente per mezzo di trattamenti a membrana, scrubbers ad acqua o con il processo PSA ( Pressure Swing Adsorption ) con matrici adsorbenti ed eliminare gli altri gas che compongono il biogas e cioè tracce di acido solfidrico  $\text{H}_2\text{S}$ , ossigeno  $\text{O}_2$ , azoto molecolare  $\text{N}_2$  e idrogeno  $\text{H}_2$ , più altri componenti poco o per nulla rilevanti.

Il biometano è utilizzato nel settore dei trasporti ed è utilizzato come combustibile per veicoli con specifici motori adattati. È considerato come il carburante per veicoli con il più alto potenziale, anche rispetto ad altri biocarburanti.

## 1.5 Matrici utilizzabili per digestione anaerobica

Per poter valutare le opportunità di sfruttamento del contenuto energetico delle biomasse attraverso la digestione anaerobica, è utile cercare di classificare le matrici utilizzabili in un impianto per la produzione di biogas; in generale, tutta la materia organica è adatta ad essere utilizzata come substrato, ma è opportuno raggruppare in classi omogenee le differenti biomasse utilizzabili come input per un digestore anaerobico. La suddivisione, qui effettuata si basa principalmente sulla provenienza delle diverse matrici. Si sono individuate le seguenti cinque macro classi di matrici, ciascuna delle quali comprensiva di un numero variabile di prodotti, talvolta disomogenei per opportunità ed efficienza di impiego:

- scarti agroindustriali;
- reflui zootecnici;
- fanghi di depurazione;
- frazione organica da rifiuti urbani da raccolta differenziata;

La scelta di una matrice rispetto ad un'altra dipende da differenti fattori come la resa potenziale di produzione, la reperibilità della matrice rispetto alla locazione geografica dell'impianto, valore economico della matrice (concorrenza con il valore di altre applicazioni ad esempio alimentare o produzione di carburante). In Tabella 1 sono mostrate le rese di produzione dei residui utilizzati.

### 1.5.1 Biomasse agroindustriali

Le biomasse agroindustriali comprendono tutte quelle biomasse di scarto da attività agricole e dai processi industriali che lavorano con materiale organico. In questa categoria sono inclusi gli scarti verdi di origine privata e pubblica come residui di potature e di giardini. Si possono effettuare ulteriori classificazioni per questa categoria di biomassa, a secondo della loro origine e/o produzione come colture dedicate, residui colturali, sottoprodotti di origine animale e sottoprodotti industriali.

Le colture dedicate sono prodotte al solo scopo di ottenere una biomassa utilizzabile per la produzione di biogas. Si cerca di coltivare piante con bassa percentuale di lignina e con alti contenuti di amido, grassi e proteine che portano a produzioni di biogas maggiori. Le colture più diffuse sono i cereali come sorgo zuccherino, colza, segale, frumento etc. La problematica di queste matrici è che vanno a



interferire all'utilizzo alimentare di questi prodotti e di conseguenza il prezzo per l'utilizzo a scopo energetico è maggiore. (REGIONE LOMBARDIA, 2013).

I residui colturali sono tutti gli scarti prodotti dalle produzioni agricole che possono essere sfruttati in digestori anaerobici. Le rese sono inferiori rispetto alle rese delle colture dedicate perché la percentuale di lignina, che è meno digeribile, è maggiore e di conseguenza si produce una minore quantità di biogas. La reperibilità è maggiore rispetto alle colture dedicate perché appunto sono materiali di scarto e non vanno ad interferire con le coltivazioni a scopo alimentare.

Per sottoprodotti di origine animale si considerano tutti i residui dei macelli come sangue, pelle, contenuti stomacali, ossa e gli scarti dell'industria ittica. I residui utilizzati hanno un'alto valore di resa perché ricchi di proteine e grassi ad elevata digeribilità. La loro reperibilità è minore perché, innanzitutto, la quantità prodotta è inferiore rispetto ai prodotti di una coltivazione, in secondo luogo il trasporto di questo materiale può diventare un ostacolo e per questo è importante che l'impianto di generazione sia vicino alla fonte degli scarti. Un altro fattore negativo è l'obbligo di costosi pretrattamenti come indicato nel Regolamento CE 1774/2002 "Norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano".

I sottoprodotti industriali comprendono tutti gli scarti e reflui organici che molte agroindustrie producono. Tra i più utilizzati si possono elencare il siero di latte, contenente proteine e zuccheri, derivante dall'industria casearia, i reflui di industrie di succhi di frutta o che distillano alcol e gli scarti dell'industria olearia. La reperibilità generale di queste biomasse è buona, ma risulta particolarmente vincolata alla vicinanza geografica dell'impianto ad una linea industriale che generi un sottoprodotto utilizzabile. L'utilizzo puro o miscelato di queste matrici è spesso problematico perché, ad esempio, il siero di latte può dare problemi di acidità o prodotti troppo zuccherini portano alla formazione di schiume.

### 1.5.2 Reflui zootecnici

L'allevamento intensivo di bestiame bovino, suino e allevamenti avicoli, produce una grandissima quantità di reflui zootecnici solidi e liquidi che devono essere trattati per evitare che rilascino microrganismi patogeni o eccessivi nutrienti in ambiente. Tutte queste deiezioni possono essere utilizzate nella digestione anaerobica

per la produzione di biogas con ottima efficienza. Il problema di utilizzare i reflui zootecnici è che sono ricchi di sostanze che possono alterare o interrompere il processo digestivo, per esempio si possono trovare problemi di inibizione microbica utilizzando deiezioni avicole; i reflui ovicaprini, considerato l'alto contenuto di sali, possono creare particolari problemi di concentrazione di cloruro di sodio.

Il liquame suino è caratterizzato da un contenuto di sostanza secca che varia dell'1 al 6% e una concentrazione di sostanza organica o solidi volatili estremamente variabile. Il liquame bovino invece ha un contenuto di sostanza secca maggiore, tra l'8 e il 15%, dovuto alla differente gestione degli allevamenti (aggiunta di paglia o altre lettiere). Dal liquame prodotto da una vacca da latte di circa 500 kg di peso vivo, si possono ottenere produzioni di 0,75 m<sup>3</sup> di biogas al giorno. Un letame per essere definito tale, deve essere palabile, quindi con un contenuto di sostanza secca ancora più elevato rispetto ai liquami, tra il 15 e il 35%, a seconda del tipo di allevamento e alla gestione attuata (REGIONE LOMBARDIA, 2013). La maggior differenza tra un letame e un altro, a parte l'alimentazione del bovino, è data dal tipo di lettiera utilizzato (paglie, trucioli, foglie etc) perché essa può far variare le caratteristiche chimiche del letame. In tabella 1 sono riassunte le quantità di biogas producibili per ogni matrice analizzata.

**Tabella 1 – produzione biogas per tipologia di substrato. (COCOZZA, 2012)**

<b>Substrato</b>	<b>m<sup>3</sup> biogas/t SV</b>
Deiezioni animali (suini, bovini, avicunicoli)	200 – 500
Residui colturali (paglia, colletti, barbabietole...)	350 – 400
Scarti organici da macellazione (grassi, contenuto stomacale ed intestinale, sangue, fanghi di flottazione...)	550 – 1000
Fanghi di depurazione	250 – 350
Frazione organica rifiuti urbani	400 – 600
Colture energetiche (mais, sorgo, zuccherino...)	550 – 750
Scarti organici agroindustriali (siero, scarti vegetali, lieviti, fanghi e reflui di distillerie, birrerie e cantine...)	400 – 800

### 1.5.3 Fanghi di depurazione.

I fanghi di depurazione sono il residuo del processo di depurazione delle acque reflue urbane e industriali. Sono costituiti da biomassa batterica e sostanza organica ed inorganica. La composizione dei fanghi prodotti da un impianto di trattamento delle acque reflue è funzione del tipo di impianto in esame e dei processi di trattamento da essi adottati. 1.1 sono riportati alcuni dati di composizione media di fanghi non trattati o digeriti. La verifica delle caratteristiche salienti quali il pH, l'alcalinità, i nutrienti, e la concentrazione di acidi organici, risulta importante ai fini della corretta conduzione di processi quali la digestione anaerobica.

La reperibilità di questo tipo di matrice è buona anche se, considerati gli alti costi di trasporto di una matrice così diluita, è opportuno prevedere la digestione dei fanghi in prossimità di impianti di depurazione di acque civili. In quanto rifiuto da avviare al circuito di recupero o smaltimento, i fanghi non rappresentano un costo ma una potenziale fonte di reddito per l'impianto di digestione anaerobica. Pur non essendoci particolari pretrattamenti da applicare a questa matrice, le scarse rese in biogas e i problemi di inibizioni non fanno dei fanghi di depurazione una matrice di conveniente utilizzazione, soprattutto in impianti di piccola scala.

**Tabella 1.1 – composizione chimica media dei fanghi non trattati e digeriti (REGIONE LOMBARDIA, 2013)**

<b>Voce</b>	<b>Fanghi primari non trattati</b>	<b>Fanghi primari digeriti</b>	<b>Fanghi attivi non trattati</b>
Solidi totali ST%	5--9	2-5	0,8 --1,2
Solidi Volatili (%ST)	60--80	30—60	59—88
Oli e grassi (% ST)	6--35	5—20	5—12
Proteine (% ST)	20--30	15—20	32—41
Azoto (N, % ST)	1,5--4	1,6—3	2,4—3
Fosforo (P2O5, % ST)	0,8--2,8	1,5—4	2,8—11
Potassio (K2O, % ST)	0--1	0—3	0,5--0,7
Cellulosa (% ST)	8--15	8—15	/
Ferro (esclusi solfuri)	2--4	3—8	/
Silice (SiO2, % ST)	15--20	10—20	/
pH	5--8	6,5--7,5	6,5—8
Alcalinità (mg/l come CaCO3)	500--1500	2500—3500	580—1100
Acidi organici (mg/l come HAc)	200--2000	100—600	1100-1700
Potere calorifico, kJ/kg ST	23000--29000	9000-14000	19000-23000

#### 1.5.4 Frazione organica da raccolta differenziata

La frazione organica dei rifiuti urbani rappresenta la principale frazione dei nostri scarti domestici (generalmente fino al 40-45% in peso del rifiuto prodotto annualmente). Nella prospettiva di ottemperare agli obiettivi di raccolta differenziata previsti dalla revisione della Direttiva Quadro sui rifiuti e, a livello nazionale, dal D.lgs 152/2006, l'intercettazione dell'organico (e la sua valorizzazione) rappresenta un elemento fondamentale nelle strategie di gestione (REGIONE LOMBARDIA, 2013). C'è una buona correlazione tra la purezza della FORSU e la modalità di raccolta (regolamenti locali sui rifiuti conferibili, sistema di raccolta, ecc. ).

La sua composizione, invece, è estremamente eterogenea, e dipende da moltissimi fattori come la stagionalità, la collocazione geografica del bacino di riferimento, le abitudini alimentari della popolazione etc. Le rese in biogas della FORSU non sono particolarmente elevate e la reperibilità di questa matrice è dipendente dall'applicazione della raccolta differenziata (da utenze domestiche e/o commerciali). Per una buona efficienza di produzione di biogas è necessario, e a volte obbligatorio, effettuare pretrattamenti e in particolare si deve eliminare materiali indigeribili come plastiche, metalli ed inerti che possono provocare danni alle parti meccaniche dell'impianto.

### **1.6 Legislazione**

L'installazione di un impianto di digestione anaerobica incontra ancora diversi ostacoli che impediscono la larga diffusione di questa tecnologia, come la forte dipendenza dalla fattibilità economica e da eventuali aiuti del governo, la differenza di scala dell'impianto da applicare a diverse attività agricole e le necessità dell'industria alimentare di smaltire un rifiuto per loro abbondante. In molti paesi la legislazione sulla produzione e utilizzo del biogas non è ancora ben specifica, essendo una tecnologia relativamente nuova e non ampiamente diffusa. L'Unione Europea è tra i migliori produttori di biogas e di conseguenza ha già una buona struttura legislativa che può essere presa da modello per gli stati che non hanno ancora leggi proprie sull'argomento come per il Brasile. Di seguito verrà effettuata un'analisi delle leggi, normative e decreti

dell'Unione Europea (Tabella 1.2) e dei maggiori stati produttori di Biogas: Germania, Italia, Francia.

**Tabella 1.2 – norme dell'Unione Europea riguardo all'utilizzo del Biogas**

<b>DIRETTIVA</b>	<b>SCOPO</b>
<p><b>Direttiva 2009/28/CE:</b> Promozione dell'uso e della produzione dell'energia da fonti rinnovabili, modifica e successiva abrogazione delle Direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.</p>	<p>Questa Direttiva stabilisce un quadro normativo comune per l'uso di energia da fonti rinnovabili per limitare le emissioni di gas serra e promuovere un trasporto più pulito.</p>
<p><b>Direttiva 2008/98/CE:</b> Rifiuti</p>	<p>Questa Direttiva fornisce un quadro generale dei requisiti per la gestione dei rifiuti e raccoglie le definizioni relative alla gestione base dei rifiuti per la UE.</p>
<p>Decisione della Commissione COM 2000/532/EC</p>	<p>Lista dei rifiuti per l'Europa (sottostante)</p>
<p>Regolamento della Commissione N° 1069/2009</p>	<p>Regolamenti sanitari riguardanti i sottoprodotti di origine animale (ABP) e prodotti derivati non destinati al consumo umano (SANDACH), abrogazione del Regolamento della Commissione (CE) No 1774/2002</p>
<p>Regolamento della Commissione N° 142/2011 Regolamento della Commissione N° 92/2005</p>	<p>Norme di Attuazione (CE) No 1069/2009 Norme di Attuazione (CE) No 1774/2002</p>
<p>Regolamento della Commissione N° 185/2007</p>	<p>Validità delle misure transitorie per il compostaggio e gli impianti a biogas secondo la norma (CE) No 1774/2002</p>
<p>Regolamento della Commissione N° 208/2006</p>	<p>Standard dei processi per gli impianti a biogas e per il compostaggio e requisiti per il concime.</p>
<p><b>Direttiva 1999/31/CE:</b> Discariche di rifiuti</p>	<p>Questa Direttiva intende prevenire o ridurre per quanto possibile gli effetti negativi sull'ambiente dovuti alla discarica dei rifiuti, introducendo rigidi requisiti tecnici per i rifiuti e per le discariche.</p>

**Direttiva 2008/1/CE:**  
Prevenzione e Riduzione Integrate  
dell'Inquinamento

**Direttiva 2009/73/CE:**  
Norme comuni per il mercato interno del gas  
naturale

**Direttiva 2012/27/CE:**  
Efficienza energetica

Questa Direttiva definisce gli obblighi cui devono attenersi le attività agricole e industriali che potenzialmente causano molto inquinamento.

Questa Direttiva punta a introdurre delle regole comuni per la trasmissione, la distribuzione, il rifornimento e lo stoccaggio di gas naturale. Riguarda soprattutto il gas naturale, il gas naturale liquefatto (LNG), biogas e gas da biomassa.

Questa Direttiva stabilisce un insieme di misure comuni volte a promuovere l'efficienza energetica nell'ambito dell'Unione Europea.

---

Tutti i paesi dell'Unione Europea che intendono sviluppare la tecnologia del biogas devono rispettare le direttive europee, creando norme seguendo i modelli prestabiliti.

#### 1.6.1 Francia

In Francia il governo ha deciso di promuovere l'energia rinnovabile: l'obiettivo è raggiungere il 23% di energia rinnovabile sul consumo totale di energia per il 2020, il che vuol dire raddoppiarla dal 2006 al 2020. I requisiti sanitari in Francia seguono la normativa della EU n°142/2011 (regolamento sul trattamento dei sottoprodotti di origine animale). Il governo francese ha fondato il Piano Nazionale EMAA, "Energie Méthanisation Autonomie Azote". Questo piano si basa sulla gestione dell'azoto e del digestato insieme allo sviluppo del biogas. L'obiettivo è quello di raggiungere una maggiore autonomia per l'azoto organico e far diminuire i bisogni di azoto minerale per l'agricoltura francese; si punta a diminuire, oltre che il consumo di energia, le emissioni di gas serra che hanno un impatto e costi elevati. Attualmente lo sviluppo reale degli impianti a biogas è limitato dalla gestione del digestato. Il problema sorge perchè il digestato è considerato un rifiuto con l'obbligo di spargerlo sui terreni e dunque la disponibilità d'essi è fondamentale per sviluppare un impianto. IL piano EMAA vuole anche permettere il commercio di digestato come fertilizzante. Per le unità di biogas è

stato preparato un regolamento nel 2009 chiamato ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement). A seconda della natura e della mole dei rifiuti trattati ogni giorno, l'unità dovrà sottostare a una “Dichiarazione”, “Registrazione” o “Autorizzazione”. La combustione del biogas è anche regolata dalla classifica 2910C ICPE (BIOGAS3, 2014).

### 1.6.2 Germania

Esistono restrizioni molto rigide sui rifiuti derivati da animali in Germania, per un rischio di possibili infezioni patogene da animali su animali o su umani. Ci sono regolamenti legali e norme tecniche che regolano l'utilizzo di questi residui come digestati in impianti a biogas e bisogna garantire che i prodotti di scarto derivati della digestione possano essere utilizzati come fertilizzante sui terreni. Questo implica che il digestato non può contenere altri prodotti di origine animale rispetto ai substrati dichiarati. I sottoprodotti di origine animale vengono definiti nel paragrafo 2 del KrWG e nell'Annesso 4 del TierNebV. Inoltre se i sottoprodotti di origine animale e i rifiuti alimentari delle cucine non pastorizzati vengono digeriti in un impianto a biogas, l'impianto deve essere completamente separato dal cibo, dagli alloggi e dalle stalle degli animali, questo per prevenire la diffusione di malattie (paragrafo 3.5 TierNebV).

In Germania sono molto restrittivi anche dal punto di vista dei residui tossici presenti nei co-substrati, nel caso il digestato venga utilizzato come fertilizzante nei terreni. Non si possono dunque utilizzare digestati con valori di sostanze tossiche al di sopra dei valori presentati in tabella 3 (BIOGAS3, 2014).

**Tabella 1.3 – Limiti di sostanze tossiche presenti nei digestati. Fonte: paragrafo 4 (3)**

**BioAbfV.**

<b>Limiti metalli pesanti</b>	<b>mg/Kg DM di digestato</b>
Piombo	150
Cadmio	1,5
Cromo	100
Rame	100
Nichel	50
Mercurio	1
Zinco	400

### 1.6.3 Italia

Lo Stato Italiano utilizza il Decreto Legislativo n. 387 del 29.12.2003 per la gestione della produzione di biogas; il decreto è l'attuazione della direttiva 2011/77/CE sulla promozione di utilizzo e produzione di energia da fonti rinnovabili. Sono stati effettuati dei cambiamenti al quadro normativo con l'attuazione del Decreto Legislativo n. 28 del 03/03/2011 sempre sul miglioramento della promozione di energie rinnovabili.

Gli aspetti principali di questo decreto sono:

- Definizione di energia da fonti rinnovabili;
- Definizione di tutto ciò che è considerata Biomassa;
- Procedure amministrative per la costruzione e l'esercizio degli impianti di produzione di energia elettrica alimentati da fonti rinnovabili;
- Tariffe incentivanti per la produzione di energia da fonti rinnovabili;
- Modalità di accesso alle tariffe incentivanti.

In tabella 4 sono riassunti i decreti e normative attuate in Italia (MANZALINI, 2012).



Tabella 1.4 – Decreti legislativi applicati in Italia.

DECRETI	SCOPO
<b>Decreto Legislativo n. 387 del 29.12.2003</b>	Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità
<b>Decreto Legislativo n. 152 del 03.04.2006</b>	Testo Unico Ambientale, parte IV, norme in materia di gestione dei rifiuti
<b>Legge n. 244 del 24.12.2007</b>	Finanziaria 2008 introduce delle novità relative all'incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.
<b>Decreto legislativo n. 28 del 03.03.2011</b>	Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE
Decreto Ministeriale n. 5 del 06.07.2012	Stabilisce le nuove modalità di incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti alimentati da fonti rinnovabili, diverse da quella solare fotovoltaica
GSE procedure applicative del 24.08.2012 del DM 06.07.2012	Individuazione delle procedura d'asta, modalità di richiesta ed erogazione degli incentivi
<b>Decreto Biometano DM5 Dicembre 2013</b>	Il decreto promuovere l'uso del biometano prioritariamente nei trasporti come biocarburante, privilegiando quello ottenuto principalmente da sottoprodotti, con un occhio di riguardo per gli impianti più piccoli e più alla portata delle imprese agrozootecniche,

## 2. PRODUZIONE DEL BIOGAS

La produzione di biogas è derivata dal processo di digestione anaerobica di materiale organico per mezzo di microorganismi specifici che in fasi diverse degradano il substrato organico complesso in materiale più semplice e producendo biogas. Il processo è influenzato da diversi fattori come pH, temperatura, acidi grassi volatili (VFA Volatile Fatty Acids), umidità del substrato, presenza di ammoniaca, dimensione del substrato. Esistono inoltre diversi tipo di reattori per la digestione anaerobica con caratteristiche tecniche e di impianto diverse caratterizzando una produzione differente.

### 2.1 Digestione anaerobica

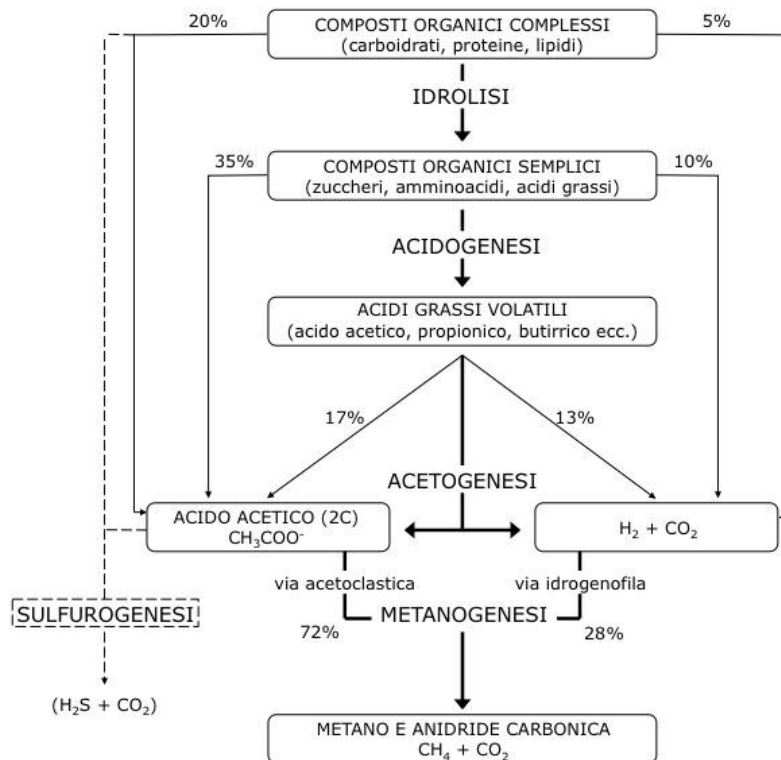
La digestione anaerobica è un processo naturale sviluppato da microrganismi specifici che degradano materiale organico producendo biogas. Il biogas è composto principalmente da metano  $\text{CH}_4$  e anidride carbonica  $\text{CO}_2$  e da altri gas come vapore d'acque o idrogeno solforato. In tabella 2.1 è mostrata la divisione in percentuali di volume dei differenti gas.

**Tabella 2.1 – Composizione biogas percentuali del biogas**

<b>Molecole</b>	<b>Presenza nel biogas (%)</b>
Metano ( $\text{CH}_4$ )	55 – 65 %
Anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ )	35 – 45 %
Idrogeno solforato ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0,02 – 0,2 %
Vapore d'acqua	2 – 7 %
Idrogeno ( $\text{H}_2$ ), ammoniaca ( $\text{NH}_3$ ), ossigeno ( $\text{O}_2$ ), azoto molecolare ( $\text{N}_2$ ), silossani	< 2 %

Le fasi principali della digestione sono lecate tra tra di loro e l'inibizione di solo una di queste può bloccare tutto il processo. In figura 2 è mostrato il processo di digestione anaerobica con le quattro fasi coinvolte che sono:

- Idrolisi
- Acidogenesi
- Acetogenesi
- Metanogenesi



**Figura 2.1 – Schema di processo della digestione anaerobica. (WaFS, 2014)**

I microrganismi presenti nella digestione sono dunque associati al compito digestivo che ciascuno deve svolgere. Si incontrano i microrganismi idrolitici, batteri fermentativi o acidogenici, batteri sintrofici o acetogenici e in fine microrganismi metanogenici responsabili per la formazione di metano. Sono presenti anche batteri solfatogenici che producono solfati che possono inibire la digestione (CHERNICHARO, 2007).

Le fasi del processo anaerobico sono caratterizzate da modelli cinetici di reazione differenti. L'idrolisi è regolata da una cinetica di primo ordine, per cui generalmente all'aumentare del carico organico si assiste ad un maggior accumulo dei prodotti di fermentazione. Al contrario, la fase di metanogenesi è caratterizzata da cinetiche più lente, per cui la velocità del processo di digestione è conseguentemente controllata dagli stadi finali della catena di degradazione.

### 2.1.1 Idrolisi

La prima fase della digestione anaerobica è l'idrolisi dove polimeri di sostanze organiche complesse di dimensioni maggiori vengono ridotti a monomeri meno complessi e solubili, dunque più accessibili ai microrganismi delle fasi successive. Composti come carboidrati, proteine, acidi nucleici e lipidi vengono ridotti a glucosio, amminoacidi, purine e piridine, glicerolo e acidi grassi a lunga catena (SEADI, 2008).

Carboidrati → Monosaccaridi;

Proteine → Amminoacidi;

Lipidi → Glicerolo e acidi grassi a lunga catena;

I monomeri ottenuti sono in forma solubile per una facile assimilazione da parte dei batteri presenti nella fase successiva. La reazione enzimatica idrolitica può essere spiegata con una cinetica di primo ordine e il substrato che effettua l'idrolisi non viene considerata limitante:

$$r = k * X_s$$

Dove:

- $r$  è la velocità di idrolisi [ $g/m^3d$ ];
- $k$  costante cinetica di primo ordine [ $1/d$ ];
- $X_s$  è la concentrazione del substrato ad essere idrolizzato [ $g/m^3$ ];

A seconda del substrato considerato i valori medi di  $k$  sono differenti e se nel substrato di partenza è presente una elevata componente lignocellulosica, la fase di idrolisi diventa cinematicamente limitante poiché la lignina forma una barriera all'accesso degli enzimi idrolitici. Questa fase può inoltre essere inibita per l'accumulo di amminoacidi e zuccheri e per la variazione di pH e temperatura; valori di pH vicini alla neutralità consentono una buona conduzione del processo per substrati misti (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

### 2.1.2 Acidogenesi

La seconda fase è l'acidogenesi dove i prodotti dell'idrolisi sono convertiti dai batteri acidogenici (fermentativi) in acidi intermedi che verranno utilizzati dai batteri acetogenici. Zucchero semplice, amminoacidi e acidi grassi sono degradati in acetato,

biossido di carbonio e idrogeno (70%) e anche in VFA e alcol (30%) (SEADI, 2008). Tra i VFA si possono trovare: l'acido formico, acetico, propionico, butirrico e valerico tabella 2.2. Il pH in questa fase tende ad abbassarsi. La stechiometria dell'acidogenesi è piuttosto complessa e può modificarsi a seconda della via metabolica che, in base alle condizioni ambientali, risulta energeticamente più favorevole per i batteri fermentativi.

**Tabella 2.2 – Reazioni di produzione dei VFA in fase di acidogenesi (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015)**

Fase	Substrato	Prodotto	Reazione
Acidogenesi	Glucosio	Acido Acetico	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
		Acido Propionico	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
		Acido Acetico e Propionico	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4/3 CH_3CH_2COOH + 2/3CH_3COOH + 2/3CO_2 + 2/3H_2O$
		Acido Butirrico	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2CO_2 + 2H_2$

L'acidogenesi è la reazione più rapida tra le fasi della digestione anaerobica, e segue una cinetica di Monod (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015):

$$r = k * X * \left[ \frac{S}{(k_s + S)} \right]$$

Dove:

- $r$  è la velocità di idrolisi [ $g/m^3d$ ];
- $X$  è la concentrazione dei batteri acidogenici [ $g/m^3$ ];
- $k$  è la velocità massima di rimozione del substrato 20 – 120 [ $d^{-1}$ ];
- $k_s$  è la costante di semisaturazione 300 – 1400 [ $g/m^{-3}$ ];
- $S$  è il substrato che possono essere zuccheri, amminoacidi o acidi grassi [ $g/l$ ];

### 2.1.3 Acetogenesi

Nella fase di acetogenesi i prodotti dell'acidogenesi, che non possono essere direttamente convertiti in metano dai batteri metanogenici, sono convertiti in substrato per la fase finale di metanogenesi. I VFA e alcol sono ossidati a generare prodotti come acetato, acido formico, idrogeno e biossido di carbonio (SEADI, 2008). La trasformazione degli acidi grassi in acido acetico è importante perché l'accumulo di acidi grassi rappresenta un segnale di squilibrio della catena degradativa e comporta una modificazione del pH. In tabella 2.3 sono rappresentate le maggiori reazioni che avvengono nella fase di acetogenesi.

**Tabella 2.3 – reazioni in fase di acetogenesi (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).**

Fase	Substrato	Prodotto	Reazione
Acetogenesi	Acido Propionico	Acido Acetico CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
	Acido Butirrico		$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$
	Acido Palmitico		$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH} + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow 8\text{CH}_3\text{COOH} + 14\text{H}_2$

Anche la fase di acetogenesi è rappresentata dalla cinetica di Monod, la differenza sta nelle costanti cinetiche del processo, in particolare  $k_s$ , costante di semisaturazione del substrato, che assume valori tra 100 – 4000 [g/m<sup>-3</sup>].

In questa fase sono presenti anche microrganismi omoacetogeni che producono acido acetico o altri composti a più lunga catena a partire da idrogeno e anidride carbonica secondo la reazione di tabella 2.4.

**Tabella 2.4 – reazione dei microrganismi omoacetogeni (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).**

Fase	Substrato	Prodotto	Reazione
Acetogenesi	H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	Acido acetico	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}$

#### 2.1.4 Metanogenesi

L'ultima fase della digestione anaerobica è la metanogenesi dove i prodotti delle fasi precedenti sono convertiti in metano e anidride carbonica e altri sottoprodotti dai batteri metanogeni. Questi batteri sono strettamente anaerobi e sono importanti per completare il processo degradativo poiché il loro metabolismo consente di compensare l'acidità prodotta dalla fermentazione e di mantenere bassi livelli di idrogeno che inibiscono la fase di acetogenesi e la stessa metanogenesi (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

Il metano è prodotto attraverso due distinti processi: il 70% del metano è ottenuto attraverso la metanogenesi acetoclastica che converte l'acido acetico in CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, il restante 30% è realizzato per la metanogenesi idrogenotrofa che converte idrogeno e anidride carbonica in metano e acqua (SEADI, 2008), in tabella 2.5 sono rappresentate le trasformazioni dei due processi metanogenici.

**Tabella 2.5 – metanogenesi acetoclastica e metanogenesi idrogenotrofa** (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

Fase	Substrato	Prodotto	Reazione
Metanogenesi Acetoclastica	Acido Acetico	Metano e anidride carbonica	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Metanogenesi Idrogenotrofa	Idrogeno e anidride carbonica	Metano e acqua	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Nella metanogenesi acetoclastica il metano e l'anidride carbonica sono prodotti dall'acido acetico per disproporzione. I batteri metanigeni sono strettamente anaerobi, sono lenti a crescere e si trovano in sedimenti naturali, in acque di rifiuto, in discariche e nelle deiezioni di ruminanti. Vivono in un intervallo di pH compreso tra 6 e 8 e sono sensibili alle variazioni ambientali; molto importante è che gli acidi prodotti dai batteri fermentativi non superino la capacità di degradazione della popolazione metanigena, che causerebbe eccessivi abbassamenti del pH con una diminuzione della velocità di metanogenesi. La cinetica di reazione è la cinetica di Monod come per le fasi precedenti, i parametri che variano sono (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015):

- $k$  è la velocità massima di rimozione del substrato  $2 - 8 [d^{-1}]$ ;

- $k_s$  è la costante di semisaturazione 50 – 600 [g/m<sup>-3</sup>];
- $S$  è il substrato ed in questo caso è acido acetico [g/l];

Nella metanogenesi idrogenotrofa i *Metanobacterum* e *Metanococcus* ossidano anaerobicamente l'idrogeno riducendo l'anidride carbonica in metano. Anche in questo caso si utilizza una cinetica di Monod dove i parametri che variano sono (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015):

- $k$  è la velocità massima di rimozione del substrato 25 – 35 [d<sup>-1</sup>];
- $k_s$  è la costante di semisaturazione 0,01 – 0,1 [g/m<sup>-3</sup>];
- $S$  è anidride carbonica e idrogeno [g/l];

### 2.1.5 Solfatogenesi

La solfatogenesi non sempre avviene nella digestione anaerobica e dipende dal substrato introdotto. Questa avviene per presenza di zolfo per batteri riduttori di solfato (formazione di solfuri). La presenza di solfati promuove una competizione tra i batteri riduttori di solfato e i batteri acetogeni e metanogeni e modificando l'alcalinità (MORAES, 2008). In tabella 2.6 è mostrata la reazione di solfatogenesi.

**Tabella 2.6 – reazione di solfatogenesi (MORAES, 2008).**

Fase	Substrato	Prodotto	Reazione
Solfatogenesi	Acido Acetico Solfato	Solfuri	$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

## 2.2 Parametri di influenza della AD

L'efficienza della digestione anaerobica dipende da diversi importanti parametri che sono cruciali per la buona riuscita delle reazioni metaboliche del sistema. I batteri fermentativi e metanogeni lavorano simultaneamente essendo una comunità batterica eterogenea e per questo è importante trovare un compromesso tra tutte le esigenze di crescita e di sviluppo degli organismi coinvolti. Si considera una efficienza bassa come una minore produzione di metano. Si deve dunque prestare attenzione a diversi fattori



che influenzano la digestione anaerobica come temperatura, pH, sostanze inibenti o tossiche e disponibilità di nutrienti (SEADI, 2008).

### 2.2.1 Temperatura

La stabilità della temperatura in un processo di digestione anaerobica è fondamentale. I differenti microrganismi sono sensibili alle variazioni di temperatura e ciascuno ha una efficienza maggiore in specifici intervalli di temperatura. Gli intervalli sono:

- Campo psicrofilo ( a freddo ): 4 – 15 °C;
- Campo mesofilo: 20 – 40 °C;
- Campo termofilo: 45 – 70 °C;

C'è una diretta relazione tra i campi di temperatura e il tempo di ritenzione idraulica HRT, in tabella 2.6 è mostrata la relazione.

**Tabella 2.7 – Relazione tra temperatura e HRT (SEADI, 2008).**

<b>Fase</b>	<b>Temperatura</b>	<b>HRT Minimo</b>
Psicrofilo	4 – 15 °C	70 – 80 giorni
Mesofilo	20 – 40 °C	30 – 40 giorni
Termofilo	45 – 75 °C	15 – 20 giorni

La scelta della fascia di temperatura adatta dipende da che substrato si utilizza, dal tempo di ritenzione idraulico e dall'efficienza di produzione di metano che si vuole ottenere. A scala industriale il processo in fase psicrofila non è quasi mai utilizzato. Il processo mesofilo e quello termofilo sono i più utilizzati ed entrambi presentano vantaggi e svantaggi da tenere in considerazione per una scelta corretta della fascia di temperatura da utilizzare.

In ogni fascia operativa lavorano specifici microrganismi e le loro cinetiche sono influenzate da essa. In figura 2.1 si può vedere come queste cinetiche aumentano con l'aumento di temperatura fino a che non raggiungono un valore ottimo, oltre il quale l'attività batterica subisce una rapida decrescita. Una volta che si è scelto il campo operativo si devono evitare oscillazioni di temperatura inferiori a  $\pm 1,5$  °C (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

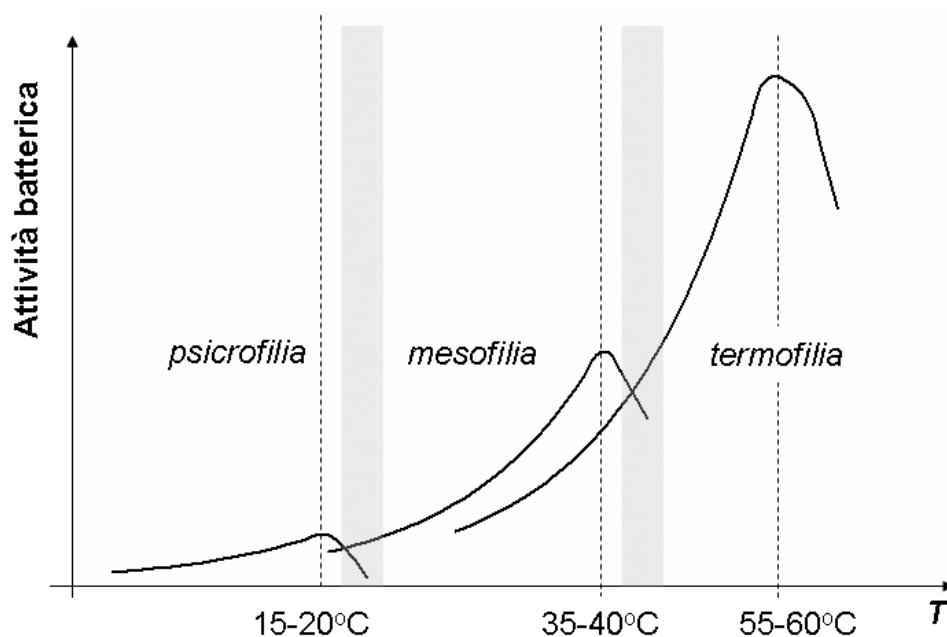


Figura 2.2 – effetto della temperatura sulla cinetica di degradazione anaerobica (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

Le fasce grigie di figura 2.2 stanno a indicare le condizioni operative sub-ottimali in cui i batteri lavorano in condizioni ottimali. Nella fascia tra mesofilia e termofilia si osserva un aumento delle cinetiche di processo e un più rapido decadimento batterico. Si possono dunque analizzare le due fasce di temperature valutando i vantaggi e svantaggi per poi decidere quale è il sistema più efficiente per ogni caso ( tabella 2.7 ).

- La fase mesofila, che lavora a temperature tra i 20 e i 40 °C, è un processo più lento ma più stabile in quanto è meno influenzato dalle variazioni operative; in questa fascia termica si ha una crescita di una popolazione microbica più diversificata che risulta più stabile rispetto al campo di termofilia. Il consumo energetico per mantenere il reattore a temperature ottimale, è più basso rispetto alle condizioni di termofilia. I batteri che si adattano alle condizioni mesofile sono circa 14 contro i due che si adattano a quelle termofile. Visto alla più bassa velocità di reazione si ha anche una più bassa produzione di VFA e per le condizioni di temperature più basse si ha una minore igienizzazione del reattore e un volume maggiore sempre del reattore, dovuto a un tempo di ritenzione idraulica maggiore rispetto al caso di termofilia. Per le condizioni più stabili e i costi di installazione e

manutenzione più bassi, i bioreattore mesofili sono i più utilizzati e diffusi ( tabella 2.6 ) (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

- La fase termofila lavora a temperature più alte, tra i 45 e i 60°C, aumentando la velocità di reazione e utilizzando organismi specifici che riescono a lavorare solo a queste temperature e di conseguenza diminuendo il HRT. L'alta temperatura favorisce una distruzione dei patogeni presenti nel substrato in entrata igienizzando il bioreattore, favorisce una migliore degradazione dei substrati solidi e una migliore separazione tra la fase liquida e quella solida. I problemi più comuni di questa tipologia di installazione sono l'alto fabbisogno energetico da fornire al sistema per mantenere la temperatura ottimale, un'alto rischio di produzione di ammoniaca e visto che l'aumento della concentrazione di ammoniaca dipende dall'aumento di temperatura si avrebbe il rischio di inibizione del sistema, lavorando appunto a temperature più alte. Si hanno costi di installazione e manutenzione più alti ma un volume del reattore minore rispetto allo stato mesofilo. I moderni bioreattori o specifici processi industriali che possono permettersi costi di investimento più alti utilizzano questo tipo di reattori termofili (SEADI, 2008).

**Tabella 2.8 – confronto tra mesofilia e termofilia** (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

<b>Aspetto</b>	Mesofilia	Termofilia
<b>Stabilità</b>	Buona per una alta diversificazione della comunità microbica	Discreta
<b>Velocità di degradazione</b>	Inferiore	Maggiore
<b>VFA</b>	Concentrazioni molto basse	Concentrazioni maggiori
<b>Igienizzazione</b>	Scarsa	Elevata
<b>Abbattimento solidi volatili</b>	Inferiore	Maggiore
<b>Costi di investimento</b>	Inferiori	Superiori
<b>Fabbisogno termico</b>	Inferiore	Superiore
<b>Volume di reazione</b>	Superiore	Inferiore

La solubilità dei diversi gas che compongono il biogas (VFA, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ) dipende anchessa dalla temperatura ( tabella 2.8 ). Questo può essere significativo per i gas che hanno un effetto inibente nel processo. La viscosità del substrato è inversamente proporzionale alla temperatura, quindi si ha un substrato più liquido a alte temperature ed è facilitata la diffusione di materiale solubile.

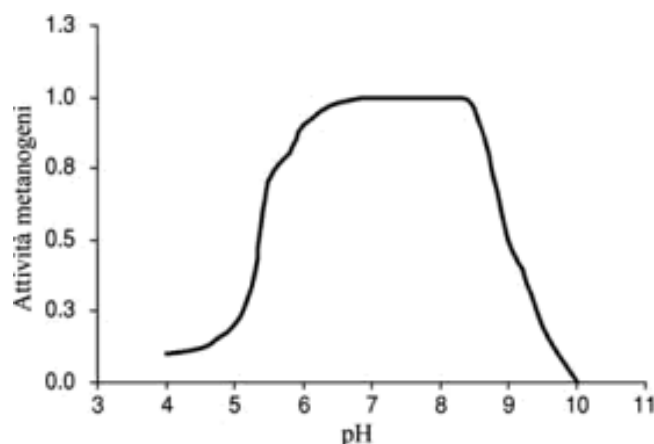
**Tabella 2.9 – solubilità dei gas (SEADI, 2008).**

Gas	Temperature (°C)	Solubilità [mmol/lH <sub>2</sub> O]	Cambio di solubilità 50 – 35 °C
H <sub>2</sub>	35 – 50	0,749 – 0,725	3,3%
CO <sub>2</sub>	35 – 50	26,6 – 19,6	36%
H <sub>2</sub> S	35 – 50	82,2 – 62,8	31%
CH <sub>4</sub>	35 – 50	1,14 – 0,962	19%

### 2.2.2 pH

Il valore di pH è la misura dell'acidità/alcalinità di una soluzione, nel nostro caso è la misura di pH della miscela del substrato nel reattore di digestione anaerobica. Regola tutte le fasi della degradazione e influisce sulla composizione microbica; a sua volta la popolazione batterica influenza il pH perché, ad esempio, i batteri fermentativi contribuiscono alla formazione di acidi e quindi all'abbassamento dello stesso, mentre la metanogenesi, consumando acidi, innalzano il pH.

La fase metanogenica si sviluppa al meglio ad un intervallo di pH compreso tra 7 – 7,5 ( accettabile 6,8 – 8,2 ), mentre per la fase fermentativa l'intervallo ottimale è tra 5,5 – 6, in figura 2.2 è rappresentato l'andamento dell'attività metanogenica in funzione del pH (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).



**Figura 2.3 – andamento dell’attività metanogeni in funzione del pH (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015)**

Il valore di pH dipende dalla concentrazione di CO<sub>2</sub> nel mezzo liquido e quindi dalla sua pressione parziale nel biogas, dagli acidi volatili dall’ammoniaca e dall’H<sub>2</sub>S. L’alcalinità è espressa in termini di concentrazione di carbonato di calcio equivalente (CaCO<sub>3</sub>) e per l’alta concentrazione di CO<sub>2</sub> nel gas prodotto, l’alcalinità richiesta è tra 2000 e 4000 mg/L come CaCO<sub>3</sub> per mantenere il pH in condizioni di neutralità.

L’ammoniaca, presente nei substrati utilizzati o prodotta durante la degradazione di proteine, può causare l’innalzamento del pH del reattore e l’accumulo di VFA che ne causa l’abbassamento (SEADI, 2008).

### 2.2.3 VFA Acidi grassi volatili

Gli acidi grassi volatili VFA sono prodotti intermedi della digestione anaerobica, precisamente prodotti durante la fase di acidogenesi, aventi fino a sei atomi di carbonio. In molti casi l’instabilità del processo può portare a un accumulo dei VFA che di conseguenza possono causare un’abbassamento del pH. L’accumulo di questo sottoprodotto di reazione è dovuto alla variazione di temperatura di esercizio, tempi ridotti di residenza nel digestore, squilibri nei rapporti di nutrienti; questi fattori influenzano le prime fasi della digestione anaerobica accelerando le fasi di idrolisi, acidogenesi e acetogenesi, senza lasciare il tempo di far avvenire tutte le fasi in maniera completa e formare dunque i composti adatti per la fase di metanogenesi.

L’esperienza pratica mostra che due digestori differenti possono comportarsi in a maniera differente rispetto alla stessa concentrazione di VFA, nel senso che una stessa

concentrazione di VFA può essere ottimale per un digestore, ma inibente per l'altro. Una delle possibili spiegazioni può essere il fatto che la composizione delle popolazioni di microrganismi varia da digestore a digestore. Per questo motivo, e come nel caso del pH, la concentrazione di VFA non può essere raccomandato come parametro di controllo del processo autonomo (SEADI, 2008).

#### 2.2.4 Ammoniaca NH<sub>3</sub>

Un'alta concentrazione di azoto ammoniacale nel digestore, specialmente azoto ammoniacale libera come gas, è considerata un fattore di inibizione del processo. Le deiezioni animali introdotte in un digestore sono normalmente ricche di ammoniaca dovuto alla presenza di urina. Per il suo effetto di inibizione la concentrazione di NH<sub>3</sub> dovrebbe essere inferiore a 80 mg/l soprattutto perché i batteri metanogeni sono sensibili a essa.

La concentrazione di ammoniaca libera è direttamente legata alla temperatura, per questo è molto più probabile trovare alte concentrazioni in reazioni termofile che mesofile. La concentrazione di ammoniaca libera è calcolata dall'equazione:

$$[NH_3] = \frac{[T - NH_3]}{\left(1 + \frac{H^+}{k_a}\right)}$$

Dove:

- $[NH_3]$  è la concentrazione di ammoniaca libera;
- $[T - NH_3]$  è la concentrazione totale di ammoniaca;
- $k_a$  è la costante di dissociazione;

Questo significa che un aumento della temperatura e del pH aumentano la concentrazione di ammoniaca libera e di conseguenza l'inibizione del sistema (SEADI, 2008).

#### 2.2.5 Pezzatura e Umidità

La pezzatura e l'umidità del substrato in entrata sono elementi da tenere in considerazione per una buona efficienza di AD perché la velocità di degradazione dei microrganismi che effettuano la digestione sono influenzati anche da questi fattori. Al

diminuire della pezzatura aumenta la superficie specifica attaccabile, con dimensioni ideali inferiori a 50 mm (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015). L'umidità aiuta ad aumentare la dilatazione dei pori del substrato aiutando ad aumentare la colonizzazione batterica dovuta all'aumento della superficie disponibile. Entrambi i valori possono essere regolati per mezzo di sistemi di triturazione/vagliatura e con l'aggiunta di acqua di diluizione per ottenere miscele con un tenore di umidità ottimale.

#### 2.2.6 Macro e Micro nutrienti

La biomassa entrante nel biodigestore deve garantire un apporto di nutrienti ai batteri fermentanti e metanigeni per permetterne la sopravvivenza. Esempi di microelementi importanti sono ferro, cobalto, nickel, selenio che insieme ai macronutrienti principali carbonio, azoto, fosforo e zolfo aiutano la proliferazione e la vita dei microrganismi.

L'ottimale rapporto tra carbonio, azoto, fosforo e zolfo ( C:N:P:S ) è considerato 600:15:5:1 (SEADI, 2008). Una mancanza di macro e micro nutrienti possono causare un'inibizione della AD.

#### 2.2.7 COD domanda chimica di ossigeno

Il COD è quantità di ossigeno necessaria per ossidare la sostanza organica per via chimica. Il contenuto di COD della sostanza organica biodegradata è trasferito al metano o al digestato, mentre l'anidride carbonica possiede un COD nullo perché non può essere ulteriormente ossidata.

La domanda chimica di ossigeno fornisce la corretta informazione sullo stato di ossidazione del substrato e di conseguenza può indicare una previsione della quantità di metano prodotto; inoltre la COD può essere utilizzato come il parametro più adeguato per quantificare la concentrazione di materiale organico nel substrato (LIER e MAHMOUD, 2008).

## 2.3 Parametri di dimensionamento di un reattore

Altri importanti parametri per la produzione di biogas sono i parametri di gestione del reattore che definiscono l'esercizio in termini di tempi di permanenza della massa alimentata nel reattore, di concentrazione dei microrganismi, di rese di produzione di biogas in relazione al volume del reattore ed alle caratteristiche del substrato trattato. In questi parametri il termine substrato potrà essere, di volta in volta, sostituito da una misura della quantità di composti biodegradabili presenti nel campione. Il substrato è generalmente definito, nell'ambito dei processi di digestione, in termini di solidi totali (ST), di solidi totali volatili (SV), di domanda chimica di ossigeno (COD).

Dove:

- ST: solidi totali, ossia il contenuto in sostanza secca di un campione;
- SV: solidi totali volatili, cioè la frazione di sostanza secca che risulta volatilizzata per combustione a 550 °C fino a peso costante;
- COD: domanda chimica di ossigeno. Quantità di ossigeno consumato per l'ossidazione della sostanza organica.

I parametri di gestione del reattore sono principalmente il carico organico volumetrico, il tempo di residenza idraulico, il tempo di residenza cellulare. Con questi parametri si può dimensionare il volume e la configurazione di un reattore.

### 2.3.1 Carico organico volumetrico ( OLR )

Il carico organico volumetrico è un importante parametro operativo ed è la quantità di substrato organico alimentato per unità di volume del digestore nell'unità di tempo (SEADI, 2008).

$$OLR = \frac{Q \times C_a}{V}$$

Dove:

- OLR carico organico volumetrico [ $Kg_{SV}/m^3_{reattore}d$ ]
- Q portata di alimentazione [ $m^3/d^1$ ];
- $C_a$  concentrazione di substrato nel flusso alimentato [ $Kg_{SV}/m^3$ ];



- $V$  volume del reattore [ $m^3$ ];

### 2.3.2 Tempo di residenza idraulico (HRT)

Un altro importante parametro per il dimensionamento di un digestore del biogas è il tempo di residenza idraulico che è il rapporto tra il volume del reattore considerato e la portata di alimentazione al reattore.

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

Dove:

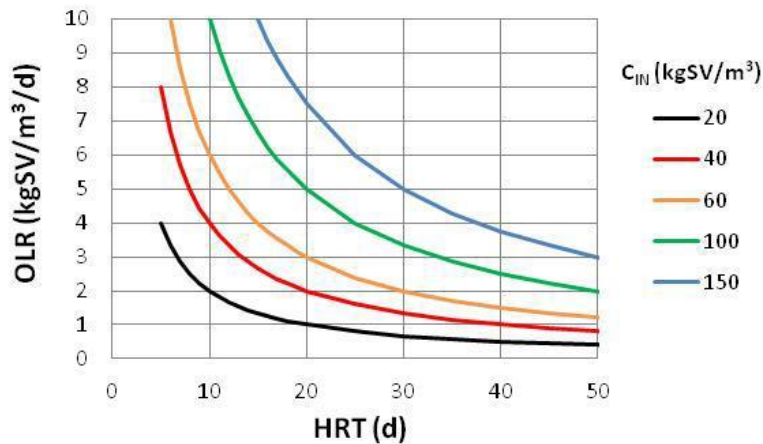
- $HRT$  è il tempo medio di residenza idraulico [ $d$ ];
- $V$  è il volume del reattore [ $m^3$ ];
- $Q$  è la portata al reattore [ $m^3/d$ ];

Secondo l'equazione riportata, aumentando il carico organico si riduce la HRT. Il tempo di ritenzione deve essere sufficientemente lungo da garantire che la quantità di microrganismi rimossi con l'effluente (digestato) non sia superiore alla quantità di microrganismi riprodotti. Un basso valore di HRT fornisce una buona velocità di flusso del substrato in ingresso al biodigestore, ma una resa di gas inferiore. È quindi importante adattare il HRT al tasso di decomposizione specifica dei substrati utilizzati. Conoscendo il HRT specifica, l'ingresso di substrato quotidiano ed il tasso di decomposizione del substrato, è possibile calcolare il volume del digestore necessario (SEADI, 2008).

HRT e OLR sono tra loro inversamente proporzionali, per la concentrazione del substrato alimentato, quindi la relazione tra i due può anche essere scritta come (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015):

$$OLR = \frac{Q \times C_a}{V} = C_a/HRT$$

Conoscendo la concentrazione di solidi presente nei liquami ( $C_a$ ) e HRT, si riesce a trovare il valore di OLR. Al contrario imponendo un valore OLR e il contenuto dei solidi totali volatili si può calcolare HRT, come illustrato in figura 2.3.



**Figura 2.4** Relazione tra HRT e OLR in funzione della concentrazione di SV (FICARA, MARAZZI, *et al.*, 2015).

### 2.3.3 Tempo di residenza cellulare (SRT)

Il tempo di residenza cellulare è considerato come il tempo medio di residenza dei fanghi all'interno del reattore ed è dato dal rapporto tra la massa totale di solidi volatili presenti nel reattore e la portata di solidi estratta dal reattore. La differenza con HRT è che questo considera il tempo di residenza nel reattore solamente dei fanghi solidi formati durante il processo anaerobico. Mentre HRT misura il tempo di residenza di tutto il fluido dall'ingresso all'uscita del reattore.

$$SRT = \frac{V \times X}{W}$$

Dove:

- $SRT$  è il tempo medio di residenza dei fanghi [ $d$ ];
- $V$  è il volume del reattore [ $m^3$ ];
- $W$  portata di sostanza volatile estratta dal reattore [ $Kg/m^3$ ];
- $X$  concentrazione dei fanghi nel reattore [ $Kg/d$ ];

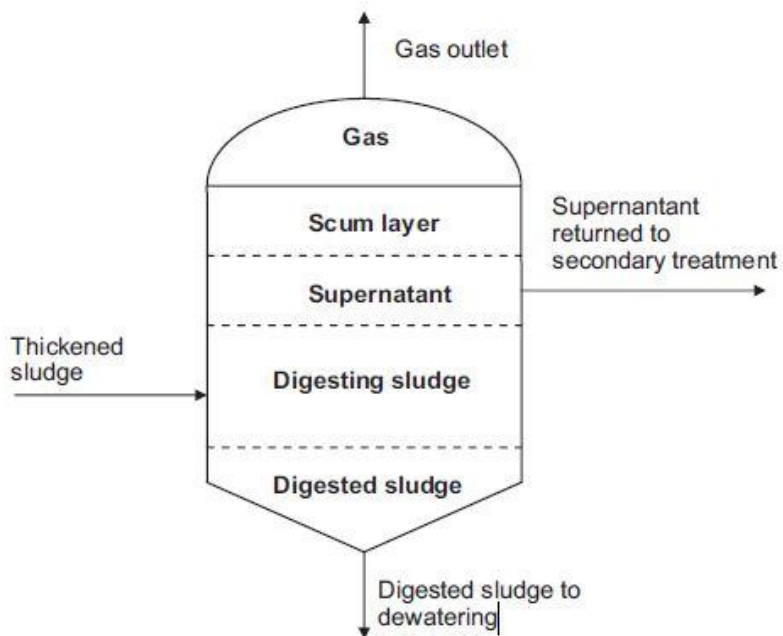
Se la quantità di biomassa prodotta per crescita cellulare è pari alla quantità estratta dal reattore, la concentrazione di biomassa attiva all'interno rimane costante nel tempo e si parlerà di condizioni di stato stazionario. Anche in questo caso valgono le considerazioni riportate per l'HRT in relazione al reattore ideale o reale (CANNIZZARO, 2014).

## 2.4 Tipologie di impianti

Esistono differenti tipi di impianti di digestione anaerobica e variano a secondo della temperatura di reazione dal numero di reattori e dal substrato in entrata.

### 2.4.1 Digestore standard (a freddo)

Questa tipologia di digestione anaerobica è la più semplice e utilizza un lungo periodo di digestione di 30 – 60 giorni. In figura 2.4 è schematizzata la struttura del digestore con le varie stratificazioni del substrato in entrata.



**Figura 2.5 – standard rate digester** (APPELS, BAEYENS, *et al.*, 2008)

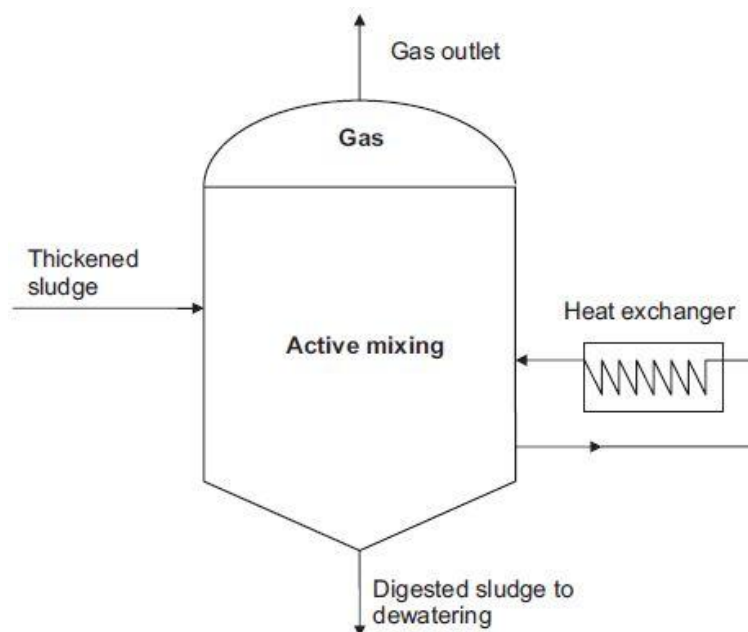
Il contenuto del substrato è di solito non riscaldato e non miscelato. Sebbene il biogas generato produce una miscelazione naturale, all'interno avviene una stratificazione in quattro zone:

- Strato di schiuma;
- Strato liquido ( o surnatante );
- Strato di substrato in digestione;
- Strato di substrato digerito;

Il surnatante è estratto e trattato in un impianto di trattamento di effluenti. Il substrato digerito sul fondo del digestore è periodicamente estratto (APPELS, BAEYENS, *et al.*, 2008).

#### 2.4.2 Digestore ad alto carico

Questo digestore è una evoluzione del digestore precedente. Il substrato in entrata è riscaldato e completamente miscelato per renderlo più omogeneo e facilmente digeribile, invece il fango grezzo più liquido viene ispessito renderlo più uniforme e dunque un'alimentazione facilitata. Tutti questi elementi combinati creano un ambiente uniforme e quindi il volume del serbatoio può essere ridotto mentre la stabilità e l'efficienza del processo sono migliorate. I sistemi di miscelazione possono essere: il ricircolo dei gas, per pompaggio o per draft tube mixer e la miscelazione meccanica; il substrato principalmente è riscaldato da scambiatori di calore esterni a causa della loro flessibilità e facilità di manutenzione. Altri modi di riscaldamento includono scambiatori di calore interni e iniezione di vapore. Un'alimentazione di substrato uniforme è molto importante, e il digestore deve essere alimentato in continuo o con intervalli regolari per aiutarlo a mantenersi in stato stazionario e ridurre lo shock di carico, che potrebbe causare la scomparsa dei microrganismi più sensibili. Questa tipologia di alimentazione aiuta anche a disattivare i microrganismi patogeni figura 2.5 (APPELS, BAEYENS, *et al.*, 2008).



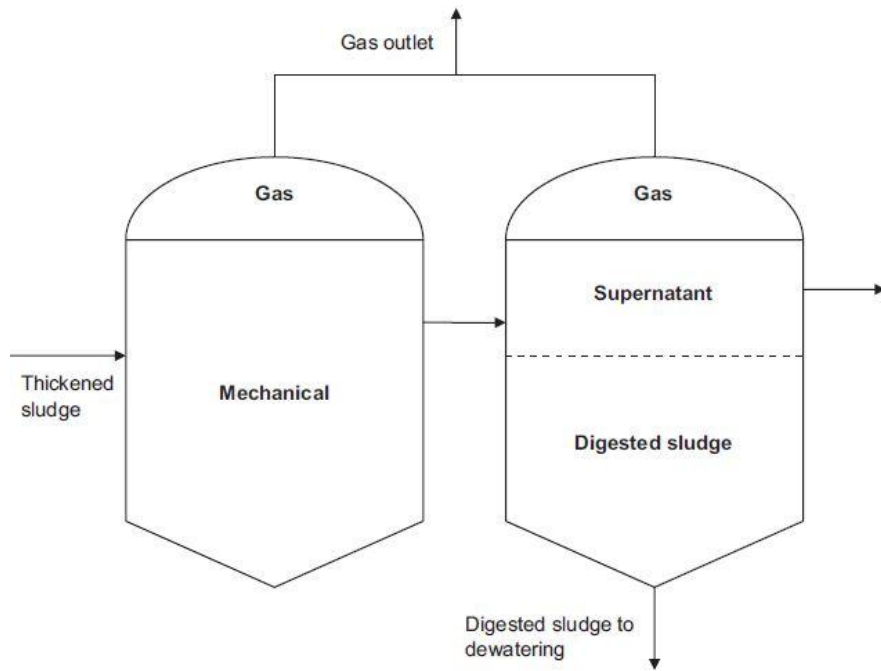
**Figura 2.6 – Schema di High rate digester** (APPELS, BAEYENS, *et al.*, 2008).

### 2.4.3 Digestore a due stadi

Nel digestore a due fasi i due reattori funzionano in serie, un digestore ad alto carico è accoppiato con un secondo serbatoio talvolta chiamato digestore secondario (figura 2.6) anche se è solo utilizzato per immagazzinare i solidi digeriti e per decantare il supernatante: non è né riscaldato né misturato.

Questa digestione è da considerarsi la più funzionale, in quanto rende possibile massimizzare le velocità di crescita delle due differenti popolazioni batteriche, che richiedono condizioni di pH differenti. Nel primo reattore avvengono le prime due fasi della digestione anaerobica. L'alimentazione del fango è continua, e questo viene riscaldato e miscelato per circa quindici giorni. Successivamente il fango passa, mediante pompa, nel secondo reattore, laddove avviene la fase metanigena; qui il fango non viene riscaldato né miscelato, e subisce la separazione di fase tra surnatante e fango digerito (detto digestato), da cui viene estratto il biogas.

Talvolta, il serbatoio primario e secondario sono di uguale disegno, ciascuno con riscaldamento e la stessa capacità di miscelazione per servire come digestori di attesa. Il supernatante ritirato dal secondo serbatoio può contenere elevate concentrazioni di solidi sospesi e piccoli fenomeni di sedimentazione sono comunemente associati con una digestione incompleta nel digestore primario, portando a piccole bolle di gas presenti nella sospensione all'interno del secondo serbatoio.



**Figura 2.7 – Two-rate digester** (APPELS, BAEYENS, *et al.*, 2008).

### 3. METODOLOGIA

Il biogas può dunque essere prodotto utilizzando come substrato i rifiuti organici generati dalla popolazione di una città. Lo scopo di questo lavoro è di identificare quale può essere la quantità di biogas prodotto utilizzando appunto i residui organici. Si prende come campione una città brasiliana, Pomerode nello stato di Santa Catarina, e si analizza come è effettuata la raccolta di rifiuti trovando la quantità di residui prodotti, la loro qualità, il loro smaltimento, il costo di gestione e il loro impatto ambientale misurato in quantità di gas di effetto serra immesso in atmosfera.

Si analizza poi un agglomerato di quattro comuni italiani in provincia di Bergamo: Albano Sant’Alessandro, Brusaporto, Pedrengo, Torre de’ Roveri, per poter comparare il sistema di raccolta italiano con quello brasiliano e identificare miglieorie o punti deboli e comparare la quantità di residui prodotti e di conseguenza il biogas eventualmente producibile. Si utilizzano quattro comuni italiani nel confronto, per poter avere un simile numero di abitanti con la città brasiliana.

Questa comparazione sarà effettuata analizzando indici demografici, di sviluppo umano, PIL, differenze sociali e culturali che possono influenzare una differenza di produzione. Con questi indici analizzati si può ipotizzare che la previsione di crescita futura della città brasiliana rispecchierà quella dell’agglomerato urbano italiano e dunque passare a una valutazione qualitativa oltre che quantitativa dei rifiuti organici prodotti e della metodologia di raccolta delle due città. In questo modo si possono identificare vantaggi e svantaggi, costi eccessivi di gestione e idee per migliorare il sistema per una migliore efficienza economica, ambientale e sociale. L’Amministrazione di Pomerode può così identificare un sistema di raccolta e trattamento di rifiuti più efficiente dell’attuale e decidere così se modificare le attuali abitudini per uno sviluppo futuro più rapido e funzionale. Si effettua poi una previsione futura dell’andamento popolazione di Pomerode e dei municipi italiani per calcolare un aumento della produzione dei rifiuti organici utilizzabili nel bioreattore. Successivamente si analizza l’impatto ambientale che i rifiuti organici della città avrebbero se continuassero a essere smaltiti in discarica per vedere il risparmio in termini di GHG emessi. Si dimensiona poi un bioreattore anaerobico per il trattamento di questi rifiuti, analizzando i costi di costruzione e i relativi guadagni per la vendita di energia elettrica generata dalla combustione di biogas, si effettua poi un bilancio

economico per calcolare il tempo di ritorno e lasciare dunque all'Amministrazione della città brasiliana la scelta se investire con questa tecnologia o no.

### **3.1 Indicatori di produzione dei rifiuti**

La produzione di rifiuti è influenzata da diversi fattori sociali, economici, culturali, climatici, geografici che combinati l'uno con l'altro generano una risposta al perché un campione popolazione produce più rifiuti di altri. Per esempio una città con una produttività economica pro capite maggiore che un'altra, avrà di conseguenza anche una produzione di rifiuti maggiore; abitudini culturali diverse come una città con popolazione prevalentemente rurale, genererà più residui organici che una città, delle stesse dimensioni, di carattere prettamente urbano (ARPA VENETO, 2013).

Analizzando in dettaglio i fattori che influenzano maggiormente la produzione di rifiuti urbani possono essere suddivisi in:

- fattori territoriali legati a:
  - caratteristiche morfologiche (pianura, collina, montagna, clima);
  - caratteristiche urbanistiche (popolazione, densità abitativa, numero e tipologia di utenze non domestiche, divisione per sesso);
- fattori socio-economici legati a:
  - ISU ( indice di sviluppo umano );
  - andamento del PIL e delle attività produttive;
- fattori gestionali legati alle scelte operate dall'amministrazione nell'organizzazione del servizio, che comprendono:
  - la tipologia di raccolta adottata;
  - i costi di gestione e le forme e gli investimenti in materia di comunicazione agli utenti.

Tutti questi fattori sono necessari per identificare la variabile che consente di confrontare le diverse realtà territoriali e di fornire un quadro sull'evoluzione del servizio di raccolta e sull'efficienza del sistema di gestione dei rifiuti urbani.

Questo indicatore è la produzione pro capite di rifiuto urbano, in cui la produzione totale di rifiuti viene divisa per la popolazione di riferimento. Si specifica che la produzione totale di rifiuti comprende non solo i rifiuti di origine domestica ma



anche i rifiuti assimilati, ovvero provenienti da utenze diverse (es. commerciali, di servizi, artigianali etc.) (ARPA VENETO, 2013).

Anche le presenze turistiche, e l'indotto che ne consegue, contribuiscono ad aumentare notevolmente la quantità di rifiuto urbano prodotto soprattutto in certi periodi dell'anno. In questo caso può risultare più rappresentativo utilizzare come indicatore la produzione pro capite equivalente, che considera anche l'incidenza delle presenze turistiche, ma nel nostro studio di caso le città in esame non sono di carattere turistico e di conseguenza l'afflusso di turisti e la loro produzione di rifiuti è insignificante.

### 3.2 Metodo di previsione di crescita popolazionele

Per stimare l'indice di crescita di una popolazione esistono differenti metodi che si possono adottare; in questo studio si analizzano quattro metodi per poi vedere quale ha un migliore coefficiente di correlazione ( $R^2$ ) e utilizzare questo metodo per stimare la crescita popolazionele delle città esaminate.

- Nel metodo lineare, la crescita popolazione è rappresentata da una equazione di primo ordine:

$$P = a + bx$$

Dove:

- $a, b$  = coefficienti lineare e angolare da determinare;
- $x$  = numero di anni ( $x = t_n - t_0$ , dove  $t_0$  è l'anno di riferimento ad essere adottato);
- $P$  = popolazione stimata.
- Metodo basato sull'equazione di curva di potenza:

$$P = a * x^b \text{ con } a > 0$$

Dove:

- $P_i > 0$  e  $x_i > 0$ ;
- $a, b$  = coefficienti da determinare;
- $x$  = intervallo di tempo tra  $t_n$  e  $t_0$ ;

- $P$  = popolazione stimata.
- Metodo basato sull'equazione esponenziale:

$$P = a * e^{bx} \text{ con } a > 0 \text{ e } P > 0$$

Dove:

- $a, b$  = coefficienti da determinare;
- $x$  = intervallo di tempo tra  $t_n$  e  $t_0$ ;
- $P$  = popolazione stimata.

- Metodo basato sull'equazione logaritmica:

$$P = a + b * \ln(x)$$

Dove:

- $a, b$  = coefficienti da determinare;
- $x$  = intervallo di tempo tra  $t_n$  e  $t_0$ ;
- $P$  = popolazione stimata.

Utilizzando questi metodi di calcolo di previsione popolazione si potrà scegliere quello che rispecchia maggiormente l'andamento reale delle popolazioni in un arco temporale prestabilito di cui si conoscono i dati; successivamente si utilizzerà il metodo più adatto per una proiezione futura delle popolazioni.

### **3.3 Calcolo impatto ambientale dei rifiuti in discarica**

Per impatto ambientale causato dai residui urbani, si considera la produzione di metano e biossido di carbonio che questi generano quando sono raccolti in discariche controllate. Se queste discariche non hanno un sistema di raccolta e di incenerizzazione di questi gasi,  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  sono immessi in atmosfera e sono considerati tra i più nocivi GHG che causano l'effetto serra.

Si calcola dunque quale è la quantità di biogas che i residui della città di Pomerode generano nella discarica controllata di Timbó, dove vengono collocati. Si misura il volume di biogas in quantità di tCO<sub>2</sub> equivalente che ogni anno la discarica può generare impattando l'ambiente. Questo volume generato sarà confrontato con il volume di biogas generabile in un reattore anaerobio di biogas, utilizzando lo stesso tipo e la stessa quantità di rifiuti.

Il metodo utilizzato per il calcolo nella discarica è il metodo proposto dall'IPCC (1996) che comprende la stima della quantità di carbonio organico degradabile presente nei residui, si calcola così la quantità di metano che si può generare da una determinata quantità di residui depositati. Sono necessari dati statistici della popolazione e dei residui solidi urbani generati. In caso non si abbiano tutti i dati necessari per il calcolo, si utilizzano dati padronizzati forniti dall'IPCC, ma con una conseguente qualità dei risultati meno vero simile alla realtà. Quando si hanno dati sufficienti sulla disposizione dei rifiuti nel locale di destinazione di ogni anno, si può usare la seguente formula:

$$Q_{T,x} = kR_xL_0e^{-k(T-x)}$$

Dove:

- $Q_{T,x}$  = volume di metano generato nell'anno in corso T per i residui  $R_x$  dell'anno x [ $m^3$ /anno];
- $k$  = costante di decadimento [ $anno^{-1}$ ];
- $R_x$  = quantità di residui depositati nell'anno x [ton];
- $L_0$  = potenziale di generazione di metano dai residui [ $m^3$ /t di residui];
- $T$  = anno in corso;
- $x$  = anno di deposito dei residui in discarica;

Con questa formula si ottiene il volume di metano generato ogni anno dai rifiuti depositati nell'anno specifico x.

La costante di decadimento k è dipendente al tempo necessario per la frazione di carbonio organico degradabile (FCD) dei rifiuti a dimezzare la sua massa iniziale. Per l'IPCC (1996) questa costante è stabilita dall'equazione:

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Dove:

- $k$  = costante di decadimento [anno<sup>-1</sup>];
- $t_{1/2}$  = tempo di dimezzamento della massa di FCD.

Per vedere quindi quale è la produzione di metano finale di ogni anno, si applica la formula seguente:

$$Q_T = \sum Q_{T,x}$$

Dove:

- $Q_T$  = volume di metano totale all'anno T;
- $x$  = anno iniziale fino all'anno T.

Il potenziale di generazione di metano a partire da residui  $L_0$ , può essere ottenuto con l'equazione presentata dall'IPCC (1996):

$$L_0 = FCM \times FCD \times FCDf \times F \times (16/12)$$

Dove:

- $L_0$  = potenziale di generazione di metano dai residui [tCH<sub>4</sub>/t di residui];
- $FCM$  = fattore di correzione del metano;
- $FCD$  = carbonio organico degradabile [tC/t di residuo];
- $FCDf$  = frazione di FCD dissociata;
- $F$  = frazione in volume del metano nel biogas [%];
- $(16/12)$  = fattore di conversione del carbonio in metano [tCH<sub>4</sub>/tC];

Il fattore di correzione del metano (FCM), che misura la qualità della disposizione dei residui in discarica, considera il fatto che un residuo depositato in maniera non adeguata, produce una minor quantità di metano. I valori raccomandati dall'IPCC sono rappresentati in tabella 3.1.

**Tabella 3.1 – FCM per differenti condizioni in discarica IPCC(1996).**

<b>Tipo di locale</b>	<b>FCM</b>
Adeguato	1
Inadeguato – profondo ( > 5 m di rifiuti )	0,8
Inadeguato – raso ( < 5 m di rifiuti )	0,4

Il calcolo della quantità di carbonio organico degradabile (FCD) è basato nella composizione dei rifiuti e nella quantità di carbonio per massa di tipologia di residuo come mostrato in tabella 3.2.

**Tabella 3.2 – COD degradabile per ogni componente dei rifiuti. (ENSINAS, 2003).**

<b>Componente</b>	<b>% FCD (in massa)</b>
A) Carta e cartone	40
B) Residui di parchi e giardini	20
C) Resti di alimenti	15
D) Tessuti	24
E) Legna*	43

\*Escludendo la frazione di lignina che si decompone molto lentamente.

Pertanto la formula per il calcolo del FCD è:

$$FCD = (0,4 \times A) + (0,20 \times B) + (0,15 \times C) + (0,24 \times D) + (0,43 \times E)$$

Dove:

- *A* = frazione di carta e cartone;
- *B* = frazione di resti di parchi e giardini;
- *C* = frazione di resti di alimenti;
- *D* = frazione di tessuti;
- *E* = frazione di legna;

La frazione di FCD dissociata FCD<sub>f</sub>, indica la frazione di carbonio che è disponibile per la decomposizione biochimica ed è ottenuta dalla formula:

$$FCDf = 0,014T + 0,28$$

Dove:

- $T$  = temperatura in zona anaerobica nella discarica [C°];

Con questo metodo si può calcolare il volume di metano prodotto nel corso degli anni di invio dei residui solidi urbani nella discarica.

### **3.4 Dimensionamento Biodigestore**

Per dimensionare un bioreattore di digestione anaerobica si possono utilizzare due metodi di calcolo, un metodo parametrico e un metodo cinetico. Il metodo parametrico non correla il dimensionamento all'efficienza di degradazione richiesta, non include i parametri di inibizione del processo ( $T^\circ$ , pH); offre pertanto solo un limitato supporto nella gestione e nella ottimizzazione del processo. Questo metodo però ha anche dei vantaggi (semplicità, disponibilità di parametri di riferimento, ecc.) che permettono di effettuare un progetto preliminare di un impianto di digestione e prevedere la fattibilità e la sostenibilità del processo. Il dimensionamento (e soprattutto la gestione) sulla base delle cinetiche delle varie fasi del processo offre molti vantaggi teorici in termini di ottimizzazione e controllo del processo; si hanno efficienze migliori e dati più specifici sulla reale degradazione del substrato durante la digestione anaerobica. (MALPEI e CANZIANI, 2011).

Nel seguente studio di caso si utilizza il metodo parametrico di dimensionamento, non avendo una buona base di dati sulle caratteristiche fisico-chimiche dei residui organici prodotti e si esclude quindi il metodo cinetico. Si effettua una pianificazione preliminare della fattibilità dell'installazione di un biodigestore anaerobico per trattare i residui organici della città di Pomerode per diminuire la quantità inviata alla discarica di Timbó. Calcolando quale è la produzione di biogas ottenibile nell'arco di 20 anni, l'energia generabile e di conseguenza vendibile, la riduzione della tassa che i cittadini devono pagare e si valuta se il progetto è economicamente sostenibile e se si può passare a una fase secondaria di progettazione dove si cerca di migliorare l'efficienza del biogas prodotto migliorando il dimensionamento del biodigestore con il metodo cinetico.

### 3.4.1 Pianificazione

Il punto di partenza fondamentale è l'analisi di tutti quei fattori che caratterizzano il bacino d'utenza che fornirà la quantità di biogas prodotto (figura x.1).

In particolare si dovranno valutare:

- le caratteristiche del territorio;
- la situazione demografica;
- la quantità e qualità dei rifiuti prodotti;
- lo stato della raccolta e le preesistenze impiantistiche.



Figura 3 – schema di pianificazione per un progetto di installazione di un bioreattore. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005).

Lo scopo principale è di effettuare un intervento tecnicamente valido, nel rispetto del rapporto ottimale di costo-benefici dell'installazione del sistema di trattamento. Si possono individuare tre livelli progressivi di definizione del progetto di un impianto:

- preliminare;
- definitivo;
- esecutivo.

#### Progetto preliminare

Il progetto preliminare di un impianto di trattamento rifiuti deve individuare:

- i dati quali-quantitativi sui rifiuti prodotti nel bacino d'interesse e una previsione di produzione a medio-lungo termine;
- il processo di trattamento/smaltimento dei rifiuti in ingresso all'impianto e l'attuale destinazione;
- un'area le cui caratteristiche siano tali da soddisfare le necessità dell'opera dal punto di vista localizzativo e funzionale;
- le valutazioni economiche ed ambientali dell'intervento;
- possibilità di inserimento nel sistema produttivo dei materiali o dell'energia recuperata.

La scelta del processo deve essere effettuata sulla base delle caratteristiche dei rifiuti prodotti e sul possibile destino dei prodotti finali del ciclo di trattamento. Il sito prescelto deve possedere caratteristiche idonee dal punto di vista dimensionale, morfologico ed idrogeologico ed essere servito da una buona viabilità di accesso.

Per dimensionare in maniera ottimale un biodigestore si deve avere un'area di lavoro adeguata e devono essere analizzati e dimensionati tutti i vari processi di ricezione e preparazione del substrato. Vengono dunque divisi i vari processi in:

- ricezione
- pretrattamento
- preparazione substrato
- digestione anaerobica
- produzione di energia

#### Ricezione:

I rifiuti in ingresso all'impianto vengono trasferiti dai mezzi di raccolta al reparto ricezione, nel quale vengono stoccati all'interno di una fossa interrata oppure su un piazzale di scarico a raso. Normalmente viene raccolto un volume di rifiuti corrispondente a 2-3 giorni di produzione. Questo volume necessita di una cernita e separazione delle impurezze e materiali problematici che sono presenti nel substrato ricevuto. Per esempio letame e rifiuti domestici possono contenere pietre e altre impurità fisiche e sono generalmente separati per sedimentazione in serbatoi di stoccaggio (e nel caso di sabbia, anche all'interno dei digestori) e devono essere rimossi dal fondo dei serbatoi di volta in volta. Un pre-tank dotato di apposite griglie, in grado



di trattenere le pietre e altre impurità fisiche è normalmente posto prima di pompare il substrato nel serbatoio principale. (SEADI, RUTZ, *et al.*, 2008).

#### Pretrattamento:

Dal reparto ricezione i rifiuti vengono alimentati al reparto pretrattamento, nel quale vengono sottoposti ad una serie di operazioni atte a consentire l'eliminazione delle componenti indesiderate per la successiva fase di digestione anaerobica, quali ad esempio inerti e plastiche. Si effettuano triturazioni e schiacciamento del substrato per raggiungere dimensioni inferiori ai 50mm. Come regola generale, il processo di decomposizione è più veloce quando la dimensione delle particelle sono più piccole. Tuttavia, la dimensione delle particelle influenza solo il tempo di digestione, ma non necessariamente aumenta le rese di metano. (SEADI, RUTZ, *et al.*, 2008)

#### Preparazione substrato/Omogeneizzazione

I rifiuti così pretrattati sono avviati al reparto preparazione del substrato dove subiscono una omogeneizzazione, viene regolato il loro contenuto di umidità attraverso miscelazione con acqua di ricircolo o fanghi ed eventualmente viene eseguita una correzione della temperatura, in modo da ottenere una miscela con caratteristiche chimico-fisiche ottimali per poter essere alimentata nei digestori. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005).

#### Alimentazione al digestore

Dopo stoccaggio e pretrattamento il substrato viene alimentato nel digestore. La tecnica di alimentazione dipende dal tipo di materia prima e dalla sua pompabilità. Substrati pompabili come liquami zootecnici, fanghi di flottazione, olio di pesce, vengono trasferito dai serbatoi di stoccaggio al digestore attraverso delle pompe. Tipi di materie prime che sono non pompabili (materiali fibrosi, erba, mais insilato, letame con alto contenuto di paglia) possono essere ribaltati/versati da un caricatore nel sistema di alimentazione e quindi immesse nel digestore. Particolare attenzione deve essere rivolta alla temperatura del materiale alimentato. Grandi differenze tra la temperatura della nuova carica e la temperatura di funzionamento del digestore può verificarsi se la materia prima è stata preriscaldata (raggiungendo fino a 130 ° C) o durante la stagione invernale (inferiori a 0 ° C). Le differenze di temperatura disturbano la microbiologia di

processo, causando perdite di resa di gas e quindi devono essere evitate (SEADI, RUTZ, *et al.*, 2008).

### Digestione anaerobica

Il nucleo di un impianto di biogas è il digestore - un serbatoio reattore a prova d'aria, in cui avviene la decomposizione della materia prima, in assenza di ossigeno, e dove si produce biogas.

La progettazione di un impianto di biogas e del tipo di digestione sono determinati dalla sostanza secca contenuto del substrato digerito. Per dimensionare un bioreattore a digestione anaerobica che utilizza come substrato la FORSU, bisogna innanzitutto decidere che tipologia di reattore, utilizzare e che metodo di dimensionamento seguire. Bisogna inizialmente decidere se l'alimentazione del substrato nel reattore sia continua o discontinua:

- Continua significa che l'alimentazione avviene continuamente o semicontinualmente e il tempo di permanenza del substrato nel reattore è pari al tempo di residenza idraulico (HRT).
- Discontinua il processo viene gestito in maniera cosiddetta "batch"; si avrà, cioè l'alimentazione del reattore con una certa quantità di substrato ed il conseguente avanzamento del processo fino ad esaurimento del substrato e la ripetizione del ciclo. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005)

Il secondo passaggio è decidere se effettuare un ricircolo o no dell'effluente in uscita dal biodigestore. Nel processo senza ricircolo la concentrazione del substrato, dei prodotti e della biomassa nell'effluente è uguale a quella nel reattore, il cui contenuto è assunto omogeneo. Questo tipo di processo è generalmente utilizzato per la stabilizzazione dei fanghi prodotti negli impianti di depurazione o per processi wet o semi-dry di digestione di rifiuti organici.

Il ricircolo di parte dell'effluente dopo essere stato separato permette di reintrodurre nel reattore parte della biomassa attiva estratta con la biomassa in uscita, garantendo quindi maggiori concentrazioni della stessa all'interno del reattore. Questo viene generalmente ottenuto separando la frazione liquida da quella solida e ricircolando quest'ultima all'interno del reattore. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005)

La tipologia di reattore da utilizzare con i metodi di gestione analizzati, deve essere scelta secondo la tipologia di substrato che si desidera inserire. Per il trattamento della frazione organica dei rifiuti organici, che è lo studio di caso preso in analisi, ci

sono tre tipologie di funzionamento dei reattori che dipendono dal tenore di solidi che caratterizza il rifiuto trattato: processo a secco (dry), semi-secco (semi-dry) e a umido (wet). In tabella 3.3 sono rappresentate le caratteristiche dei tre processi (NARDELLI, 2012)

**Tabella 3.3 – caratteristiche di scelta del processo di digestione secondo %ST del substrato in ingresso. (NARDELLI, 2012).**

	%ST in ingresso	A secondo della Temperatura	A secondo della concentrazione di solidi totali (%ST)
<b>Umido (wet)</b>	< 10%	Termofila (50 - 65°C)	Alto carico 8 – 10% Basso carico < 8%
		Mesofila (30 - 45°C)	
		Psicrofila (5 - 20°C)	
<b>Secco (dry)</b>	> 20%	Termofilia (50 - 70°C)	
<b>Semi-secco (semi-dry)</b>	10 – 20%	Mesofila ( 30 - 45°C)	

La digestione a umido (wet) prevede in ingresso alla digestione un substrato diluito con valori di solidi totali inferiori al 10%, in questo modo si può utilizzare un digestore completamente miscelato a processo continuo. Il materiale organico in ingresso è diluito con acqua di rete o dal parziale ricircolo dell'effluente del reattore. In tabella 3.4 gli intervalli tipici per i valori dei parametri di processo e le rese dei processi wet.

**Tabella 3.4 – intervalli tipici per i parametri del processo wet. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005).**

<b>Parametri di Processo</b>	<b>Intervalli</b>
Solidi nel rifiuto trattato [%ST]	10 fino al 15
Carico organico, OLR [kgSV/m <sup>3</sup> d]	2-4 fino a 6
Tempo di ritenzione idraulica, HRT [d]	10-15 fino a 30
<b>Rese del processo</b>	
Produzione biogas [m <sup>3</sup> /t rifiuto]	100-150
Produzione specifica di biogas [m <sup>3</sup> /kgSV]	0.4-0.5
Contenuto di metano [%CH <sub>4</sub> ]	50-70
Riduzione della sostanza volatile [%]	50-60, fino a 75

Nel processo semi-dry la quantità di solidi totali presente nel substrato è una via di mezzo rispetto ai processi wet e dry, opera infatti con substrati con un contenuto in solidi totali tra il 15-20% che è la concentrazione tipica dei residui organici da raccolta differenziata. La soluzione impiantistica più adatta è un reattore completamente miscelato che può lavorare in condizioni termofile e mesofile ad alimentazione continua; il rifiuto utilizzato, dopo un semplice trattamento iniziale di vagliatura, è diluito per facilitare la digestione e mantenere una carica organica costante.

**Tabella 3.5 – intervalli tipici per processo di tipo semy-dry.** (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005)

<b>Parametri di Processo</b>	<b>Intervalli</b>
Solidi nel rifiuto trattato [%ST]	10-20 fino a 25
Carico organico, OLR [kgSV/m <sup>3</sup> d]	8-12 fino a 18 in termofilia
Tempo di ritenzione idraulica, HRT [d]	10-15
<b>Rese del processo</b>	
Produzione biogas [m <sup>3</sup> /t rifiuto]	100-150
Produzione specifica di biogas [m <sup>3</sup> /kgSV]	0.3-0.5
Contenuto di metano [%CH <sub>4</sub> ]	55-60
Riduzione della sostanza volatile [%]	40-50, fino a 60

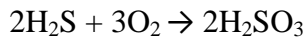
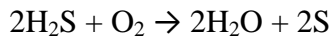
La digestione secca (dry) prevede un alto tenore di solidi in entrata all'incirca tra il 25-40%. Non ci sono grandi variazioni nei processi biochimici e microbiologici ma si devono cambiare i metodi di trattamento dei rifiuti in ingresso, il sistema di pompaggio e di miscelazione; questi aggiustamenti prevedono un aumento del costo di installazione dell'impianto e di gestione. Per l'elevata densità e viscosità dei residui trattati i reattori ideali sono quelli plug-flow. In tabella 3.6 i parametri tipici del processo dry.

**Tabella 3.6 – intervalli tipici per processo di tipo dry.** (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005).

<b>Parametri di Processo</b>	<b>Intervalli</b>
Solidi nel rifiuto trattato [%ST]	25-40
Carico organico, OLR [kgSV/m <sup>3</sup> d]	8-10
Tempo di ritenzione idraulica, HRT [d]	25-30
<b>Rese del processo</b>	
Produzione biogas [m <sup>3</sup> /t rifiuto]	90-150
Produzione specifica di biogas [m <sup>3</sup> /kgSV]	0.2-0.3
Contenuto di metano [%CH <sub>4</sub> ]	50-60
Riduzione della sostanza volatile [%]	50-70

#### Desolfurazione biologica all'interno del digestore

L'ossidazione biologica è uno dei metodi più usati di desolforazione, basato sull'iniezione di una piccola quantità di aria (2-8%) nel biogas grezzo. In questo modo, il solfuro di idrogeno è biologicamente ossidato a zolfo libero solido o acido solforoso liquido ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ):



In pratica, il precipitato di zolfo prodotto viene raccolto e aggiunto ai serbatoi di stoccaggio in cui è mescolato con il digestato, al fine di migliorare le proprietà fertilizzanti del digestato.

### 3.4.2 Dimensionamento

Per dimensionare il bioreattore si può seguire lo schema proposto da Checchi, Pavan nel manuale: "Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi".

#### 1° fase – Determinazione dei flussi di massa in ingresso

Nelle ipotesi di dimensionamento è noto il bacino di utenza da servire. Si stima allora, sulla base dei dati a disposizione relativi allo stato della produzione rifiuti della zona, una produzione giornaliere di residui solidi organici misurati in [kg/giorno] inviati al sistema di ricezione che raccoglie un volume di 2/3 giorni. Utilizzando il peso specifico [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] dei residui organici, e moltiplicando questo valore al peso dei rifiuti giornali in ingresso, si può trovare il volume [ $\text{m}^3$ ] giornaliero di substrato da raccogliere e di conseguenza il volume dell'area di ricezione.

Successivamente è effettuata la vagliatura per rimuovere impurità come plastica, metalli, sassi e materiale non organico. Secondo letteratura si considera una rimozione del 10% del volume in ingresso e successivamente una triturazione per ottenere particelle con diametro inferiore ai 50mm (TERUGGI, 2010).

A seconda del tipo di raccolta, si avranno differenti caratteristiche in termini di solidi totali e volatili. Il flusso in ingresso, che definisce il carico organico complessivo da inviare giornalmente al digestore, in termini di ST e SV, può essere calcolato nel seguente modo:

$$\text{Frazione organica giornaliera} \left[ \frac{kg}{giorno} \right] \times \%ST = \frac{kgST}{giorno}$$

$$\frac{kgST}{giorno} \times \% \frac{SV}{ST} = kg \frac{SV}{giorno}$$

### 2° fase – determinazione del carico organico e calcolo del volume utile

Considerando i dati a disposizione che saranno presentati nell'analisi dei risultati, si sceglie un carico organico ottimale da applicare al digestore, in base agli intervalli utili di carico ed HRT per ciascun processo riportati in letteratura. A questo punto, noto il carico che si vuole applicare ed il flusso di massa in SV in ingresso, il volume del digestore sarà dato da:

$$\frac{kgSV}{giorno} / OLR \left[ \frac{kgSV}{m^3 giorno} \right] = V [m^3]$$

### 3° fase – verifica delle condizioni operative

Il volume determinato, anche se corretto in linea di principio, può non soddisfare le condizioni di mantenimento dell'HRT ai valori desiderati. Per condurre questa verifica è necessario conoscere la portata di substrato da alimentare, da calcolare tenendo conto di eventuali diluizioni. Noto quindi il peso specifico  $[kg/m^3]$ , avremo:

$$\text{Frazione organica diluita} \left[ \frac{kg}{giorno} \right] / \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = [m^3 \text{ di frazione organica/giorno}]$$

E l'HRT quindi si trova con:

$$\text{Volume digestore} [m^3] / [m^3 \text{ di frazione organica/giorno}] = HRT [\text{giorni}]$$

Spesso, seguendo questa logica, l'HRT che si viene ad applicare risulta non conforme all'HRT selezionato per il processo. E' opportuno allora ripetere il calcolo diminuendo il carico, fino ad arrivare ad un compromesso ottimale. La riduzione del carico organico rappresenta sempre un fattore di sicurezza aggiuntivo rispetto ad

eventuali situazioni di sovraccarico, in quanto il sistema può lavorare in condizioni meno stressanti. Per il calcolo del volume utile del digestore occorre considerare un coefficiente di sicurezza rappresentativo della flessibilità desiderata per l'impianto, generalmente compreso tra 1.1 e 1.3 (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005). Si specifica dunque che il 75% del volume del digestore è adibito a vasca di digestione, mentre il restante 25% funge da cupola gasometrica e si ottiene così il volume totale del bioreattore da dimensionare (BRUNETTI, 2013). Si considera un reattore di pianta circolare con una altezza di 2 metri.

#### 4° fase – Considerazioni energetiche:

La produzione di biogas giornaliera può essere calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$SGP \left[ \frac{m^3 \text{biogas}}{kgTVS} \right] \times \left[ \frac{kgTVS}{giorno} \right] = \frac{m^3 \text{biogas}}{giorno}$$

Moltiplicando la quantità di biogas prodotta per la percentuale di metano presente nel gas si ottiene la produzione giornaliera di metano:

$$\frac{m^3 \text{biogas}}{giorno} \times \%CH_4 = \frac{m^3 CH_4}{giorno}$$

Considerando il potere calorifico inferiore del metano, ricordando che il potere calorifico inferiore è il potere calorifico superiore diminuito del calore di condensazione del vapore d'acqua formatosi durante la combustione (il vapore d'acqua non viene condensato nei processi di combustione in caldaia e quindi è al potere inferiore che si fa normalmente riferimento nella termotecnica) (GALBIATI, 2005), si ottiene la potenzialità energetica giornaliera:

$$\frac{m^3 CH_4}{giorno} \times \frac{kcal}{m^3 CH_4} = \frac{kcal}{giorno}$$

La spesa energetica per riscaldamento consta di due voci:

- il riscaldamento del rifiuto in ingresso
- le perdite di calore del digestore

Parte del biogas prodotto viene utilizzato per gli autoconsumi dell'impianto, mentre la restante parte può essere utilizzata per la produzione di energia da cedere all'esterno. In particolare, per quanto riguarda gli usi interni, una parte (dal 15 al 25% dell'energia prodotta), può essere utilizzata per il riscaldamento dei digestori ed, eventualmente, per coprire il fabbisogno di energia elettrica dell'impianto (cogenerazione di calore ed elettricità). L'utilizzo del biogas per il riscaldamento è variabile in funzione della stagione e del momento nella giornata; il riscaldamento del substrato è in genere attivo solamente quando è in corso il caricamento del digestore.

Una volta ottenuta la quantità energetica giornaliera producibile dal biogas, si può ottenere la quantità di energia elettrica producibile con un motore di cogenerazione che converte il 30-35% in energia elettrica e il restante in energia termica utilizzabile per riscaldare il substrato in entrata e mantenere il biodigestore alla temperatura di funzionamento.

#### 5° fase – bilancio di massa:

Conoscendo la quantità di substrato in ingresso e di biogas prodotto, con un bilancio di massa per il reattore, nel quale il termine di accumulo è nullo per l'ipotesi di regime pseudo stazionario, si può stimare la quantità di substrato in uscita al biodigestore.

$$A = 0 = E - U = m_{in} - m \text{ biogas } OUT - m \text{ dig } OUT$$

Dove:

- $A = 0$  = l'accumulo è uguale a 0;
- $E - U = 0$  = cioè che entra (Entrante) è uguale a ciò che esce (Uscente);
- $m_{in}$  = massa substrato entrante;
- $m \text{ biogas } OUT$  = massa biogas uscente;
- $m \text{ dig } OUT$  = massa digestato uscente.





**Figura 3.0 – schema di bilancio di massa.**

6° fase – calcolo costo di investimento, di esercizio e ritorno:

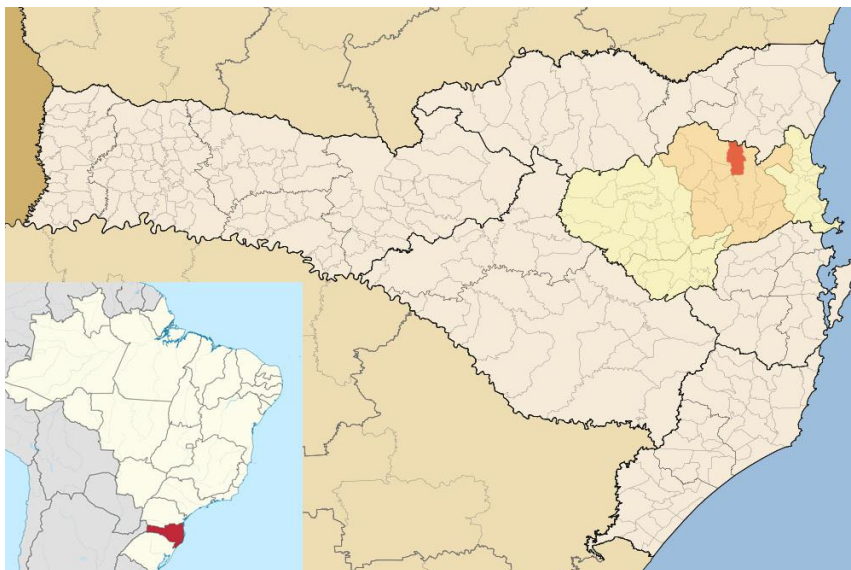
Per calcolare il costo di investimento si utilizza il metodo proposto da (REICHHALTER, BOZZO, *et al.*, 2011) che suddivide l’analisi in:

- i costi di investimento;
- i costi e le entrate in fase di esercizio.

Il valore è calcolato in Euro e convertito in Reais per dare un’idea di quale potrebbe essere la spesa di installazione di un bioreattore con tecnologia europea in Brasile. Dopo aver ottenuto una stima dei costi, si calcola il tempo di ritorno dell’investimento e se il progetto di installazione del biodigestore in Pomerode è realizzabile o no. Nonostante il progetto sia effettuato in Brasile, tutte le valutazioni sono fatte in Euro, non avendo una letteratura brasiliana appropriata sui costi specifici in Reais di costruzione, gestione e vendita in rete dell’energia prodotta.

### **3.5 Pomerode**

La città di Pomerode si trova nello stato di Santa Catarina in Brasile, figura 3.1. Si trova precisamente nella Mesoregione della Vale do Itajaí (giallo) e nella Microregione di Blumenau (arancione), con coordinate: Latitudine 26° 44’ 27’’ Sud, Longitudine 49° 10’ 33’’ Ovest, occupando una superficie di 215 km<sup>2</sup>.



**Figura 3.1 – Localizzazione geografica di Pomerode ( rosso ), nella mesoregione della Vale do Itajaí ( giallo ) e nella microregione di Blumenau ( arancione ). Fonte: Wikipedia.**

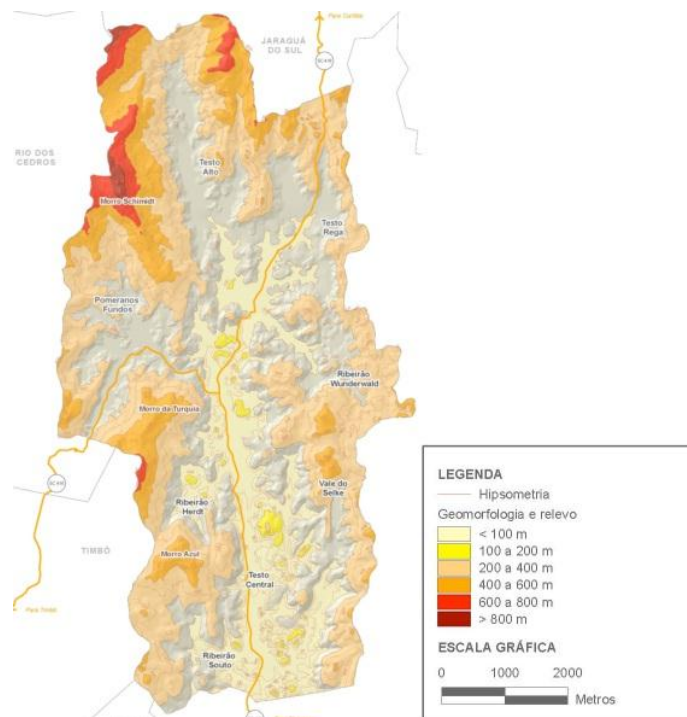
Dista circa 154 km dalla capitale catarinense, Florianópolis e confina a ovest con la città di Rio dos Cedros e Timbó, a est con Blumenau, a nord con Jaraguá e a sud con Indaial e ancora Blumenau (IBGE, 2010).

La città è stata fondata da coloni tedeschi che nel 1861 si sono insediati nella Valle do Itajaí per le buone caratteristiche del territorio che permise di sviluppare una buona agricoltura. Pomerode si distacca da Blumenau nel 1959 diventando città autonoma. È considerata la città più europea del Brasile per la forte cultura tedesca ancora presente tra i costumi della popolazione; molti parlano lingua o dialetti tedeschi e la gastronomia, musiche e folclore ricordano quello teutoniche. Per questi motivi socio-culturali simil europei, è stata scelta Pomerode come campione per effettuare un confronto con i comuni bergamaschi precedentemente elencati.

### 3.5.1 Fattori territoriali

#### a) Caratteristiche morfologiche del territorio

Altitudine: il territorio di Pomerode si estende per 215 Km<sup>2</sup>, con una altitudine di 85 m.s.l.m. e si inserisce nella unità geomorfologica della Serra do Tabuleiro/Itajaí che corrisponde a circa il 17% del territorio catarinense ( figura 3.2 ).



**Figura 3.2 – mapa geomorfológica Pomerode (SAMAE, 2014).**

Consiste em uma sequência de colinas dispostas a forma subparalela, com orientação predominante nordest-sudoeste, gradualmente mais baixa em direção do litoral e mais alta em direção oposta, alcançando altitudes de cerca 900 metros, como o Morro do Schimt que mede 931 metros (SAMAE, 2014).

Uso do solo: na maior parte dos casos, os terrenos de Pomerode não são adequados para uso agrícola, pois são terrenos com a maior declividade da região e em áreas fortemente onduladas. Têm um baixo nível de fertilidade devido ao efeito de erosão da água que corre pela declividade natural do território.

As áreas onde se concentram principalmente as atividades agrícolas são próximas a corpos hídricos como a área urbana que ocupa cerca 35% do território, 76,5 km<sup>2</sup>, localizada principalmente ao longo do rio do Testo (SAMAE, 2014).

Clima: segundo a classificação de Köppen, adaptada do Brasil, o clima da região da Vale do Itajaí é denominado Cfa, ou seja, mesotérmico úmido que identifica um clima subtropical ou temperado, sempre úmido com estações quentes. A precipitação média é bem distribuída durante o ano com valores regulares. A temperatura média é em torno de 20°C diminuindo para 14°C-16°C no inverno e 24°C-26°C no verão (tabela 3.1).

**Tabella 3.7 – Parametri climatici annuali di Pomerode (SAMAE, 2014).**

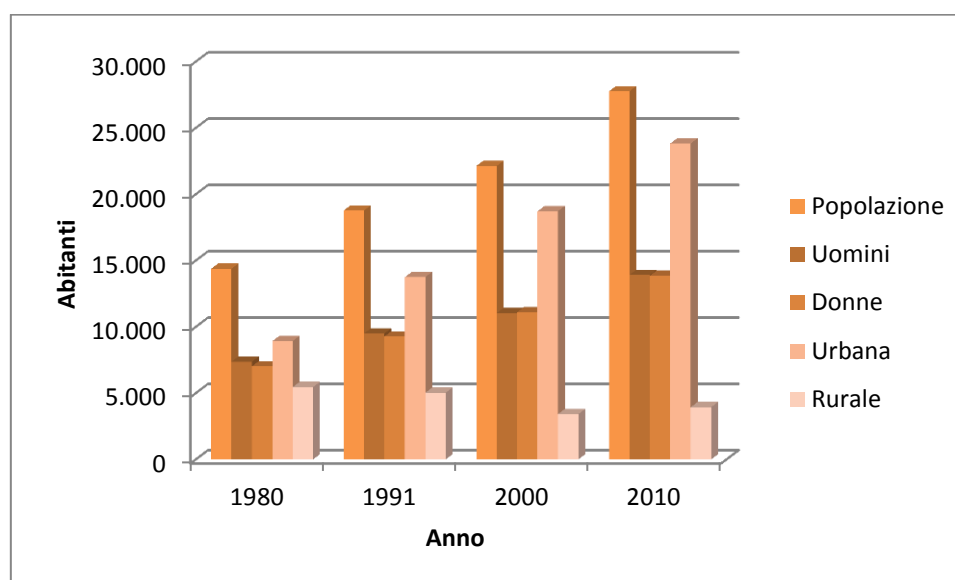
	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	MEDIA/ ANNO
<b>T media (°C)</b>	24,5	24,4	23,1	21,4	18,2	16,2	15,6	16,5	17,8	19,5	21,6	23,5	20,2
<b>Mm/mes</b>	191,9	182,5	133,9	102,9	93,8	108,2	63,4	97,4	122,4	127,1	106,0	126,6	1456,6

b) Caratteristiche urbanistiche

Popolazione: l'ultimo censo demografico effettuato nel 2010 dall'IBGE (Istituto Brasileiro de Geografia e Estatística) identifica una popolazione di 27.759 persone con un aumento del 24,45% rispetto all'ultimo censo del 2000. Pomerode ha una densità demografica di 128,6 ab/km<sup>2</sup>. La popolazione è suddivisa per l'85% situato in area urbana (23823 persone) e il 15% in area rurale (3936 persone), in tabella 3.2 sono riassunti i dati indicati partendo dal censimento effettuato nel 1980 (IBGE, 2010).

**Tabella 3.8 p opolazione pomerode (IBGE, 2010).**

Anno	Popolazione	Genere		Località	
		Uomini	Donne	Urbana	Rurale
1980	14.377	7.361	7.016	8.922	5.455
1991	18.771	9.500	9.271	13.747	5.024
2000	22.127	11.030	11.097	18.713	3.414
2010	27.759	13.904	13.855	23.823	3.936



**Figura 3.3 – Andamento grafico della popolazione in Pomerode.**

### 3.5.2 Fattori socio-economici

#### a) ISU:

l'indice di sviluppo umano è un indice macroeconomico che indica quale è la qualità di vita di un certo paese. È utilizzato dall'Organizzazione delle Nazioni Unite affiancato al PIL per confrontare quale è lo sviluppo di una nazione membro. Per calcolare questo indicatore si utilizza una formula che tiene conto dell'aspettativa di vita alla nascita di una popolazione, l'accesso alla conoscenza che è misurata dagli anni medi di istruzione e dagli anni previsti di istruzione e dal reddito nazionale lordo (ROTA, 2010). Nel 2010 il ISU di Pomerode era di 0,780, constatando un aumento rispetto ai valori precedenti che erano di 0,708 nel 2000 e di 0,55 nel 1991 (ATLAS, 2013).

#### b) PIL:

il PIL di Pomerode calcolato nel 2012 è di 1.206.498 R\$ (499.047,81 Euro al cambio R\$/EU del 02/01/2012 (UOL, 2015)). Il settore industriale contribuisce per il 56,91% con 686.628 R\$, lo 0,62% è dovuto all'agricolo con 7.472 R\$ e il settore terziario contribuisce con 512.398 R\$ che è il restante 42,47% (figura 3.4). Il PIL pro capite è di 42.170,49 R\$ (17.443,12 Euro al cambio di 2,4176 R\$/EU del 02/02/2012 (UOL, 2015)) (SUFRAMA, 2012).

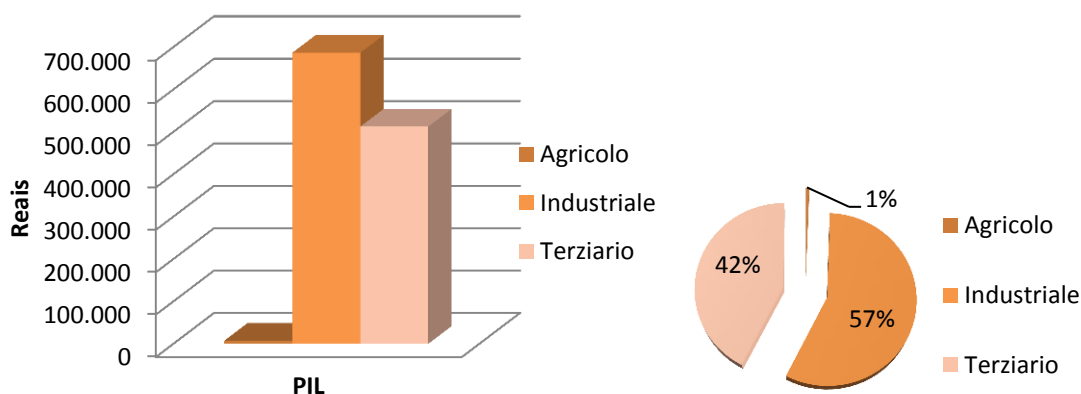


Figura 3.4 – Distribuzione del PIL in Pomerode (SUFRAMA, 2012).

### 3.5.3 Fattori di logistici della raccolta da parte delle amministrazioni

#### a) Tipologia di raccolta:

La città di Pomerode effettua una raccolta selettiva e una raccolta convenzionale dei rifiuti. La separazione è fatta nel locale di generazione ed è effettuata per la popolazione stessa. I residui vengono divisi in riciclabili e non riciclabili.

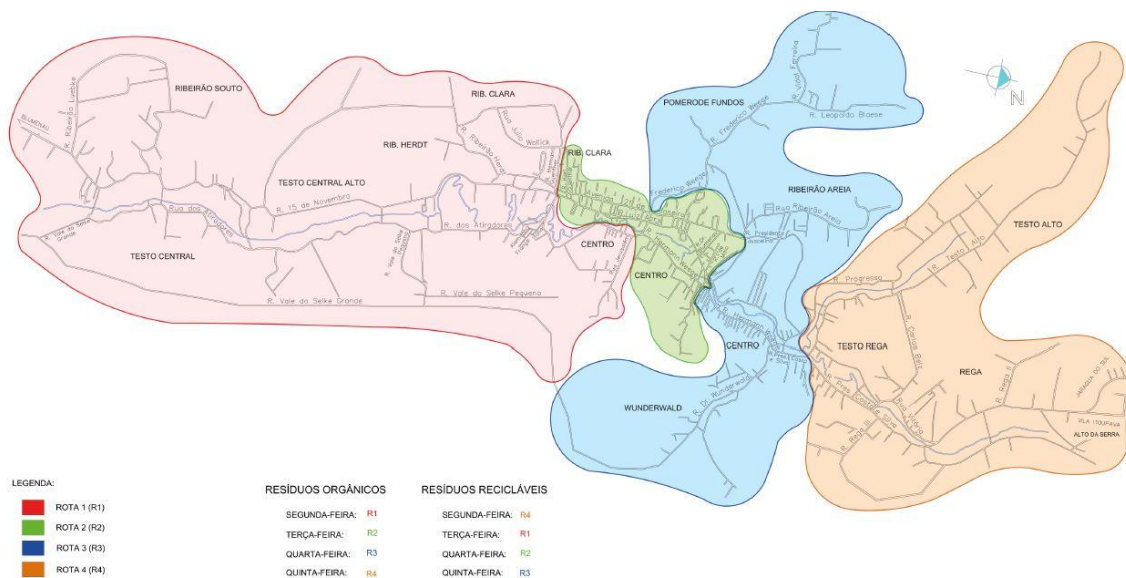
I residui riciclabili sono raccolti con la raccolta selettiva e indirizzati verso la centrale di separazione. Questi sono raccolti in sacchi di plastica forniti per la Serviço Autônomo Municipal e Esgoto (SAMAE) che è anche responsabile per lo smistamento, il riutilizzo successivo e il destino finale di questi rifiuti.

I residui organici sono raccolti per la raccolta convenzionale e inviati alla discarica di Timbó, la SAMAE è responsabile per la raccolta e il trasporto fino alla destinazione finale.

Queste due tipologie di raccolta sono fatte con il metodo porta a porta dove i cittadini posizionano i residui organici in appositi contenitori al di fuori delle proprie abitazioni. La raccolta selettiva è effettuata una volta per settimana in tutti i quartieri della città, mentre la convenzionale ( che ritira solamente i rifiuti organici ) è effettuata una volta per settimana in tutti i quartieri ad eccezione del centro dove il servizio raccoglie i residui due volte a settimana (SAMAE, 2014).

L'amministrazione di Pomerode utilizza per la raccolta selettiva due camion di tipo basculante; mentre per la raccolta convenzionale dell'organico utilizzano due camion del tipo compattatori.

La raccolta dei rifiuti è divisa per quartieri, ogni giorno vengono raccolti da un quartiere diverso i residui riciclabili e quelli organici, in modo da facilitare la logistica di trasporto e permettere un accumulo familiare settimanale dei residui nelle abitazioni, in modo da non utilizzare camion a vuoto e sprecare risorse e soldi. In figura 3.5 (Appendice I) è mostrata la divisione in quartieri e la divisione giornaliera dei due tipi di raccolta.



**Figura 3.5 – mappa di Pomerode dei due tipi di raccolta (SAMAE, 2014).**

### 3.5.4 Quantità residui prodotti

La generazione di residui solidi riciclabili e organici in Pomerode è riassunta in tabella 3.8. Essendo nuova questa forma di raccolta di rifiuti, non è stato possibile raccogliere uno storico di molti anni come per i comuni italiani ma gli unici dati raccolti dalla SAMAE sono da giugno 2013 fino a dicembre 2014.

**Tabella 3.9 – produzione di residui organici, riciclabili e resti dallo smistamento (SAMAE, 2014).**

<b>Mese/anno</b>	<b>Riciclabile (kg)</b>	<b>Organico (kg)</b>	<b>Resti da raccolta selettiva (kg)</b>
Giugno/2013	1183.111,70	204.480,00	40.000,00
Luglio/2013	94.262,32	240.320,00	52.459,00
Agosto/2013	55.760,10	228.570,00	52.660,00
Settembre/2013	81.137,50	230.270,00	45.120,00
Ottobre/2013	70.847,50	247.150,00	53.910,00
Novembre/2013	85.804,00	208.290,00	65.610,00
Dicembre/2013	71.578,60	231.050,00	40.130,00
Gennaio/2014	84.524,00	253.250,00	73.150,00
Febbraio/2014	62.250,00	212.300,00	36.050,00
Marzo/2014	99.878,50	250.790,00	40.970,00
Aprile/2014	44.654,00	260.000,00	25.900,00
Maggio/2014	48.988,00	252.920,00	29.200,00
Giugno/2014	43.997,00	248.480,00	35.480,00
Luglio/2014	50.945,00	254.040,00	51.130,00
Agosto/2014	46.193,00	249.270,00	16.960,00
Settembre/2014	53.936,00	251.900,00	36.630,00
Ottobre/2014	68.222,00	245.110,00	65.680,00
Novembre/2014	56.207,00	218.840,00	45.370,00
Dicembre/2014	57.049,00	256.180,00	49.480,00
Media mensile	66.281,33 kg/mese	239.116,32 kg/mese	45.046,79 kg/mese

Come spiegato nel capitolo precedente, nella città brasiliana sono effettuate due tipi di raccolta, quella selettiva e quella convenzionale. Nella selettiva sono raccolti i rifiuti riciclabili e raccolti poi nella centrale di selezione dove vengono divisi in rifiuti da caratteristiche simili. Tutti i residui che non possono essere riciclati sono inviati alla discarica di Timbò dove sono già raccolti i residui organici.

Per calcolare la produzione pro capite giornaliera è sufficiente dividere la quantità di rifiuti prodotta giornalmente per il numero di abitanti della città, nel nostro caso il dato ottenuto dal Censo IBGE (2010) che conta una popolazione di 27.759 abitanti. Si ottiene così una generazione di residui pro capite di 0,432 kg/ab/giorno.



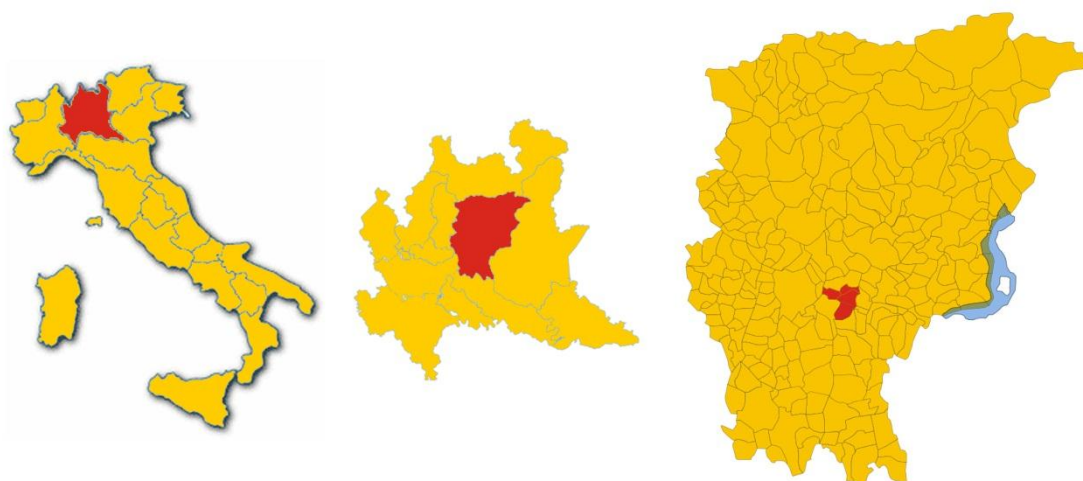
### 3.6 Comuni Italiani

Per confrontare il sistema di raccolta effettuato in Pomerode, si utilizza come riferimento un agglomerato di 4 comuni della provincia di Bergamo che hanno in totale quasi lo stesso numero di abitanti. Si considerano i comuni di:

- Albano Sant’Alessandro;
- Brusaporto;
- Pedrengo;
- Torre de’ Roveri.

Verranno analizzati gli stessi indicatori illustrati per la città brasiliana anche per i quattro comuni italiani in modo da poter fare una comparazione tra i due. Sono stati scelti questi quattro comuni bergamaschi perché sono territorialmente confinanti, hanno quindi le stesse caratteristiche climatiche e geomorfologiche e soprattutto hanno uno stesso sistema di raccolta di rifiuti effettuato da un’azienda terziaria, la Servizi Comunali S.p.A.

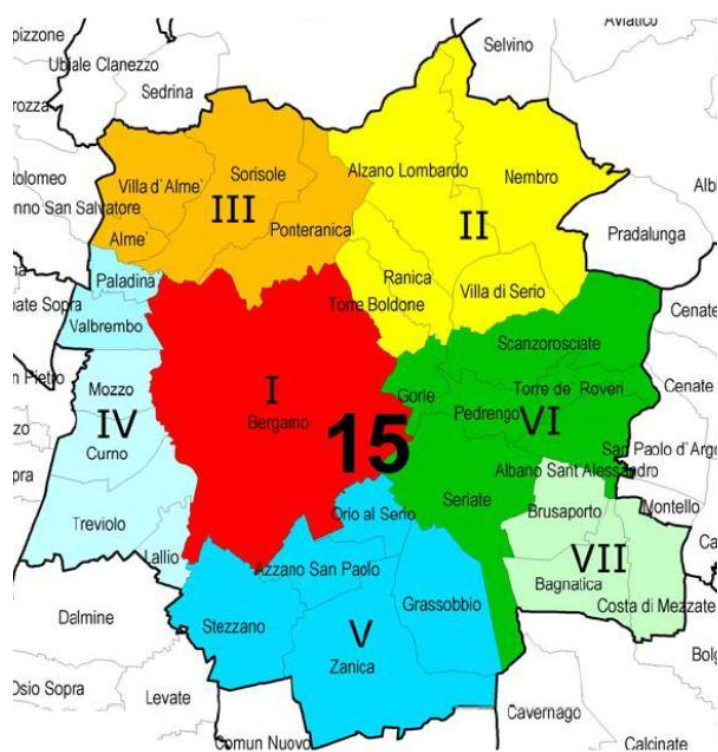
Sono localizzati nell’area est della provincia di Bergamo facenti parte della regione Lombardia, situata nel nord Italia; la localizzazione geografica è rappresentata in figura 3.6.



**Figura 3.6 – mappa dell’Italia con la localizzazione della Lombardia, successivamente della Provincia di Bergamo e in ultimo l’unione di Albano Sant’Alessandro, Brusaporto, Pedrengo e Torre de’ Roveri.**

I quattro comuni fanno parte dell'hinterland bergamasco classificato come area 15 della Provincia di Bergamo, e cioè è l'area che comprende quei comuni che stanno nella prima cerchia limitrofa al capoluogo di provincia. Questa area è suddivisa in altre sub-aree con caratteristiche comuni, figura 3.7.

I Comuni di Albano Sant'Alessandro, Pedrengo e Torre de' Roveri sono nella sub-area VI mentre Brusaporto è l'unico nella sub-area VII. Queste suddivisioni sono solo a scopo geografico e amministrativo per inquadrare i comuni con simili caratteristiche morfologiche e di attività produttive.



**Figura 3.7 – suddivisione delle sub-aree della provincia di Bergamo, in figura l'area 15 che è l'hinterland bergamasco (CUCCHI e DE LUCA, 2009).**

### 3.6.1 Fattori territoriali

#### a) Caratteristiche morfologiche del territorio:

I quattro comuni sono caratterizzati da una morfologia prettamente pianeggiante con eccezione di Torre de' Roveri che presenta rilievi collinari confinanti con i Comuni di Cenate Sopra e Scanzorosciate. Le coordinate inquadrano i comuni nell'area est

dell'hinterland di Bergamo area 15 della Provincia, considerata sub-area VI, le caratteristiche territoriali sono riassunte in tabella 3.9.

Albano Sant'Alessandro: con una superficie di 5,35 km<sup>2</sup> è il comune più esteso dei quattro considerati, ma con un'altitudine media di 243 m.s.l.m è il più basso. Ha una morfologia pedecollinare e pianeggiante dove si sviluppano maggiormente le attività produttive e l'area residenziale. Il 21,77% del territorio è area residenziale, il 15,99% industriale e il restante è diviso per il 13,33% come area prettamente agricola e il 48,91% area verde boschiva. È inquadrata nella sub-area VI dell'area 15 della Provincia di Bergamo (RONCAGLIA, 2011).

Brusaporto: occupa una superficie di 4,99 km<sup>2</sup> e un'altitudine media di 255 m.s.l.m. Ha una caratteristica per l'80% pianeggiante e il restante 20% pedecollinare/collinare. Di questo 80% il 41,06% del suolo è agricolo, 32,79% residenziale e 6,15% industriale. È l'unico dei quattro comuni che è inquadrato nella sub-area VII dell'area 15 della Provincia di Bergamo (TOSETTI, 2010).

Pedrengo: ha una superficie di 3,6 km<sup>2</sup> e un'altitudine media di 262 m.s.l.m. Il suolo è prettamente pianeggiante ed è l'unico dei quattro lambito dal fiume Serio. Ha una divisione equilibrata tra area urbanizzata e area verde considerando un 37,4% del territorio come residenziale, il 18,3% industriale e il restante 44,3% area agricola e verde comune come parchi o aree non utilizzate. È inquadrato nella sub-area VI dell'area 15 della Provincia di Bergamo (SIMONETTI, 2009).

Torre de' Roveri: è il più piccolo dei quattro comuni con una superficie di 2,69 km<sup>2</sup> e un'altitudine media di 271 m.s.l.m. La sua morfologia è pedecollinare/collinare con circa l'82,1% del suo territorio occupato da vigneti che ricoprono le colline del territorio roverese; il restante 17,9% è suddiviso in residenziale 15,4% e industriale 2,5%. È inquadrato nella sub-area VI dell'area 15 delle Provincia di Bergamo (CUCCHI e DE LUCA, 2009).

**Tabella 3.10 – caratteristiche dei comuni italiani.**

	<b>Albano Sant’Alessandro</b>	<b>Brusaporto</b>	<b>Pederngo</b>	<b>Torre de’ Roveri</b>	
<b>Superficie [km<sup>2</sup>]</b>	5,35	4,99	3,6	2,69	
<b>Altitudine [m.s.l.m]</b>	243	255	262	271	
<b>Coordinate</b>	45° 41’ 09’’ N 9° 46’ 04’’ E	45° 40’ 00’’ N 9° 46’ 00’’ E	45° 41’ 54’’ N 9° 44’ 02’’ E	45° 42’ 00’’ N 9° 46’ 20’’ E	
<b>Caratteristica suolo</b>	Pedecollinare Pianeggiante	Pianeggiante	Pianeggiante	Collinare	
<b>Uso del suolo</b>	<b>Residenziale/ Commerciale</b>	21,77%	32,79%	37,4%	15,4%
	<b>Industriale</b>	15,99%	6,15%	18,3%	2,5%
	<b>Agricolo/Area verde</b>	62,24%	61,06%	44,3%	82,1%

Clima: il clima dei quattro comuni è uguale ed è uniforme al clima della fascia pedemontana della Provincia di Bergamo. Per la classificazione di Köppen, adattata dallo Stato Italiano, è considerato di classe Cfa, temperato ad estate calda con due massimi pluviometrici, uno in primavera e uno in autunno e un minimo di temperatura normalmente in Gennaio e un massimo in Luglio e Agosto. In tabella 3.5 sono riassunte le temperature medie (massime e minime) misurate in gradi Celsius (C°) e il livello pluviometrico (mm/mes) registrato nel trentennio dal 1969 al 2000 dall’Aeronautica Militare e ancora oggi considerati come dati di riferimento. Essendo i comuni nella stessa area geografica, hanno tutti e quattro le stesse tipologie di clima e precipitazioni.

**Tabella 3.11 – Temperature medie (massime e minime) e precipitazioni medie mensili dei quattro comuni (ILMETEO, 2015).**

	<b>GEN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAG</b>	<b>GIU</b>	<b>LUG</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OTT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>MEDIA/ ANNO</b>
<b>T min (°C)</b>	-2	0	3	7	11	14	17	17	14	9	4	-1	7,75
<b>T max (°C)</b>	6	8	12	16	21	25	28	27	23	18	11	6	16,75
<b>Mm/mese</b>	71	64	83	89	127	113	110	129	94	109	111	56	96,33

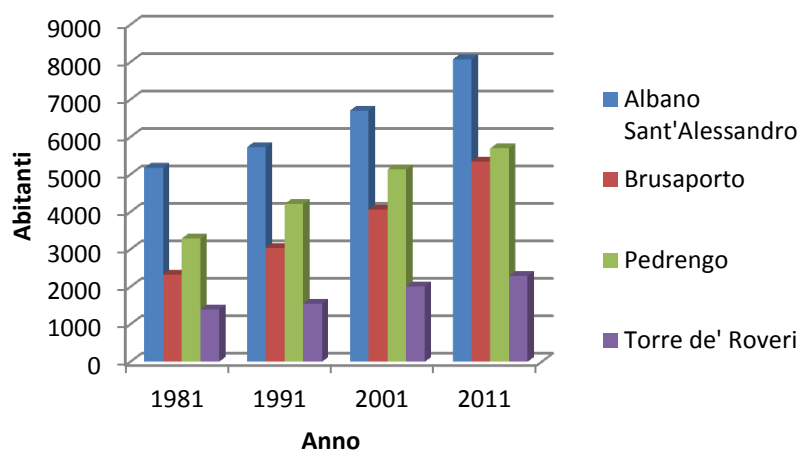
b) Caratteristiche urbanistiche:

Popolazione: la popolazione della Provincia di Bergamo ha visto un netto aumento dopo la seconda guerra mondiale dove si cercavano terreni adatti per coltivazioni e per installare nuove industrie per dislocarle dal centro città. Negli ultimi

30 anni si è visto un tasso di crescita costante portando quasi a raddoppiare il numero di cittadini nei comuni. In tabella 3.12 sono riassunti i dati relativi alle popolazioni degli anni 1981,1991,2001,2011; anni in cui sono stati fatti gli ultimi censimenti Istat. Si è poi suddiviso la popolazione per sesso. Non si è potuto dividere per zona rurale/urbana come nel caso di Pomerode perché il dato non è rilevante per i comuni essendo la frazione agricola la meno incisiva sul territorio. Tutti i dati sono stati rilevati dal sito dell'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) nel settore di Istituto Superiore di Sanità.

**Tabella 3.12 – andamento popolazione e divisione per sesso dei quattro comuni selezionati**  
(ISTAT, 2011)

Anno	Albano Sant'Alessandro			Brusaporto			Pedrengo			Torre de' Roveri		
	Popolazione	Genere		Popolazione	Genere		Popolazione	Genere		Popolazione	Genere	
		Uomini	Donne		Uomini	Donne		Uomini	Donne		Uomini	Donne
1981	5178	2534	2644	2329	1155	1174	3291	1655	1636	1390	672	688
1991	5732	2822	2910	3043	1521	1522	4210	2114	2096	1556	764	792
2001	6706	3317	3389	4063	2030	2033	5131	2609	2522	2007	997	1010
2011	8075	4027	3972	5349	2670	2679	5696	2865	2831	2291	1158	1133
<b>Densità</b>	1514,58 ab/km <sup>2</sup>			1074,95 ab/km <sup>2</sup>			1604,72 ab/km <sup>2</sup>			864,68 ab/km <sup>2</sup>		



**Figura 3.8 – andamento popolazione dei quattro comuni negli anni dei censimenti ISTAT**

### 3.6.2 Fattori socio-economici

a) ISU:

L'indice di sviluppo umano tiene in considerazione dell'aspettativa di vita alla nascita, del livello di educazione e del prodotto interno lordo per capita. I quattro comuni in Provincia di Bergamo hanno le stesse caratteristiche e quindi possono essere classificati con lo stesso ISU. Secondo la classificazione dell'ONU, l'Italia ha un ISU di 0,872 (UN, 2014).

b) PIL:

La tipologia di economia è simile tra i quattro, con un reddito pro capite un poco maggiore per il comune di Torre de' Roveri. Secondo il giornale *IlSole24Ore* il reddito pro capite misurato nel 2007, dei cittadini di Albano Sant'Alessandro è di 18531 €/anno, Brusaporto di 19291 €/anno, Pedrengo 18741 €/anno e Torre de' Roveri di 20044 €/anno.

### 3.6.3 Fattori logistici della raccolta da parte delle amministrazioni

a) Tipologia di raccolta:

Le amministrazioni comunali dei municipi in analisi, si affidano a un'azienda terziaria per effettuare la raccolta dei rifiuti domestici. La società è la Servizi Comunali S.p.A dove ogni comune è un socio di minoranza della società e dunque partecipa alle decisioni amministrative e di bilancio. La tipologia di raccolta è uguale per tutti e quattro ed è classificata come una tipologia di raccolta differenziata porta a porta.

- Raccolta porta a porta:

I cittadini devono dividere nelle proprie abitazioni i rifiuti prodotti in sei grandi categorie: vetro, metallo, plastica, carta, frazione umida e frazione secca. Ogni residuo è dunque raccolto secondo la sua composizione.

- Vetro e Metallo: nella categoria vetro e metallo sono raccolti tutti i residui prodotti in casa di materiale vitreo e metallico come: bottiglie di tutti i colori e dimensioni, lattine alluminio, scatolette, bottiglie, bicchieri e frammenti vari, barattoli, specchi.
- Plastica: la plastica prevede la selezione di bottiglie di acqua, contenitori per liquidi, vaschette per alimenti, materiale con simbolo PET, PVC, PE, imballaggi di plastica.
- Carta: la raccolta di carta e cartone comprende quotidiani e settimanali, quaderni e libri, cartoni, cartoncini, cartone pressato, sacchetti.

- Frazione umida (organico): tutti i residui organici/alimentari prodotti in casa, scarti e avanzi di cucina, pesce, fondi di caffè e gusci di uova, bustine thè, tessuti in fibre naturali, fiori.
- Frazione secca (indifferenziato): tutti i residui che non possono essere riciclati e che non fanno parte delle categorie precedentemente elencate.
- Consegna volontaria:
 

ogni municipio ha una centro di raccolta dove ogni cittadino deve portare i rifiuti che non possono essere raccolti con il sistema porta a porta. Tra questi i principali sono:

  - Ingombranti: esclusivamente rifiuti di grandi dimensioni quali divani, poltrone, materassi, mobiletti vari ecc.
  - Rifiuti Elettronici (RAEE): Televisori, frigoriferi/freezer, computer, condizionatori d'aria, schede elettroniche, radio, radiosveglie, computer, modem, stampanti (prive di toner), stereo, videoregistratori, piccoli elettrodomestici.
  - Metalli: pezzi metalli in genere di dimensioni contenute, latte e contenitori per alimenti, bombolette senza simboli di pericolo, oggetti metallici di grandi dimensioni, biciclette, scaffali e armadi metallici;
  - Legno: cassette, mobili anche rivestiti, pallet, sedie, tavoli, mobiletti., infissi, cornici e ogni altro oggetto in legno;
  - Rifiuti da giardino: l'erba, i rami, le foglie, i fiori provenienti dalla manutenzione domestica dei giardini e dei balconi;
  - Inerti: piccole quantità (max. 0,5 m<sup>3</sup> - circa 3-4 secchi) di rifiuti misti derivanti esclusivamente da piccole manutenzioni di abitazioni civili operati in ambito domestico (fai da te) quali mattoni, piastrelle, calcinacci, cartongesso (water, lavandini, derivanti da piccole manutenzioni, vanno conferiti nell'apposito cassone) . Non si possono conferire grosse quantità derivanti da ristrutturazioni di edifici . Rifiuti prodotti a seguito di arti, professioni o attività economiche non possono mai essere conferiti al Centro di raccolta differenziata.
  - Residui pericolosi: pile esauste e medicinali scaduti, oli minerali e vegetali, toner di stampanti, tubi fluorescenti;
  - Imballaggi: polistirolo in grandi dimensioni, cellophane;

- Indumenti usati: quali scarpe, borse, cinture, indumenti usati, abiti dismessi, tendaggi, accappatoi, salviette e teli spugna, coperte, lenzuola, materassi in lana (senza molle).

L'amministrazione comunale fornisce gratuitamente dei sacchi di plastica gialli per la raccolta della plastica, sacchi bianchi per la raccolta della frazione secca e dei bidoni di plastica di volume proporzionale alla metratura della casa per la raccolta dei residui organici. I cittadini devono collocare fuori dalle proprie abitazioni negli appositi giorni prestabiliti i residui indicati. La Servizi Comunali S.p.A effettua la raccolta con i suoi mezzi indirizzando poi i residui in differenti centri di riciclaggio o altre aziende che utilizzano rifiuti per il loro processo produttivo come la Montello S.p.A che ricicla la plastica e utilizza la Frazione Organica di Residui Solidi Urbani (FORSU) per generare biogas con un processo di digestione anaerobica convertito poi in energia elettrica e termica.

La raccolta è effettuata settimanalmente per i residui umidi e i residui secchi, mentre una raccolta bisettimanale per la carta, plastica, vetro e metalli. In estate la raccolta dell'organico è effettuata due volte a settimana dovuto all'aumento della produzione del rifiuto umido da parte dei cittadini visto l'incremento del consumo alimentare di prodotti organici e freschi. La raccolta è così organizzato da non permettere un eccessivo accumulo di residui nelle abitazioni dei cittadini. In tabella 3.12 è riassunto il sistema di raccolta porta a porta effettuato dalla Servizi Comunali per i quattro comuni.

**Tabella 3.13 – giorni di raccolta porta a porta nei comuni di Albano Sant'Alessandro (Alba), Brusaporto (Brusa), Pedrengo (Pedre), Torre de' Roveri (Torre).**

	Vetro+Metallo	Secco	Umido	Carta	Plastica
LUN			Torre	Torre	
MAR			Alba		
MER	Pedre	Brusa/Pedre	Brusa		
GIO			Torre		
VEN	Alba			Brusa	Alba/Pedre
SAB		Alba	Brusa/Pedre		
DOM					
LUN	Torre		Torre		Torre
MAR			Alba		
MER		Brusa/Pedre	Brusa		
GIO			Torre		
VEN	Brusa			Alba	Brusa
SAB			Brusa/Pedre		
DOM					



b) Leggi, regolamenti, costi di smaltimenti rifiuti:

Una comunità che voglia dimostrare un senso di responsabilità nei confronti dell'ambiente, deve garantire una gestione corretta dei rifiuti. Per questo è lo stesso governo che deve imporre leggi e regolamenti per un efficiente sistema di gestione.

Il principale riferimento normativo è il D.Lgs.152/2006, più conosciuto come "Norme in materia ambientale", che sancisce i criteri principali per la gestione dei rifiuti, il fatto che riutilizzo, riciclaggio e recupero debbano essere considerati preferibili rispetto allo smaltimento. Per una migliore efficienza il Decreto stabilisce una rete integrata di impianti per il trattamento complessivo dei rifiuti/residui tale da realizzare l'autosufficienza all'interno di ciascun ambito territoriale, smaltire i rifiuti nell'impianto più vicino ed utilizzare tecnologie in grado di assicurare una forte garanzia di protezione dell'ambiente.

Attualmente in Italia è in vigore la Tassa sui rifiuti (TARI), che è la tassa relativa alla gestione dei rifiuti; è stata introdotta il 27 dicembre 2013 con la legge di stabilità per il 2014 in sostituzione delle precedenti Tariffa di igiene ambientale (TIA) e Tassa per lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani (TARSU) e Tributo comunale sui rifiuti e sui servizi (TARES). Tale tributo è una componente dell'imposta unica comunale (IUC) insieme all'imposta municipale propria (IMU) e al tributo per i servizi indivisibili (TASI). Il nuovo tributo è destinato a finanziare i costi del servizio di raccolta e smaltimento dei rifiuti, a carico dell'utilizzatore.

Un utile strumento per ridurre la produzione di rifiuti all'origine è l'adozione di un sistema tariffario, ovvero cercare di far pagare l'imposta sui rifiuti in base alla reale produzione del singolo cittadino o nucleo familiare. Ciò è possibile ottenerlo tenendo conto del volume o del peso dei rifiuti prodotti, anche in base al numero di sacchi conferiti, oppure tenendo conto del numero dei componenti familiari. L'utilizzo di un sistema tariffario proporzionale alla reale produzione di rifiuti renderebbe il cittadino più attento allo spreco di materiale e potrebbe incentivare forme di riuso domestiche. Tuttavia l'adozione di misure in questo senso, specie in un'area molto densa di territori urbanizzati, richiede un accordo tra amministrazioni confinanti per evitare il fenomeno, in certi casi frequente, dell'esportazione abusiva dei rifiuti nei comuni vicini non dotati di politica tariffaria.

#### 3.6.4 Quantità di rifiuti prodotti

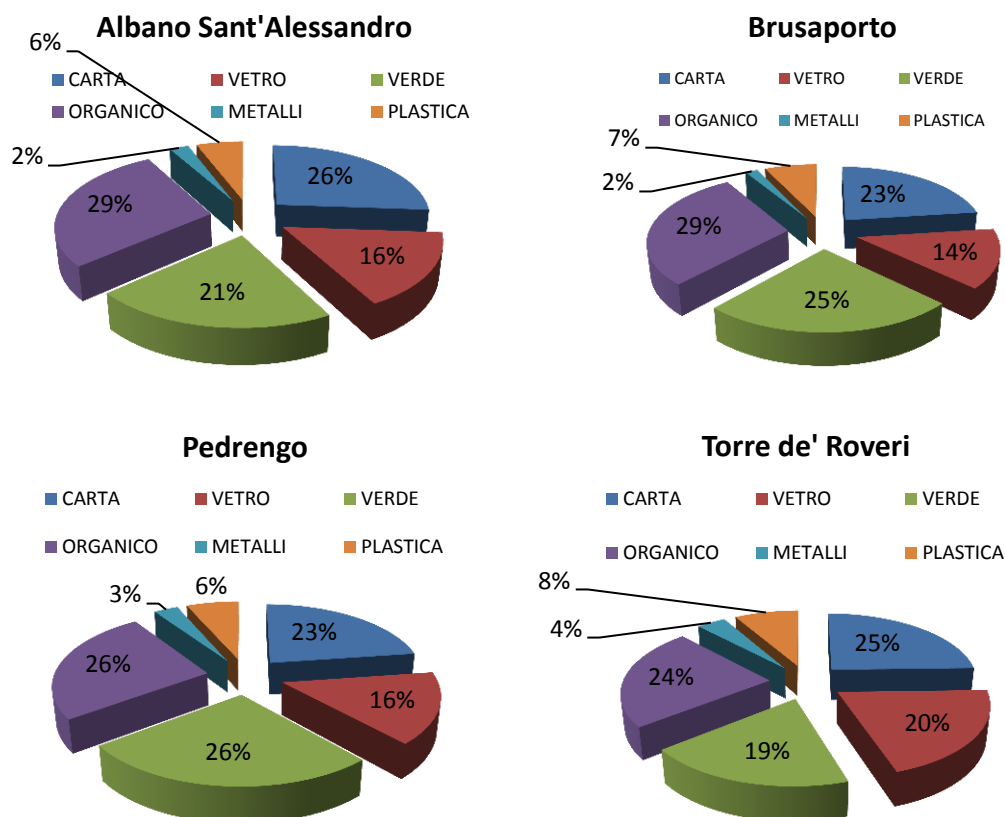
Uno storico della produzione dei rifiuti solidi urbani è raccolto dalla Provincia di Bergamo che rende disponibili i dati a tutti i cittadini sul sito della provincia nella sezione Osservatorio rifiuti interattivo. Questo permette una comparazione della produzione tra le amministrazioni e di conseguenza un confronto per trovare quale è la gestione più efficiente del problema rifiuti.

In tabella 3.13 sono riassunti solamente la somma totale di produzione dei rifiuti annuali della raccolta differenziata precedentemente spiegata dei comuni analizzati, divisi per quantità di rifiuti annuali di carta, vetro, frazione umida, metalli e plastica, degli ultimi 10 anni di cui si hanno i dati ufficiali dal 2004 al 2013. È stata aggiunta anche la frazione verde perché per l'attuale studio di caso di produzione di biogas si considereranno i residui di matrice organica. In Appendice II, III, IV, V sono le tabelle complete annuali di produzione di ogni residuo. In figura 3.9 la divisione di ogni tipologia di rifiuto nell'anno 2013 (BERGAMO, 2015).

Si utilizzano queste tipologie di rifiuti perché sono simili alla tipologia di rifiuti raccolta dalla città di Pomerode per poter poi fare una comparazione tra i due sistemi e tra le quantità prodotte dall'agglomerato urbano bergamasco e la città brasiliane analizzate.

**Tabella 3.14 – residui annuali totali di carta, vetro, verde, umido, plastica dal 2004 al 2013**  
(BERGAMO, 2015).

	<b>Albano Sant'Alessandro</b>	<b>Brusaporto</b>	<b>Pedrengo</b>	<b>Torre de' Roveri</b>
<b>Anno</b>	<b>Residui totali [kg/anno]</b>	<b>Residui totali [kg/anno]</b>	<b>Residui totali [kg/anno]</b>	<b>Residui totali [kg/anno]</b>
<b>2004</b>	1.379.800	523.120	1.601.141	423.210
<b>2005</b>	1.476.110	554.560	1.553.159	439.900
<b>2006</b>	1.510.680	558.800	1.516.035	454.330
<b>2007</b>	1.544.280	1.069.030	1.536.080	461.450
<b>2008</b>	1.740.740	1.243.220	1.560.720	503.700
<b>2009</b>	1.791.450	1.193.810	1.539.760	501.450
<b>2010</b>	1.796.620	1.205.209	1.532.720	480.840
<b>2011</b>	1.809.730	1.226.440	1.542.940	461.400
<b>2012</b>	1.824.270	1.229.365	1.536.310	492.550
<b>2013</b>	1.750.010	1.258.880	1.540.360	493.110
<b>Produzione Pro capite 2013 [kg/ab/giorno]</b>	0,584	0,631	0,711	0,578



**Figura 3.9 – percentuali di ogni tipologia di rifiuto dei quattro comuni analizzati nell'anno 2013**  
(BERGAMO, 2015).

Come si può notare dai grafici di figura 3.9, i residui organici (umido + verde) costituiscono la percentuale maggiore prodotta, e per questo la più interessante da studiare per ridurre la quantità o trovare una alternativa agli attuali metodi di smaltimento.

## 4. ANALISI DEI RISULTATI

Si analizzano i dati attuali di Pomerode e dei comuni italiani e si effettua un confronto per trovare punti di forza e punti deboli di entrambi i sistemi.

Successivamente si effettua una previsione dell'andamento popolazione di entrambi con il metodo più specifico che segue l'andamento reale degli anni passati scegliendo quello con il migliore coefficiente di correlazione ( $R^2$ ).

Conoscendo l'anno di chiusura previsto della discarica di Timbó, 2031 (AMBIENTAIS, 2012), discarica controllata dove vengono inviati i residui, si calcola una previsione futura della produzione dei rifiuti organici per un arco di tempo di 20 anni e quale è l'impatto ambientale che questi avranno, e il costo di gestione che il comune deve sostenere.

Conoscendo la quantità di residui organici prodotti si stima la quantità di biogas producibile in un reattore anaerobico e si esegue un'analisi economica-energetica del sistema installato.

### 4.1 Confronto tra le due realtà

Considerando gli indicatori presentati nel capitolo 3, si è osservato che i quattro comuni italiani hanno caratteristiche territoriali, di crescita popolazione e socio-economiche molto simili, per questo motivo si considerano i dati dei comuni di Albano Sant'Alessandro, Brusaporto, Pedrengo e Torre de' Roveri come un unico comune (ABPT) per poter effettuare comparazioni e confronti con il municipio di Pomerode (tabella 4.1).

Per effettuare una comparazione tra le due realtà di produzione di rifiuti della città brasiliana e l'insieme dei comuni italiani si utilizzano i seguenti indicatori: la superficie del territorio, la popolazione, la densità abitativa, il coefficiente ISU, il PIL, la tipologia di raccolta di rifiuti, la quantità di rifiuti totali prodotti, la produzione pro capite, la quantità solamente della produzione di residui organici, e la quantità di residui che Pomerode invia alla discarica controllata di Timbò.

**Tabella 4.1 – confronto tra Pomerode e ABPT con gli indicatori analizzati.**

<b>Indicatori</b>	<b>Pomerode</b>	<b>ABPT</b>
<b>Superficie [km<sup>2</sup>]</b>	215	16,63
<b>Popolazione [ab]</b>	27599	21411
<b>Densità [ab/km<sup>2</sup>]</b>	128,6	1287,5
<b>ISU</b>	0,708	0,872
<b>PIL [R\$ - €]</b>	42.170,49 – 17.443,12	46.343,4 – 19.151,75
<b>Tipo di raccolta rifiuti</b>	Selettiva Convenzionale	Differenziata Consegna volontaria
<b>Quantità rifiuti totali prodotti [kg/anno]</b>	4.175.923,5	5.042.360
<b>Produzione pro capite [kg/ab/anno]</b>	150,43	235,5
<b>Quantità rifiuti organici prodotti [kg/anno]</b>	2.953.080	2.564.190
<b>Rifiuti inviati in discarica [kg/anno]</b>	3.459.080	-

Guardando la superficie dei due territori, Pomerode ha una estensione nettamente superiore dovuto a un maggiore quantità di superficie non utilizzata e lasciata allo stato naturale.

La popolazione è più numerosa nella città brasiliana contando 27.599 abitanti contro i 21.411 di ABPT. Di conseguenza la densità demografica è nettamente maggiore per ABPT con 1.287,5 ab/km<sup>2</sup> contro i 128,6 ab/km<sup>2</sup> di Pomerode. Considerando però che la superficie urbana dove si concentra la popolazione in Pomerode è il 35% del territorio, circa 76,5 km<sup>2</sup>, la densità demografica cambia passando a un valore di 365 ab/km<sup>2</sup>, sempre ben distante dalla densità dei comuni Italiani.

Analizzando ora la quantità di residui totali prodotti, ci si aspetterebbe che Pomerode producesse un maggior volume di rifiuti, invece si verifica il caso contrario dove ABPT produce 5.042.360 kg/anno contro i 4.175.923,5 kg/anno. Questa differenza è giustificata dagli indicatori sociali-economici i quali verificano l'ipotesi che due popolazioni differenti producono quantità di rifiuti non solo secondo il numero di abitanti ma soprattutto per la qualità di vita, l'evoluzione tecnologica e la rendita annuale.

Guardando il dato ISU, Pomerode ha un valore di 0,708 che sta a indicare un livello di istruzione, aspettativa di vita e una rendita minore rispetto a quella di ABPT dove il valore è di 0,872 che indica quindi uno sviluppo tecnologico e sociale più

elevato e quindi un maggiore accesso a informazione e maggiore consumo di risorse. Anche il PIL di ABPT è maggiore rispetto a Pomerode, 19.151,75 €/anno contro 17.443,12 €/anno, ciò indica che gli abitanti di ABPT hanno più risorse economiche da spendere, un tenore di vita maggiore e dunque un maggior consumo. La produzione pro capite che è di 235,5 kg/ab anno per ABPT e di 150,43 kg/ab anno per Pomerode verifica una maggiore produzione per i cittadini italiani rispetto a quelli brasiliani.

Guardando invece il dato di produzione dei rifiuti organici, la città di Pomerode produce 2.953.080 kg/anno mentre ABPT 2.564.190 kg/anno. Questa differenza di tipologia di rifiuti è giustificata dai fattori territoriali-culturali che differenziano le due città. Pomerode è caratterizzata da una popolazione con ancora una divisione rurale e urbana e quindi un utilizzo di prodotti organici e di prima produzione maggiore, rispetto alla popolazione di ABPT dove non è cultura produrre e utilizzare personalmente un prodotto primario organico ma si preferisce uno confezionato da supermercato. La superficie territoriale di Pomerode è nettamente superiore e dunque è presente una maggiore quantità di verde da giardino che va ad aumentare il volume di rifiuti di matrice organici prodotti.

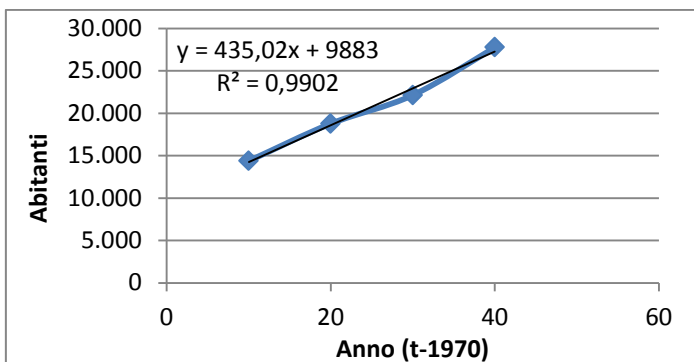
## 4.2 Previsione di crescita popolazionele

### 4.2.1 Pomerode

La popolazione di Pomerode misurata dall'ultimo censimento dell'IBGE dell'anno 2010 era di 27.759 abitanti. Per effettuare una previsione di crescita futura si sceglie il metodo di crescita demografico che si adatta maggiormente alla reale crescita vista negli anni passati. Questa scelta si effettua guardando quale metodo ha il coefficiente di correlazione migliore, in tabella 4.2 i dati di popolazione secondo IBGE per effettuare il calcolo.

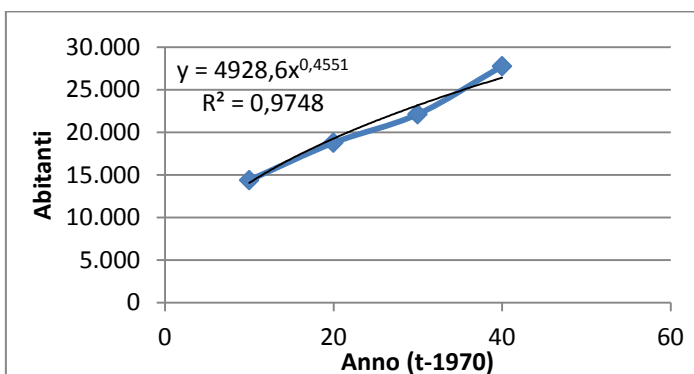
**Tabella 4.2 – dati storici della popolazione di Pomerode dove X indica la differenza di anni dall'anno 1970 preso come riferimento (IBGE, 2010).**

<b>T</b> <b>(anno)</b>	<b>X</b> <b>(t-1970)</b>	<b>Popolazione</b> <b>(ab)</b>
1980	10	14.377
1991	21	18.771
2000	30	22.127
2010	40	27.759



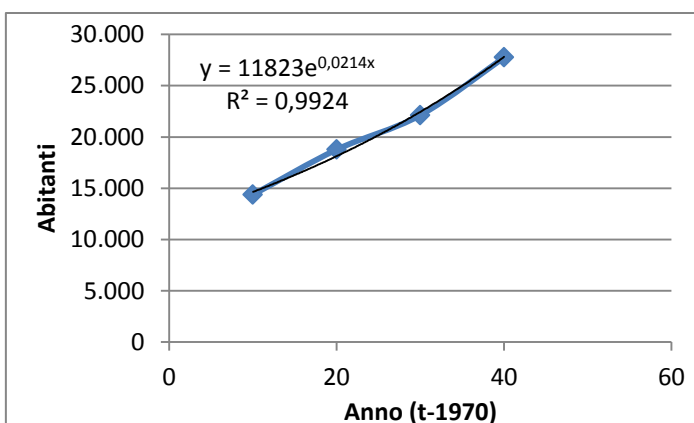
**Figura 4.1 - Metodo aggiustamento lineare:**

con questo metodo si ottiene un valore di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a 0,9902.



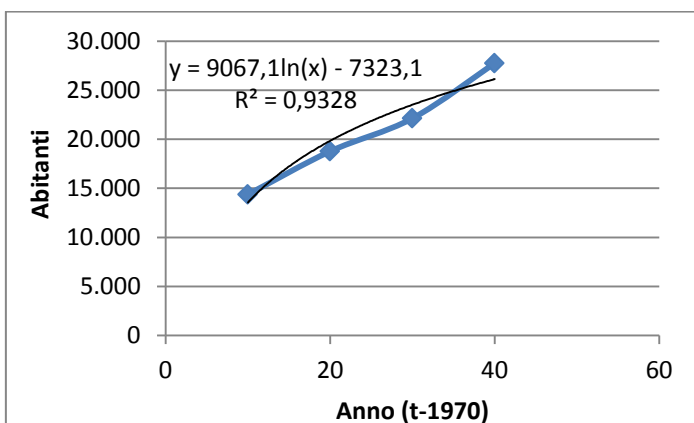
**Figura 4.2 - Metodo curva di potenza:**

con questo metodo si ottiene un valore di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a 0,9748.



**Figura 4.3 - Metodo equazione esponenziale:**

con questo metodo si ottiene un valore di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a 0,9924.



**Figura 4.4 - Metodo equazione logaritmica:**

con questo metodo si ottiene un valore di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a 0,9328.

I risultati dell'analisi della crescita popolazionele effettuata con i quattro metodi proposti, mostra come il metodo di equazione esponenziale sia il più adatto per seguire la dinamica di crescita della popolazione di Pomerode avendo un coefficiente di correlazione lineare ( $R^2$ ) uguale a 0,9924.



Con questo metodo si effettua dunque una previsione di crescita della popolazione fino all'anno 2035, mostrati in tabella 4.3, anno previsto di vita utile della discarica di Timbó dove vengono inviati i rifiuti organici e gli scarti non riciclabili.

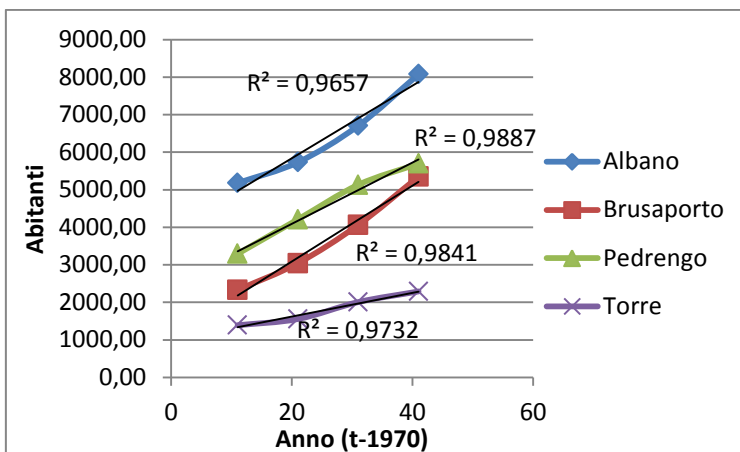
**Tabella 4.3 – previsione crescita popolazionale della città di Pomerode fino all'anno 2035.**

<b>T</b>	<b>X</b>	<b>Popolazione</b>	<b>T</b>	<b>X</b>	<b>Popolazione</b>
<b>(anno)</b>	<b>(t-1970)</b>	<b>a</b>	<b>(anno)</b>	<b>(t-1970)</b>	<b>a</b>
<b>1980</b>	10	14.377	<b>2022</b>	52	34.137
<b>1991</b>	20	18.771	<b>2023</b>	53	34.709
<b>2000</b>	30	22.127	<b>2024</b>	54	35.291
<b>2010</b>	40	27.759	<b>2025</b>	55	35.883
<b>2011</b>	41	28.430	<b>2026</b>	56	36.485
<b>2012</b>	42	28.907	<b>2027</b>	57	37.096
<b>2013</b>	43	29.392	<b>2028</b>	58	37.719
<b>2014</b>	44	29.884	<b>2029</b>	59	38.351
<b>2015</b>	45	30.386	<b>2030</b>	60	38.994
<b>2016</b>	46	30.895	<b>2031</b>	61	39.648
<b>2017</b>	47	31.413	<b>2032</b>	62	40.313
<b>2018</b>	48	31.940	<b>2033</b>	63	40.989
<b>2019</b>	49	32.475	<b>2034</b>	64	41.676
<b>2020</b>	50	33.020	<b>2035</b>	65	42.375
<b>2021</b>	51	33.574			

Si ottiene così una popolazione nell'anno 2035 di 42.375 abitanti.

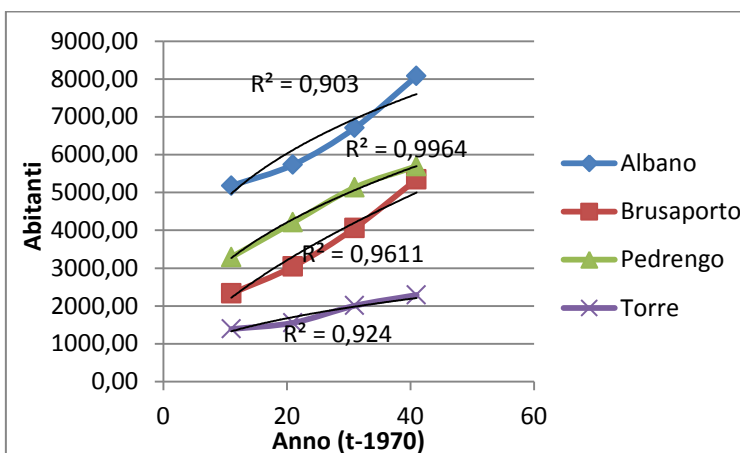
#### 4.2.2 Comuni italiani

Con la stessa metodologia si effettua il calcolo della stima di crescita popolazionale dei quattro comuni della bergamasca. In figura 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 sono indicati gli andamenti popolazioni degli ultimi censimenti demografici con il rispettivo coefficiente di correlazione lineare per individuare il metodo migliore.



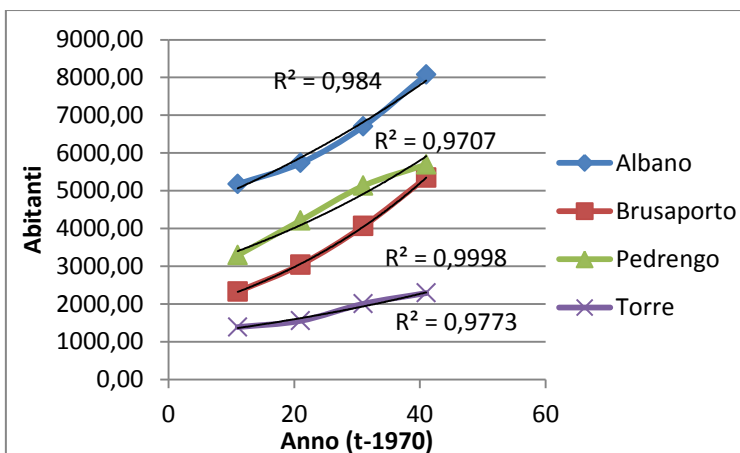
**Figura 4.5 - Metodo aggiustamento lineare:**

con questo metodo si ottengono valori di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a:  
 Albano Sant'Alessandro = 0,9657;  
 Brusaporto = 0,9841;  
 Pedrengo = 0,9887;  
 Torre de' Roveri = 0,9732;



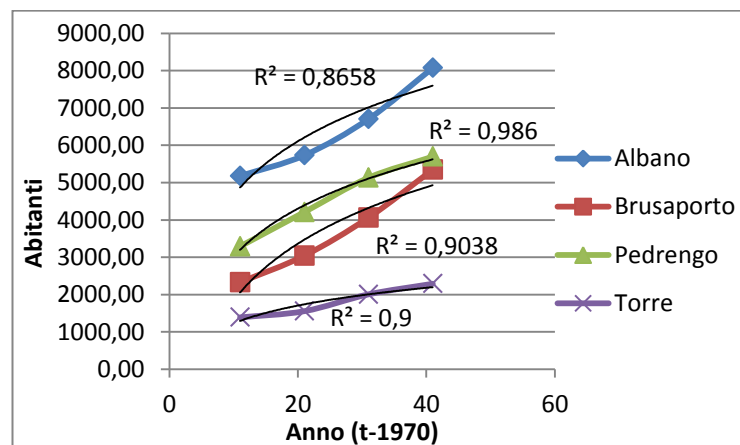
**Figura 4.6 - Metodo curva di potenza:**

con questo metodo si ottengono valori di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a:  
 Albano Sant'Alessandro = 0,903;  
 Brusaporto = 0,9611;  
 Pedrengo = 0,9964;  
 Torre de' Roveri = 0,924;



**Figura 4.7 - Metodo equazione esponenziale:**

con questo metodo si ottengono valori di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a:  
 Albano Sant'Alessandro = 0,984;  
 Brusaporto = 0,9998;  
 Pedrengo = 0,9707;  
 Torre de' Roveri = 0,9773;



**Figura 4.8 - Metodo equazione logaritmica:**

con questo metodo si ottengono valori di correlazione lineare ( $R^2$ ) pari a:  
 Albano Sant'Alessandro = 0,8658;  
 Brusaporto = 0,9038;  
 Pedrengo = 0,986;  
 Torre de' Roveri = 0,9;

Analizzando i risultati dei metodi utilizzati si nota che il migliore metodo per la crescita popolazionele di Albano Sant’Alessandro, Brusaporto e Torre de’ Roveri è il metodo di equazione esponenziale, mentre Pedrengo ha un andamento che rispecchia il metodo curva di potenza. Utilizzando questi due metodi si effettua la previsione di crescita popolazionele delle quattro città, tabella 4.4.

**Tabella 4.4 – Previsione di crescita dell popolazioni dei quattro comuni Bergamaschi.**

	Albano Sant’Alessandro	Brusaporto	Pedrengo	Torre de’ Roveri		Albano Sant’Alessandro	Brusaporto	Pedrengo	Torre de’ Roveri
Anno	Popolazione	Popolazione	Popolazione	Popolaizone	Anno	Popolazione	Popolazione	Popolazione	Popolaizone
<b>1981</b>	5178	2329	3291	1390	<b>2022</b>	9328	7251	6303	2796
<b>1991</b>	5732	3043	4210	1556	<b>2023</b>	9468	7456	6354	2846
<b>2001</b>	6706	4063	5131	2007	<b>2024</b>	9610	7666	6404	2896
<b>2011</b>	8075	5349	5696	2291	<b>2025</b>	9754	7882	6454	2947
<b>2012</b>	8036	5491	5759	2347	<b>2026</b>	9900	8104	6504	2999
<b>2013</b>	8157	5646	5816	2389	<b>2027</b>	10049	8332	6553	3052
<b>2014</b>	8279	5805	5873	2431	<b>2028</b>	10200	8567	6601	3106
<b>2015</b>	8404	5969	5929	2474	<b>2029</b>	10353	8809	6649	3161
<b>2016</b>	8530	6137	5985	2518	<b>2030</b>	10508	9057	6696	3217
<b>2017</b>	8658	6310	6039	2562	<b>2031</b>	10666	9312	6743	3273
<b>2018</b>	8788	6488	6093	2607	<b>2032</b>	10826	9575	6790	3331
<b>2019</b>	8920	6671	6147	2653	<b>2033</b>	10989	9845	6836	3390
<b>2020</b>	9054	6859	6199	2700	<b>2034</b>	11154	10122	6882	3450
<b>2021</b>	9190	7052	6251	2748	<b>2035</b>	11321	10408	6927	3511

Si conta dunque una popolazione totale nell’anno 2035 di 32.167 abitanti.

Le due popolazioni sono ancora distanti con un significativo aumento per la popolazione di Pomerode.

### **4.3 Previsione di produzione di rifiuti organici**

Per calcolare la produzione futura di residui organici della città di Pomerode, si utilizza la produzione pro capite di residui organici che è di 0,219 kg/ab/giorno e si moltiplica con la previsione di crescita popolazionele calcolata in tabella 4.3.

Si effettua poi la previsione di produzione futura di residui non riciclabili derivanti dallo smistamento nella centrale di divisione, inviati alla discarica di Timbó, con lo stesso metodo effettuato per i residui organici; in questo caso la produzione pro capite diaria è di 0,049 kg/ab/giorno. In questa modo si conosce quale sarà il volume annuale di residui disposti in discarica e si potrà calcolare la loro produzione di biogas e dunque quale sarà l’impatto ambientale sotto forma di gas serra misurato in tCO<sub>2</sub>.

Per i comuni italiani si effettua solamente la previsione di produzione di residui organici e verde.

#### 4.3.1 Pomerode

Avendo analizzato le differenze tra le due realtà cittadine nel capitolo 4.1, si è analizzato che un miglioramento o peggioramento della qualità di vita di una popolazione, influenza la produzione di residui urbani.

Dopo queste verifiche si effettuano tre scenari di produzione futura della FORSU:

- a) Raddoppio della produzione nell'arco di 20 anni;
- b) Produzione costante nell'arco di 20 anni;
- c) Dimezzamento della produzione nell'arco di 20 anni.

Caso a):

Si considera che la produzione di rifiuti organici pro capite aumenterà proporzionalmente durante i 30 anni di pianificazione, passando da 0,219 a 0,438 kg/ab/dia.

Calcolando i residui scartati da raccolta differenziata inviati in discarica, si passa da una produzione pro capite di 0,049 a 0,098 kg/ab/dia. In tabella 4.5 (appendice VII) sono calcolati la produzione di entrambi le tipologie di rifiuti.

I fattori che possono contribuire alla crescita di rifiuti organici sono:

- Aumento del consumo di prodotti derivati dall'aumento del reddito della popolazione;
- La non modifica della tipologia di raccolta, aumentando la quantità di residui non differenziabili e inviati in discarica.

Caso b)

Si considera che la produzione di rifiuti rimanga costante nel tempo con una produzione di rifiuti organici 0,219 kg/ab/giorno e inviati in discarica di 0,049 kg/ab/giorno la tabella 4.6 in appendice VIII mostra i risultati.

Caso c):

Si considera che la produzione di rifiuti organici e non riciclabili da parte della popolazione si ridurrà nel corso del periodo di programmazione, passando da 0,219 a 0,109 kg/ab/giorno e da 0,049 a 0,0245 kg/ab/giorno; in tabella 4.7 nell'appendice IX sono mostrati i risultati ottenuti. Fattori che possono contribuire alla riduzione dei rifiuti sono:

- Riduzione dei consumi a causa di una maggiore consapevolezza nel ridurre la generazione e il riutilizzo dei prodotti;
- Qualità della campagna di sensibilizzazione della popolazione per la corretta separazione dei rifiuti, riducendo la quantità di rifiuti non riciclabili (raccolta differenziata) inviati alla stazione di smistamento.

#### 4.3.2 Comuni Italiani

Con lo stesso procedimento si calcola la produzione dei rifiuti organici dei quattro comuni italiani considerando i tre casi precedenti A – B – C . Analizzando però i dati della produzione di rifiuti degli anni passati, si nota come la produzione di rifiuti è sempre in aumento quando invece gli obiettivi europei e legislativi suggeriscono una riduzione della produzione per evitare poi di dover trattare i residui urbani. Di conseguenza si prenderà in considerazione per la stima di produzione di biogas solamente il primo caso di aumento di produzione, per poter confrontare con il caso brasiliano dove si prevederà sicuramente il caso A.

Come enunciato all'inizio del capitolo 4, prendiamo in considerazione il volume totale di residui prodotti e la produzione pro capite totale considerando la popolazione all'ultimo censimento demografico effettuato dall'ISTAT nel 2011.

La produzione totale di residui organici e verde è di 5.040.510 kg/anno e la popolazione è di 21.411 abitanti. La produzione giornaliera è dunque di 0,655 kg/ab/giorno come mostrato in tabella 4.8 nell'appendice X.

#### 4.4 Impatto ambientale dei residui in discarica

Utilizzando il metodo dell'IPCC si calcola quale è la produzione di gas metano dai residui disposti nella discarica di Timbó per poter valutare l'impatto ambientale che questi avranno nell'arco di vita della discarica.

Per effettuare il calcolo si considera:

- La discarica ha iniziato a ricevere residui dal 2003 e si prevede che può ricevere rifiuti fino al 2031 (AMBIENTAIS, 2012);
- Da tabella 3.1 FCM uguale a 1, ciò significa che i residui sono disposti in maniera conforme alle normative imposte (AMBIENTAIS, 2012);
- La frazione di residui che arrivano in discarica sono maggiormente organico con un volume medio di 239.116,32 kg/mese mentre i rifiuti che arrivano dalla divisione dai residui riciclabili sono 45.046,79 kg/mese. Si considera il caso peggiore dei tre scenari analizzati per la produzione futura di residui, e cioè lo scenario dove la produzione pro capite di residui organici e quella di residui non riciclati aumenta fino a raggiungere quasi il doppio (Caso A) (tabella 4.5 appendice VII). Si ha dunque che l'81% è residuo organico, mentre il 19% è da scarto di raccolta differenziata. Per il calcolo del valore FCD si ha bisogno delle percentuali di residui sul totale inviati che cambieranno per ogni anno. Si considera la frazione organica divisa tra residui organici e verde di giardini e quelli che arrivano dalla centrale di smistamento come 1/3 di carta, 1/3 di tessuto e 1/3 di materiale legnoso. Questa divisione è definita dai dati della SAMAE che gestisce la stazione di smistamento dei rifiuti a Pomerode. Per la quantità di tessuto di scarto che arriva in discarica, non si conoscono i volumi specifici e di conseguenza non si considera questa matrice per il calcolo delle emissioni di biogas. Nel calcolo si annulla il valore A. Si ottengono così valori iniziali di:  
 $B = 60,75\%$ ;  $C = 28,35\%$ ;  $A = 6,33\%$ ;  $E = 6,33\%$ . Con questi coefficienti si ottiene un valore iniziale di  $FCD = 184,414 \text{ kgC/t residuo}$ , che varia poi nel corso degli anni.
- Per il calcolo della  $FCD_f$  si utilizza una temperatura di  $35^\circ\text{C}$  come raccomandato da Gunnerson & Stuckey (1986), ottenendo così un  $FCD_f$  di 0,77;
- Si adotta come frazione di metano nel biogas una percentuale  $F$  di 55% come consiglia (IPCC, 2006).

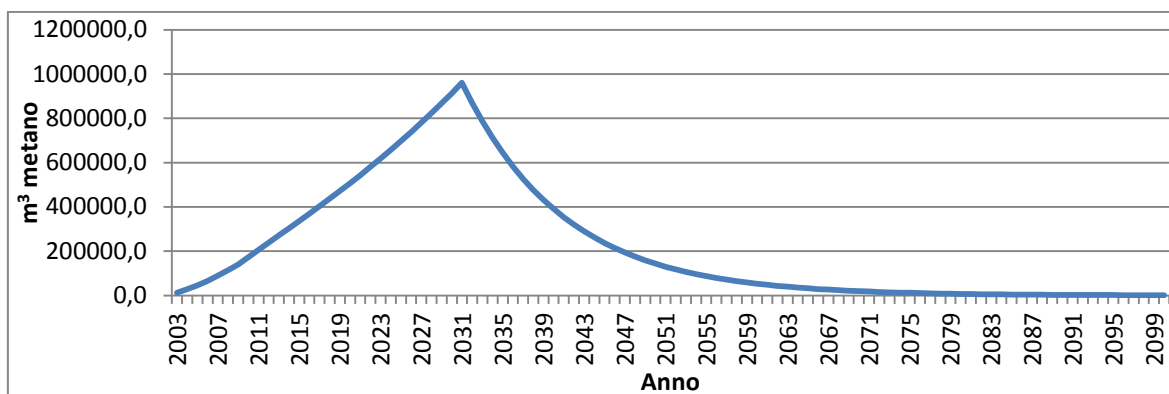
- Con i dati elencati si ottiene un valore iniziale di  $L_0 = 104,132 \text{ kgCH}_4/\text{t}$  di residuo;
- La densità del metano è di  $0,7167 \text{ kgCH}_4/\text{Nm}^3\text{CH}_4$  (ENSINAS, 2003). Si trasforma  $L_0$  in  $\text{m}^3$  ottenendo un  $L_0$  iniziale di  $145 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{t}$  di residuo. Il valore ottenuto sta nella fascia di  $140 - 180 \text{ m}^3/\text{t}$  di residuo raccomandata da USEPA (1996);
- Con i dati ottenuti si calcola il volume di metano emesso per ogni anno di disposizione di residui fino alla chiusura della discarica. Si calcola quindi la quantità totale di metano emesso ogni anno, sommando la produzione di metano dei rifiuti all'anno di riferimento più la produzione dei rifiuti già depositati negli anni passati.

In tabella 4.9 sono riassunti i parametri per il calcolo della portata di metano emessa annualmente dai residui.

**Tabella 4.9 – parametri per il calcolo del volume di metano emesso negli anni di attività della discarica.**

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>
FCM	1
COD [kgC/t residuo]	184,414
T [°C]	35
F	0,55
$L_0$ [ $\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{t}$ di residuo]	145,294

Si ottiene così la figura 4.1 dove è mostrato il volume in  $\text{m}^3$  di gas metano emesso fino all'anno di chiusura della discarica 2031; punto dove si ha il picco di emissione. Successivamente si ha un decadimento dei rifiuti e una progressiva diminuzione della quantità emessa (Appendice VI).



**Figura 4.9 – Quantità di metano emesso dai residui di Pomerode nell’aterro di Timbó, dal 2003, anno di apertura, fino alla chiusura prevista nel 2031.**

#### 4.5 Dimensionamento Biodigestore

Per il seguente studio di caso si utilizzerà come substrato in ingresso per il dimensionamento del biodigestore solamente i residui solidi organici prodotti dalla città di Pomerode e la previsione di produzione futura ( tabella 4.5 ). Da tabella 3.3 si può notare come la produzione mensile per abitante nell’anno 2014 sia costante, si suppone dunque una produzione giornaliera di residui organici costante per ogni anno tabella 4.10.

**Tabella 4.10 – produzione giornaliera di residui solidi organici di Pomerode da inviare al biodigestore anaerobico.**

<b>Anno</b>	<b>Residui organici [kg/anno]</b>	<b>Residui organici [kg/dia]</b>
2015	2.916.856	8.102
2016	3.067.258	8.520
2017	3.210.418	8.917
2018	3.369.176	9.358
2019	3.532.354	9.812
2020	3.700.058	10.277
2021	3.860.139	10.722
2022	4.037.007	11.213
2023	4.218.722	11.718
2024	4.405.396	12.237
2025	4.584.047	12.733
2026	4.780.768	13.279
2027	4.982.797	13.841
2028	5.190.258	14.417
2029	5.389.277	14.970
2030	5.607.744	15.577
2031	5.832.022	16.200



#### 4.5.1 Contenuto %ST e %STV

Analizzando i dati in letteratura sulla caratterizzazione chimico-analitica di questa matrice (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005), si può affermare che mediamente la frazione organica da raccolte differenziate presenta un intervallo caratteristico di tenore in secco che va dal 10% (tipico dei rifiuti mercatali) fino al 20-25%, tipico dei rifiuti di mensa. La percentuale in volatili rimane pressoché costante, indipendentemente dalla composizione merceologica, intorno al 85-90% dei ST; analogamente, per i nutrienti si riscontrano valori del 2-3% ST per entrambi. Si scelgono valori di %ST di 20% e di %STV di 87%.

#### 4.5.2 Scelta della tipologia di processo

Come analizzato nel paragrafo precedente i solidi totali in ingresso sono della fascia di 10-20%. Per questo motivo si sceglie un processo wet con digestore completamente miscelato e alimentazione continua.

#### 4.5.3 Scelta OLR o HRT

Dalle tabelle 4.11 e 4.12 si sceglie un valore di OLR e di HRT in termofilia per il dimensionamento del volume del biodigestore.

**Tabella 4.11 - Valori del carico organico (OLR [kgSV/m<sup>3</sup>×giorno]) nei vari processi. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005)**

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	2.6-4	6-8	6-9	2-5	6-20	9-15
Frazione organica da raccolta differenziata	2-3	3-4	4-6	2-5	4-10	6-9

**Tabella 4.12 - Valori del tempo di residenza volumetrica (HRT [d]) nei vari processi. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005)**

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	14-30	15-20	17-30	10-18	6-15	12-20
Frazione organica da raccolta differenziata	12-18	12-18	17-25	8-16	10-16	12-16

Si sceglie di dimensionare il biodigestore utilizzando il valore di OLR pari a 4 kgSV/m<sup>3</sup>×giorno.

#### 4.5.4 Quantità residui in entrata al sistema

Per dimensionare il bioreattore si considera una media di produzione di rifiuti organici annuale per i 16 anni analizzati pari a 4.275.547 kg/anno e di conseguenza si considera una produzione giornaliera di 13000 kg/giorno. Con questi valori si dimensiona il volume del bioreattore e la area di ricezione dei rifiuti.

Da letteratura si ottiene il peso specifico di residui solidi organici da raccolta differenziata compreso in un intervallo di 500-600 kg/m<sup>3</sup> (ETRA, 2007); questo valore è stato ottenuto da diversi studi di residui organici di città tedesche e nord italiane. Come già specificato nel paragrafo 4.1, dove la cultura di Pomerode è simile a quella europea come consumo di alimenti e stile di vita, si può supporre un valore di peso specifico dei residui organici della città compreso nell'intervallo individuato; visto che si prevede uno sviluppo futuro della città brasiliana simile a quella italiana. Nel nostro studio di caso si utilizza un valore di 550 kg/m<sup>3</sup>.

Per il reparto di ricezione si seleziona un'area piana per creare una fossa coperta per evitare fuoriuscita di odori, che possa ricevere rifiuti per 2-3 giorni e quindi un volume di 71m<sup>3</sup> di rifiuti organici da raccolta differenziata pronti per essere inseriti, dopo trattamento, triturazione e diluizione, nel biodigestore.

#### 4.5.5 Volume Digestore

Si utilizza come quantità di residui in ingresso 13000kg/giorno, con una quantità di solidi totali pari a 2600kgST/giorno e di solidi volatili di 2262kgSV/giorno.

Conoscendo la quantità di solidi totali volatili e il carico organico scelto si ottiene il volume teorico del bioreattore che è di 565,5 m<sup>3</sup>. Si verifica ora il tempo di ritenzione idraulica dividendo il volume del digestore per volume in ingresso giornaliero. Si ottiene un HRT di 23,9 giorni. Conoscendo la proiezione futura pessimistica (caso A) della generazione di rifiuti organici di Pomerode, dove si è ipotizzato che la quantità aumenta con gli anni, con questo processo di reattore wet si riesce a soddisfare il trattamento del futuro volume di sostanza organica in ingresso al sistema. Questa scelta però non favorisce un ritorno rapido dell'investimento effettuato per la costruzione del biodigestore perché nei primi anni il reattore sta lavorando con un carico inferiore di quello che è stato dimensionato, l'analisi più specifica sarà effettuata nel paragrafo 4.5.9.

Considerando un coefficiente di sicurezza di 1,2 e un 25% in più per la raccolta del biogas, si ottiene un volume totale di reattore da costruire di 848,25 m<sup>3</sup>.

Si considera un'altezza del biodigestore di 2 metri e una pianta circolare con raggio di 11,62 metri.

#### 4.5.6 Diluizione substrato

Per il calcolo della quantità di acqua per la diluizione del substrato in ingresso si utilizza la formula seguente:

$$\frac{kgH_2O}{giorno} = \frac{kg_{sub}}{giorno} \times \frac{\%ST_{sub} - \%ST_{diluito}}{\%TS_{diluito}}$$

Considerando un %ST<sub>diluito</sub> di 0,10 si ottengono i volumi di acqua da fornire al substrato per mantenere un OLR costante. Per i primi anni di funzionamento il biodigestore non funziona a pieno regime ma a condizioni di carico diminuito, questo è compensato da una produzione futura a pieno carico.

**Tabella 4.13 – volume di acqua per diluizione del substrato per processo ad umido.**

<b>Anno</b>	<b>H<sub>2</sub>O in [m<sup>3</sup>]</b>	<b>V Substrato in [m<sup>3</sup>/giorno]</b>	<b>V totale in [m<sup>3</sup>/giorno]</b>	<b>V reattore teorico [m<sup>3</sup>]</b>
2015	7,29	13,26	20,55	317,21
2016	7,67	13,94	21,61	333,56
2017	8,03	14,59	22,62	349,13
2018	8,42	15,31	23,74	366,40
2019	8,83	16,06	24,89	384,14
2020	9,25	16,82	26,07	402,38
2021	9,65	17,55	27,20	419,79
2022	10,09	18,35	28,44	439,02
2023	10,55	19,18	29,72	458,79
2024	11,01	20,02	31,04	479,09
2025	11,46	20,84	32,30	498,52
2026	11,95	21,73	33,68	519,91
2027	12,46	22,65	35,11	541,88
2028	12,98	23,59	36,57	564,44
2029	13,00	23,64	36,64	565,50
2030	13,00	23,64	36,64	565,50
2031	13,00	23,64	36,64	565,50

Dall'anno 2029 la quantità di residui che arrivano al sistema è maggiore della quantità di FORSU prevista al momento del dimensionamento del digestore installato, si può dunque decidere di diminuire la quantità di solidi in ingresso per mantenere un valore di OLR pari a 4 kgSV/m<sup>3</sup> giorno. Nei primi anni di funzionamento il biodigestore lavora al di sotto del carico ideale con un potenziale ridotto di produzione di biogas. Successivamente si può notare come il volume teorico corrisponde al volume dimensionato e dunque il biodigestore inizia a lavorare stabilmente a pieno carico. Questa scelta permetterà di avere del tempo iniziale per stabilizzare il processo e riuscire ad avere un funzionamento corretto e a pieno regime all'anno 2031, anno di previsione della chiusura della discarica di Timbò e dunque i rifiuti organici saranno trattati esclusivamente da questo sistema.

#### 4.5.7 Produzione biogas

Si sceglie da tabella 4.14 un valore di SPB pari a 0,7 conforme alla tipologia di processo scelto.

**Tabella 4.14 - Valori del rendimento in biogas [m<sup>3</sup>/kgSV] nei vari processi. (CECCHI, PAVAN, *et al.*, 2005).**

Substrato	Mesofilia			Termofila		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	0.17-0.23	0.23-0.30	0.35-0.45	0.20-0.30	0.30-0.41	0.35-0.45
Frazione organica da raccolta differenziata	0.65-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70	0.60-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70

Considerando da letteratura una percentuale di metano nel biogas del 60% e un valore di conversione di 5500 kcal/m<sup>3</sup> di metano, si ottengono i valori annuali di produzione di metano e di energia mostrati in tabella 4.15.

**Tabella 4.15 – produzione biogas, metano e energetica dal bioreattore dimensionato.**

Anno	Biogas [m <sup>3</sup> /giorno]	CH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> /giorno]	Produzione giornaliera [kcal/giorno]
2015	888	533	2.931.003
2016	934	560	3.082.134
2017	977	586	3.225.989
2018	1026	615	3.385.517
2019	1076	645	3.549.486
2020	1127	676	3.718.003
2021	1175	705	3.878.861
2022	1229	737	4.056.586
2023	1285	771	4.239.183
2024	1341	805	4.426.762
2025	1396	837	4.606.280
2026	1456	873	4.803.955
2027	1517	910	5.006.964
2028	1580	948	5.215.431
2029	1583	950	5.225.220
2030	1583	950	5.225.220
2031	1583	950	5.225.220

#### 4.5.8 Bilancio di massa

Effettuando il bilancio di massa della massa entrante, la massa di biogas uscente, si ottiene la massa di digestato uscente dal biodigestore, e conoscendo il suo peso specifico si ottiene il volume uscente.

**Tabella 4.16 – Bilancio di massa del biodigestore.**

<b>Massa tot in [kg/giorno]</b>	<b>Massa biogas Out [kg/giorno]</b>	<b>Massa out [kg/giorno]</b>
14.584	1.066	13.518
15.336	1.121	14.216
16.052	1.173	14.879
16.846	1.231	15.615
17.662	1.291	16.371
18.500	1.352	17.148
19.301	1.410	17.890
20.185	1.475	18.710
21.094	1.542	19.552
22.027	1.610	20.417
22.920	1.675	21.245
23.904	1.747	22.157
24.914	1.821	23.093
25.951	1.897	24.055
26.000	1.900	24.100
26.000	1.900	24.100
26.000	1.900	24.100

#### 4.5.9 Produzione energia elettrica

Non avendo informazioni relative a progetti Brasiliani di conversione di biogas in energia elettrica, si utilizzano per il calcolo dati, informazioni e progetti di installazioni europei redatti da Biogas3, il quale presenta differenti tipologie di reattori con diverse caratteristiche di impianto e di substrato utilizzato. Per il calcolo ipotetico della produzione di energia dell'impianto in dimensionamento si utilizzano i dati del sistema a biogas di Lana in provincia di Bolzano (IT) che tratta i rifiuti organici provenienti dalla raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani (FORSU) avendo caratteristiche simili di impianto. La produzione energetica è garantita da 2 cogeneratori di potenza elettrica pari a 100 kW l'uno. Questi sono eserciti 7805 ore all'anno, con un rendimento elettrico medio del 32,4%. Gli autoconsumi rappresentano il 47% dell'energia elettrica prodotta, mentre la restante quota di energia elettrica viene immessa in rete e venduta. Dell'energia termica recuperata in cogenerazione viene impiegata solo una piccola parte (il 18% circa) per mantenere i digestori alla temperatura richiesta dal processo. Il surplus di calore non trova attualmente valorizzazione ed è dissipato in atmosfera. Complessivamente si può quindi stimare che dell'energia termica contenuta nel biogas:

- il 32,4% viene convertito in energia elettrica;

- il 35,4% viene recuperato e reso disponibile sottoforma di acqua calda alla temperatura di 90°C. Di questa quantità di calore solo il 18% viene effettivamente valorizzato per il processo, mentre il resto è dissipato in atmosfera;
- il 32,2% viene direttamente disperso nell'ambiente attraverso i gas di scarico ed il calore irradiato dalle unità di cogenerazione (REICHHALTER, BOZZO, *et al.*, 2011).

**Tabella 4.17 – produzione di energia elettrica da biogas.**

<b>Anno</b>	<b>Biogas [m3/anno]</b>	<b>Energia termica nel biogas [kwh/anno]</b>	<b>Energia elettrica Prodotta [kwh/anno]</b>	<b>Energia elettrica autoconsumata [kwh/anno]</b>	<b>Energia elettrica in rete [kwh/anno]</b>
2015	319.746	1.822.551	590.506	277.538	312.968
2016	336.233	1.916.527	620.955	291.849	329.106
2017	351.926	2.005.978	649.937	305.470	344.467
2018	369.329	2.105.176	682.077	320.576	361.501
2019	387.217	2.207.135	715.112	336.102	379.009
2020	405.600	2.311.922	749.063	352.059	397.003
2021	423.148	2.411.946	781.471	367.291	414.179
2022	442.537	2.522.459	817.277	384.120	433.157
2023	462.456	2.636.001	854.064	401.410	452.654
2024	482.920	2.752.641	891.856	419.172	472.684
2025	502.503	2.864.268	928.023	436.171	491.852
2026	524.068	2.987.186	967.848	454.889	512.960
2027	546.214	3.113.421	1.008.748	474.112	534.637
2028	568.956	3.243.050	1.050.748	493.852	556.896
2029	570.024	3.249.137	1.052.720	494.779	557.942
2030	570.024	3.249.137	1.052.720	494.779	557.942
2031	570.024	3.249.137	1.052.720	494.779	557.942

Dopo il 2028 si raggiunge la produzione massima a regime del biodigestore installato calcolando così una potenza massima di 135kW. Si è scelto di installare due motori da 100kW per avere la possibilità in futuro di valutare la costruzione di un secondo bioreattore e poter utilizzare come substrato i restanti residui organici che non sono trattati dal primo e che saranno in aumento con il passare del tempo. In questo modo non si dovrà cercare una nuova discarica dove inviare la FORSU ma sarà trattata tutta da questo sistema di trattamento.

#### 4.5.10 Costi di installazione e periodi di ritorno previsto

Per effettuare uno studio sui costi di installazione, si analizza la tipologia di reattore installato e la sua produzione di biogas ed energia elettrica tabella 4.12.

**Tabella 4.18 – diverse tipologie di costruzione di impianto (REICHHALTER, BOZZO, *et al.*, 2011)**

Taglia di impianto	Domestico	Piccola	Media	medio-grande
<b>Dati tecnici</b>				
Potenza elettrica	<50 kW	50 ÷ 150 kW	150 ÷ 500 kW	500 ÷ 1.000 kW
Valorizzazione del calore	allacciamento di utenze a breve raggio	rete di tele-riscaldamento	rete di tele-riscaldamento	rete di tele-riscaldamento
Tipologia di vasca di pre-stoccaggio	Aperta	Chiusa	Chiusa	chiusa
Tipologia costruttiva digestore	Sottoterra	Cilindrica	Cilindrica	in parte interrata, isolata
Tipologia costruttiva vasca di poststoccaggio	-	Sottoterra	in parte interrata	in parte interrata, isolata

Si individua la tipologia di impianto del progetto in esame come impianto di piccola taglia, si possono dunque stimare i costi di costruzione e investimento espressi in riferimento alla potenza elettrica installata.

- Costi di costruzione:



**Tabella 4.19 – stima di costo per ogni tipologia di impianto.** (REICHHALTER, BOZZO, *et al.*, 2011).

Voce di Costo	Impianto domestico		Impianto di piccola taglia		Impianto di media taglia		Impianto di medio-grande taglia	
	[€/kW]	[%]	[€/kW]	[%]	[€/kW]	[%]	[€/kW]	[%]
Lavori di scavo	216	5,0	2.266	21,0	763	13,2	79	1,1
Opere edili	1.622	37,3	3.333	30,9	1.474	25,5	3.135	44,4
Opere elettro-meccaniche	1.189	27,4	3.317	30,8	1.474	25,5	1.958	27,7
Unità di cogenerazione	703	16,2	923	8,6	697	12,1	1.091	15,4
Allacciamento elettrico	73	1,7	296	2,7	421	7,3	69	1,0
Allacciamento termico	432	10,0	101	0,9	211	3,6	0	0
Monitoraggio	0	0	0	0	0	0	23	0,3
Progettazione e direzione lavori	108	2,5	546	5,1	132	2,3	155	2,2
Mezzo di trasporto della biomassa fresca	0	0	0	0	0	0	0	0
Mezzo di trasporto digestato	0	0	0	0	92	1,6	0	0
Acquisto terreno	0	0	0	0	513	8,9	0	0
Altro	0	0	0	0	0	0	557	7,9
<b>Totale investimento</b>	<b>4.343</b>	<b>100</b>	<b>10.781</b>	<b>100</b>	<b>5.776,3</b>	<b>100</b>	<b>7.065,1</b>	<b>100</b>

Da tabella 4.19 si ottiene il valore di costruzione iniziale dell'impianto di piccola taglia, si calcolano i costi solamente del bioreattore e si escludono tutti i costi di pretrattamento dunque risulta pari a 10.781 €/kW. Avendo stimato una potenza massima dell'impianto di 135 kW, si ottiene un investimento iniziale di costruzione pari a 1.455.435 €, convertiti in 5.126.042 R\$ con il cambio del 21-06-2015 di 3,522 R\$/€ (UOL, 2015).

- Costi annui:

I costi annui possono essere suddivisi in tre categorie:

*C<sub>1</sub> costi correnti di gestione:* costo dell'energia utilizzata per il funzionamento, costo di smaltimento del materiale indesiderato rimosso da pre-trattamento meccanico (circa il 10% dei residui in ingresso), costo della manutenzione ordinaria si possono valutare come segue:

*C<sub>1.1</sub> Personale:*

due persone x 21.600 €/cad = 43.200 €/anno

*C<sub>1.2</sub> Smaltimento rifiuti indesiderati inviati in discarica:*

10% x rifiuti in ingresso t x 14,20 €/t = 4142 € nell'anno 2015 e varia nel corso degli anni

*C<sub>1.3</sub> Manutenzione ordinaria:*

12.600 €/anno

C<sub>1.4</sub> Manutenzione straordinaria:

7.600 €/anno

$$C_{1.5} = C_{1.1} + C_{1.2} + C_{1.3} + C_{1.4} = 67.542 \text{ €}$$

C<sub>1.6</sub> Spese Generali:

il 10% in più dal C<sub>1.5</sub> = C<sub>1.5</sub> x 1,1 = 74.296 € nell'anno 2015

*C<sub>2</sub> costi correnti di smaltimento del digestato fangoso:* nel progetto dimensionato non è previsto un trattamento dei fanghi prodotti, questi saranno inviati a un opportuno sistema di trattamento. Si applica la tariffa T5 prevista dalla deliberazione della G.P n. 1843 del 18-07-2008 che esprime un valore di 16,50 €/ton.

Si ottiene così un valore di C<sub>2</sub> = 16,5 x Massa out t/anno. Per l'anno 2015 di inizio digestione è di 80.300 €. Per i seguenti anni si effettua lo stesso calcolo.

*C<sub>3</sub> costi correnti del trattamento del liquido di uscita dal processo:* possono essere valutati in 2 €/m<sup>3</sup> di refluo trasferito al depuratore (NARDELLI, 2012).

$$C_3 = \text{Volume effluente m}^3 \times 2 \text{ €/m}^3 = 5.250 \text{ € nel 2015.}$$

I costi annuali C<sub>n</sub> = C<sub>1</sub> + C<sub>2</sub> + C<sub>3</sub>

Utilizzando il cambio del 21-06-2015 di 3,522 R\$/€ (UOL, 2015) si ottiene il valore annuale in R\$. Tutti i valori sono espressi in tabella 4.20.

**Tabella 4.20 – costi di gestione annuali dell progetto installato.**

Anno	Trattamento residui scartati [€/anno]	Costo personale [€/anno]	Manutenzione ordinaria [€/anno]	Manutenzioni Straordinaria [€/anno]	C1 [€/anno]	C2 Trattamento fango effluente [€/anno]	C3 [€/anno]	Cn [€/anno]	Cn [R\$/anno]
2015	4.142	43.200	12.600	7.600	74.296	5.631	5.250	85.177	299.995
2016	4.356	43.200	12.600	7.600	74.531	5.921	5.521	85.973	302.799
2017	4.559	43.200	12.600	7.600	74.755	6.198	5.779	86.731	305.467
2018	4.784	43.200	12.600	7.600	75.003	6.504	6.065	87.571	308.426
2019	5.016	43.200	12.600	7.600	75.258	6.819	6.358	88.435	311.468
2020	5.254	43.200	12.600	7.600	75.519	7.143	6.660	89.323	314.594
2021	5.481	43.200	12.600	7.600	75.770	7.452	6.948	90.170	317.578
2022	5.733	43.200	12.600	7.600	76.046	7.793	7.267	91.106	320.875
2023	5.991	43.200	12.600	7.600	76.330	8.144	7.594	92.068	324.262
2024	6.256	43.200	12.600	7.600	76.621	8.505	7.930	93.056	327.742
2025	6.509	43.200	12.600	7.600	76.900	8.850	8.251	94.001	331.072
2026	6.789	43.200	12.600	7.600	77.208	9.229	8.605	95.042	334.739
2027	7.076	43.200	12.600	7.600	77.523	9.619	8.969	96.111	338.505
2028	7.076	43.200	12.600	7.600	77.523	10.020	9.342	96.885	341.230
2029	7.076	43.200	12.600	7.600	77.523	10.039	9.360	96.922	341.358
2030	7.076	43.200	12.600	7.600	77.523	10.039	9.360	96.922	341.358
2031	7.076	43.200	12.600	7.600	77.523	10.039	9.360	96.922	341.358

- Ricavi:

$B_1$  vendita energia elettrica: Le entrate degli impianti consistono nella valorizzazione dell'energia elettrica e termica. L'energia elettrica prodotta è valorizzata in diversa maniera, a seconda dell'anno di entrata in esercizio dell'impianto. Il prezzo di vendita dell'energia elettrica prodotta da biogas è di 0,28 €/kWh. Agli impianti di piccola e di medio-grande taglia in Brasile è riconosciuta una tariffa del valore di 65-190 R\$/cent/kWh per l'energia immessa in rete (SOUZA, PEREIRA e PAVAN, 2001). L'energia termica non è venduta ma riutilizzata nel sistema o dispersa nell'ambiente.

$$B_1 = \text{produzione kWh/anno} \times 0,280 \text{ €/kWh}$$

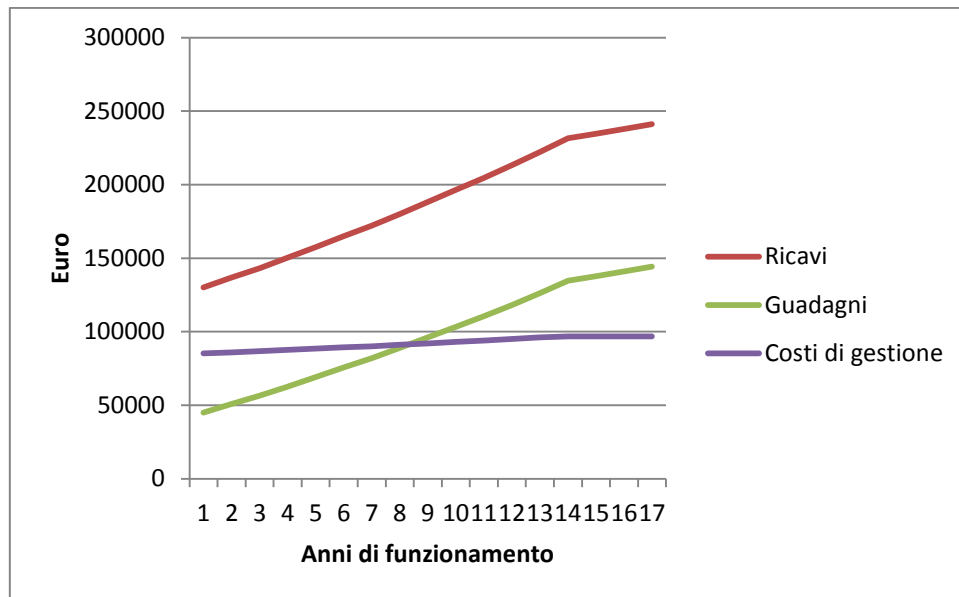
$B_2$  risparmio dal non invio dei rifiuti in discarica: in Pomerode si applica una tariffa di 14,56 € (50R\$) per tonnellata di rifiuto organico inviato in discarica. Questo risparmio può essere considerato come un'entrata del sistema.

$$B_n = B_1 + B_2$$

In tabella 4.21 sono mostrati i guadagni stimati dell'impianto.

**Tabella 4.21 – guadagni annuali stimati dell'impianto.**

Anno	$B_1$ [R\$/anno]	$B_1$ [€/anno]	$B_2$ [R\$/anno]	$B_2$ [€/anno]	$B_n$ [R\$/anno]	$B_n$ [€/anno]
2015	308.637	87.631	149.577	42.469	458.214	130.101
2016	324.551	92.150	157.290	44.659	481.841	136.809
2017	339.699	96.451	164.631	46.744	504.330	143.194
2018	356.498	101.220	172.772	49.055	529.270	150.275
2019	373.764	106.123	181.140	51.431	554.904	157.554
2020	391.509	111.161	189.740	53.873	581.249	165.034
2021	408.447	115.970	197.949	56.204	606.396	172.174
2022	427.162	121.284	207.019	58.779	634.181	180.063
2023	446.389	126.743	216.337	61.425	662.727	188.168
2024	466.142	132.351	225.910	64.143	692.052	196.494
2025	485.045	137.719	235.071	66.744	720.116	204.462
2026	505.860	143.629	245.159	69.608	751.020	213.237
2027	527.237	149.698	255.519	72.550	782.757	222.248
2028	549.189	155.931	266.158	75.570	815.347	231.501
2029	550.220	156.224	276.364	78.468	826.584	234.692
2030	550.220	156.224	287.567	81.649	837.787	237.872
2031	550.220	156.224	299.068	84.914	849.288	241.138



**Figura 4.10 – Andamento ricavi, guadagni e costi di gestione dell'impianto.**

Non avendo in letteratura valori dei costi di investimento, gestione e guadagno in R\$, si utilizzano i prezzi e le tariffe in €, avendo utilizzato il metodo proposto da (REICHHALTER, BOZZO, *et al.*, 2011). Dall'analisi delle tabelle 4.20 e 4.21 e dalla figura 4.10 si può notare come si ottiene un guadagno netto derivato dalla vendita dell'elettricità dopo 8 anni di installazione. Da quell'anno il reattore sta iniziando a lavorare a pieno regime trattando sempre una stessa quantità di rifiuti organici. Dall'ottavo anno si ha un guadagno in aumento fino al 2031 dove si ha un guadagno costante di all'incirca 45.000 €/anno, si ha un tempo di ritorno a partire dal 2033 di all'incirca 32 anni. La scelta dunque di costruire o meno il biodigestore è solamente una scelta amministrativa

## 5. CONCLUSIONE

L'analisi sulla produzione di rifiuti della città di Pomerode e dei comuni italiani analizzati, ha mostrato come il numero di abitanti non influenza direttamente il volume di residui prodotto ma ci sono altri fattori socio-economici da tenere in considerazione. Come illustrato dall'analisi i comuni italiani avendo un IDH e PIL maggiori hanno una produzione di residui maggiore pur avendo una popolazione decisamente inferiore rispetto alla realtà brasiliana.

Analizzando la metodologia di raccolta dei comuni italiani si può concludere che una raccolta differenziata svolta nelle abitazioni di ciascun abitante aumenta la qualità del residuo prodotto, specialmente dei rifiuti organici che possono essere utilizzati come vettore energetico. Questo perché nonostante un maggiore quantità di rifiuti prodotti, i comuni italiani hanno una minore quantità di rifiuto organico ma di migliore qualità. L'adattamento di questa tipologia di raccolta deve però prevedere una diversificazione di trattamenti per ciascun rifiuto differenziato, aumentando così i costi di gestione. Pomerode ha caratteristiche socio-culturali ed economiche che andranno in futuro ad essere simili ai comuni europei analizzati e dunque si potrebbe prevedere uno studio della viabilità dell'utilizzo di questa tipologia di raccolta di residui solidi urbani.

Dall'analisi è previsto un aumento della popolazione nei prossimi anni e della qualità di vita generando di conseguenza un incremento della quantità di rifiuti solidi da smaltire. La discarica di Timbò non ha una vita utile ancora molto lunga e dunque si è cercato di trovare una soluzione per lo smaltimento dei residui organici da raccolta selettiva, i quali sono la quantità di residui maggiormente prodotta in Pomerode. L'alternativa proposta è quella di installare un bioreattore a digestione anaerobica che utilizzando i residui organici prodotti genera biogas che può essere bruciato per generare energia elettrica da vendere o immettere direttamente in rete e di conseguenza abbassare i costi di smaltimento dei rifiuti. I rifiuti organici prodotti da ogni cittadino assumono così un valore economico positivo e non sono solo un peso sulle casse dell'amministrazione locale. Se precedentemente una tonnellata di residui solidi organici costava 50R\$ per lo smaltimento in discarica che Pomerode doveva pagare, con l'installazione del bioreattore una tonnellata di residuo organico genera all'incirca 243 kWh che venduti in rete a una tariffa di 0,19 R\$/kWh possono dare un guadagno di circa 46,17 R\$, avendo quindi quasi un guadagno doppio rispetto alla disposizione in discarica. I cittadini dunque possono avere una riduzione della tariffa annuale per il

servizio di raccolta dei rifiuti urbani perché l'amministrazione non deve più pagare per smaltire e potrebbero avere una riduzione della tariffa dell'energia elettrica perché prodotta direttamente dai rifiuti generati.

Con l'utilizzo del bioreattore anaerobico diminuiscono i residui inviati in discarica e dunque la riduzione della quantità di biogas immesso in atmosfera contribuendo a ridurre l'effetto serra. Questa riduzione di quantità di CO<sub>2</sub> equivalente immessa in atmosfera potrebbe essere utilizzata per generare un mercato di crediti di carbonio locale generando un guadagno da parte delle amministrazioni. Non essendoci in Brasile gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra come previsto invece dall'Unione Europea, che finanzia progetti per l'aumento di utilizzo di energia rinnovabili diminuendo così la quantità di gas immessi in atmosfera, Pomerode potrebbe, non immettendo più CO<sub>2</sub> in atmosfera, vendere la quota di carbonio che avrebbe generato con lo smaltimento in discarica ad altre città confinanti avendo così un guadagno dalla riduzione delle emissioni.

Il digestore è stato dimensionato prevedendo un utilizzo a pieno regime quando la discarica di Timbò non può più ricevere rifiuti e dunque possono essere utilizzati direttamente per la produzione di biogas controllato. La problematica del seguente studio è la mancanza di dati di letteratura base sulle caratteristiche fisico-chimiche dei rifiuti organici prodotti (peso specifico, potere calorifico inferiore, composizione), la mancanza di impianti già installati e funzionanti e di poter dunque studiare l'effettiva reale fattibilità del progetto. Non si conoscono i costi di costruzione nel mercato brasiliano ma solamente in quello europeo con costi più elevati. La mancanza di incentivi governativi non aiuta lo sviluppo di questa tecnologia e dunque i costi di investimento devono essere totalmente a carico di privati o di amministrazioni cittadine. Non c'è una valorizzazione dell'energia prodotta da energie rinnovabili con un prezzo di vendita del kWh maggiore se prodotto da energia rinnovabile come accade invece in Europa. La conseguenza di questi aspetti economici sono tempi di ritorno di investimento più lunghi e dunque la preferenza da parte delle amministrazioni di utilizzare ancora l'invio in discarica dei residui non riciclabili. Il dimensionamento effettuato è solamente la fase preliminare per permettere di decidere se il progetto è realizzabile o no con i dati a disposizione. Dallo studio preliminare effettuato si possono svolgere altri studi di miglioramento e perfezionamento del dimensionamento utilizzato con i successivi suggerimenti:

- Analisi della %ST e %SV dei residui organici di Pomerode per ottenere una caratterizzazione specifica dei rifiuti prodotti visto che sono molto dipendenti dalla cultura della popolazione generatrice;
- Analisi del peso specifico e del potere calorifico inferiore per trovare il potere energetico dei rifiuti organici di Pomerode e dunque un dimensionamento appropriato con la realtà del territorio;
- Dopo la fase preliminare di dimensionamento e aver deciso se costruire o no il biodigestore, con i dati trovati nei punti precedenti si possono effettuare prove in laboratorio per stabilire le costanti cinetiche di reazione dei rifiuti analizzati e di conseguenza effettuare un dimensionamento cinetico del digestore per poter avere una previsione più accurata dell'installazione del progetto;
- Il biodigestore dimensionato è di tipologia umido che utilizza acqua per diluire il substrato in entrata. Si potrebbe effettuare uno studio sull'utilizzo di acque reflue domestiche per diluire il substrato e dunque trattare due inquinanti contemporaneamente diminuendo i costi di trattamento. Questa tecnologia è già studiata in Europa e dunque applicabile e un potenziale studio di caso in Pomerode;
- Il biodigestore per i primi anni di funzionamento non funziona a pieno regime e dunque non produce energia a sufficienza per generare un guadagno adeguato. Si potrebbe effettuare uno studio per effettuare una codigestione dei residui solidi organici urbani con deiezioni da allevamenti animali o scarti da imprese agricole del territorio. In questo modo si ha un tempo di ritorno dell'investimento minore e il biodigestore funziona a efficienza costante già dai primi anni;
- Promuovere una politica di incentivazione dell'energia generata da fonti rinnovabili per poter sostenere i costi di installazione dei digestori e quindi sensibilizzare la popolazione della città sull'utilizzo di energie rinnovabili.

Dopo aver analizzato la produzione di residui solidi organici della città di Pomerode e aver previsto un aumento della quantità da smaltire, si è notato come sia strettamente necessario trovare alternative socialmente, economicamente e ambientalmente fattibili, trovando una sinergia tra i tre indicatori per poter scegliere il metodo migliore. Le tecnologie analizzate per la produzione di biogas da residui organici sono ampiamente utilizzate da tempo in Europa a differenza del Brasile che sta

iniziando ora a preoccuparsi del problema dei residui solidi. Dimostrazione di questa preoccupazione è la legge 12.305/2010 che stabilisce la Politica Nazionale sui Residui Solidi dove sono indicati i trattamenti migliori e la regolamentazione dei sistemi di gestione per lo smaltimento adeguato. Questa legge cerca di mettere ordine al grande problema dei rifiuti in Brasile ed è per questo che non prevede specifiche adeguate per il trattamento con tecnologie più sofisticate e di settore, ma riorganizza il sistema di raccolta e di classificazione generale. Il passo successivo sarà dunque quello di integrare la PNRS con regolamenti e alternative tecniche specifiche per il riutilizzo dei residui a scopo energetico basandosi su direttive già consolidate come quella Europea.



## 6. BIBLIOGRAFIA

ALVES, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos, 2000.

AMBIENTAIS, B. D. S. **Plano Municipal de Saneamento Basico de Timbó**. Timbó. 2012.

ANGELLA, O. technologygreenenergy-E-Online. **Energy Resources Biomass**, 19 January 2014. Disponivel em: <<http://technologygreenenergy-e-online.blogspot.com.br/2014/01/energy-resources-biomass.html>>. Acesso em: 25 April 2015.

APPELS, L. et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **ELSEVIER**, 13 June 2008. 755-781.

ARPA VENETO. La produzione e la raccolta differenziata. **arpa-veneto**, 27 fev. 2013. Disponivel em: <<http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/rifiuti/rifiuti-urbani/la-produzione-e-la-raccolta-differenziata>>. Acesso em: 31 maio 2015.

ATLAS. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**. [S.l.]. 2013.

BERGAMO, P. D. Osservatorio rifiuti interattivo. **Provincia di Bergamo**, 05 jun. 2015. Disponivel em: <[www.provincia.bergamo.it](http://www.provincia.bergamo.it)>. Acesso em: 05 jun. 2015.

BIOGAS3. **Quadro normativo e finanziario Europeo per la realizzazione di impianti a biogas su piccola scala nelle aziende del settore agroalimentare e delle bevande**. [S.l.]. 2014.

BP. **BP Statistical Review of World Energy**. London. 2014.

BRIZZO, F. Biogas: l'Italia è terzo produttore al mondo dopo Germania e Cina. **La Stampa**, 2015.

BRUNETTI, D. P. **Monitoraggio di digestori anaerobici semplificati alimentati con reflui zootecnici in Perù**. Politecnico di Milano. Milano, p. 2016. 2013.

CANNIZZARO, S. **La digestione anaerobica**. Catania. 2014.

CECCHI, F. et al. **Digestione anaerobica della frazione organica dei residui solidi**. APAT. [S.l.], p. 178. 2005.

CECCHI, F. et al. **Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi**. APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici. ROMA, p. 178. 2005.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. New York: McGraw-Hill, 1998.

CHERNICHARO. [S.l.]. 2007.

CRESPO, C. D. **ESTIMATIVAS DA POPULAÇÃO RESIDENTE NOS**. [S.l.]. 2014.

CUCCHI, P.; DE LUCA, R. **PGT - Torre de' Roveri**. Torre de' Roveri. 2009.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP**. Campinas. 2003.

ESC. **ESC Energy Solution Center**. Disponível em: <<http://www.energysolutionscenter.org/>>. Acesso em: 25 April 2015.

FICARA, E. et al. **Introduzione alla digestione anaerobica: il processo e gli impianti**. Milano. 2015.

GALBIATI, L. Ptere calorifico dei combustibili. In: GALBIATI, L. **Termotecnica**. [S.l.]: [s.n.], 2005. p. 243.

IBGE. **Censo Demografico**. Brasilia. 2010.

ILMETEO. Medie climatiche. **iLMeteo**, 2015. Disponível em: <[http://www.ilmeteo.it/portale/medie-climatiche/Torre+de%27+Roveri?refresh\\_ce](http://www.ilmeteo.it/portale/medie-climatiche/Torre+de%27+Roveri?refresh_ce)>. Acesso em: 04 jun. 2015.

IPCC. Chapter 3 Solid Waste Disposal. In: RIITTA PIPATTI, P. S. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. [S.l.]: IPCC, 2006. p. 40.

IPCC. **Climate Change 2014 Synthesis Report**. [S.l.]. 2014.

ISTAT. **Censimento demografico**. Roma. 2011.

LIER, J. B. V.; MAHMOUD, N. **Anaerobic Wastewater Treatmen**. [S.l.]. 2008.

LOMBARDIA, R. **La digestione anaerobica di rifiuti e biomasse: rassegna delle potenzialità specifiche di produzione di biogas**. Milano. 2013.

MALPEI, F.; CANZIANI, R. **Criteria di dimensionamento e tipologie di impianti per la produzione di biogas**. Politecnico di Milano. Milano, p. 56. 2011.

MANZALINI, F. **Biogas: cenni normativi**. Verona. 2012.

MORAES, P. B. **Digestão anaeróbia**. Limeira. 2008.

NARDELLI, P. **Impianto di trattamento anaerobico della F.O.R.S.U prodotta nel settore sud-occidentale della provincia di Trento**. Trento, p. 18. 2012.

NASO, V. **La macchina di Stirling**. [S.l.]: Ambrosiana, 1991.

REGIONE LOMBARDIA, R. **La digestione anaerobica di rifiuti e biomasse: rassegna delle potenzialità specifiche di produzione di biogas**. Milano. 2013.

REICHHALTER, H. et al. **Analisi energetica, ambientale ed economica di impianti a biogas in provincia di Bolzano**. TIS Innovation park, Area Energia & Ambiente. Bolzano, p. 106. 2011.

RONCAGLIA, G. **PGT - Comune di Albano Sant'Alessandro**. Albano Sant'Alessandro. 2011.

ROTA, F. S. **Indicatori sociali e di qualità della vita**. Torino. 2010.

SAMAE. **ECA - Estudo de Conformidade Ambiental**. Pomerode. 2014.

SEADI, T. A. **Biogas Handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.

SIMONETTI, F. **PGT - Comune di Pedrengo**. Pedrengo. 2009.

SOUZA, S. N. M. D.; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. **CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA EM CONJUNTO MOTOR GERADOR UTILIZANDO BIOGÁS DA SUINOCULTURA**. UNIOEST-CCET. Cascavel, p. 11. 2001.

SRL, S. L. G. P. utilizzo del biogas: cogenerazione e biometano. **San Lorenzo Green Power**. Disponivel em: <<http://www.greenpowersl.com/lazienda/utilizzo-del-biogas-cogenerazione-e-biometano/>>. Acesso em: 25 April 2015.

SUFRAMA. **PIB Produto Interno Bruto**. Brasilia. 2012.

TERUGGI, S. **Lavori di realizzazione di un trattamento anaerobico della F.O.R.S.U raccolta nel bacino di competenza di SRT**. SRT S.P.A Società Pubblica per il recupero ed il trattamento dei rifiuti. Alessandria, p. 34. 2010.

TOSETTI, P. **PGT - Brusaporto**. Brusaporto. 2010.

TRECCANI. Treccani.it. **Enciclopedia italiana Treccani**. Disponivel em: <<http://www.treccani.it/enciclopedia/risorse-naturali/>>.

UN. **Human Development Reports**. [S.l.]. 2014.

UN. Probabilistic Population Projections based on the World Population Prospects: The 2012 Revision. **United Nations, Department of Economic and Social Affairs**, 2014. Disponivel em: <<http://esa.un.org/unpd/ppp/Documentation/introduction.htm>>. Acesso em: 24 April 2015.

UOL. Câmbio. **UOL economia Cotações**, 2015. Disponivel em: <[www.economia.uol.com.br](http://www.economia.uol.com.br)>. Acesso em: 06 jun. 2015.

USDA. USDA's Foreign Agricultural Service and Global Trade Information Services data. **United States Departemnt of Agriculture**, 2005. Disponivel em: <<http://www.fas.usda.gov/data>>. Acesso em: 25 April 2015.

BRUNETTI, D. P. **Monitoraggio di digestori anaerobici semplificati alimentati con reflui zootecnici in Perù**. Politecnico di Milano. Milano, p. 2016. 2013.

CECCHI, F. et al. **Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi**.

APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici. ROMA, p. 178. 2005.

GALBIATI, L. Ptere calorifico dei combustibili. In: GALBIATI, L. **Termotecnica**. [S.l.]: [s.n.], 2005. p. 243.

MALPEI, F.; CANZIANI, R. **Criteri di dimensionamento e tipologie di impianti per la produzione di biogas**. Politecnico di Milano. Milano, p. 56. 2011.

NARDELLI, P. **Impianto di trattamento anaerobico della F.O.R.S.U prodotta nel settore sud-occidentale della provincia di Trento**. Trento, p. 18. 2012.

SOUZA, S. N. M. D.; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. **CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA EM CONJUNTO MOTOR GERADOR UTILIZANDO BIOGÁS DA SUINOCULTURA**. UNIOEST-CCET. Cascavel, p. 11. 2001.

TERUGGI, S. **Lavori di realizzazione di un trattamento anaerobico della F.O.R.S.U raccolta nel bacino di competenza di SRT.** SRT S.P.A Società Publica per il recupero ed il trattamento dei rifiuti. Alessandria, p. 34. 2010.

IBGE. Censo Demográfico 2000, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBGE. Censo Demográfico 2010, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Biodiversidade e Florestas - MMA/SBF (2002). **Biodiversidade brasileira: avaliação e identificação de áreas e ações prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade nos biomas brasileiros**, Brasília: MMA.

**Plano Diretor Municipal de Pomerode/SC – Volume 1 – Perfil e Diagnóstico, Quadros Prospectivos – Estratégias e Políticas, Diretrizes.** Junho de 2007. 322p.

**Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB Pomerode/SC, 2010.** 161p.

Prefeitura Municipal de Pomerode. **Gestão Municipal.** Disponível em: < <http://www.pomerode.sc.gov.br/GestaoMunicipal.asp?lang=pt>>. Acesso em: fev. 2014.

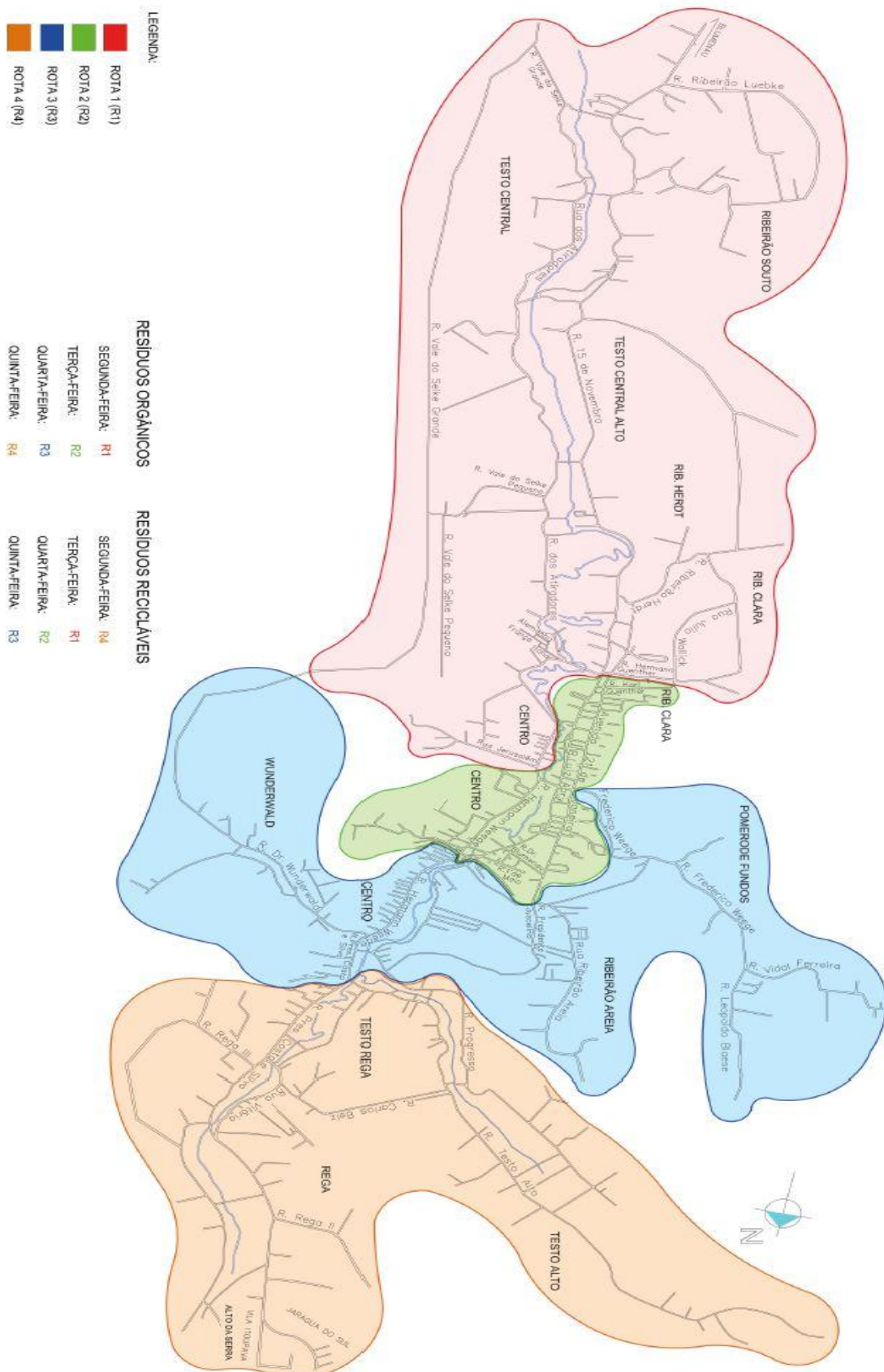
Prefeitura Municipal de Pomerode. **Pomerode.** Disponível em: < <http://www.pomerode.sc.gov.br/Sobre.asp?lang=pt>>. Acesso em: fev. 2014.

Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto – SAMAE Pomerode. **ETA's.** Disponível em: < <http://www.samaepomerode.com.br/index.php?pg=1041>>. Acesso em: fev. 2014.

SEBRAE. **Santa Catarina em Números: Pomerode.** Florianópolis: SEBRAE/SC, 2013. 133p.

SCHUMANN, J.C. **Estudo para o traçado de áreas de risco à inundação no município de Pomerode.** 2012. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2012.

# 7. APPENDICI



Appendice I – pag 78 - Percorso di raccolta rifiuti di Pomerode.

Anno	CARTA			VETRO			VERDE			ORGANICO			METALLI			PLASTICA			TOTALE Kg/anno
	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	
	Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		
2004	345.250	48,716	2004	212.450	29,977	2004	301.850	42,592	2004	374.510	52,845	2004	70.160	9,9	2004	75.580	10,665	1.379.800	
2005	375.720	51,967	2005	245.210	33,916	2005	316.210	43,736	2005	390.840	54,058	2005	65.390	9,044	2005	82.740	11,444	1.476.110	
2006	382.400	51,178	2006	258.600	34,609	2006	327.330	43,808	2006	404.220	54,098	2006	50.920	6,815	2006	87.210	11,672	1.510.680	
2007	383.480	50,089	2007	254.040	33,182	2007	342.740	44,768	2007	420.860	54,971	2007	51.250	6,694	2007	91.910	12,005	1.544.280	
2008	389.880	50,184	2008	261.250	33,627	2008	495.580	63,789	2008	434.820	55,969	2008	64.110	8,252	2008	95.100	12,241	1.740.740	
2009	416.920	52,542	2009	278.440	35,09	2009	485.060	61,129	2009	442.440	55,758	2009	67.260	8,476	2009	101.330	12,77	1.791.450	
2010	429.300	53,669	2010	274.780	34,352	2010	461.060	57,64	2010	466.220	58,285	2010	72.780	9,099	2010	92.480	11,561	1.796.620	
2011	462.480	57,716	2011	275.730	34,41	2011	391.940	48,913	2011	512.540	63,964	2011	67.360	8,406	2011	99.680	12,44	1.809.730	
2012	482.280	59,197	2012	272.500	33,448	2012	389.110	47,761	2012	521.240	63,979	2012	54.430	6,681	2012	104.710	12,853	1.824.270	
2013	457.240	54,957	2013	280.260	33,685	2013	372.340	44,752	2013	496.920	59,726	2013	41.730	5,016	2013	101.520	12,202	1.750.010	

Appendice II – pag 89 - Quantità di rifiuti raccolti ad Albano Sant’Alessandro.

Anno	CARTA			VETRO			VERDE			ORGANICO			METALLI			PLASTICA			TOTALE Kg/anno
	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	
	Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab. *anno)		
2004	178.320	39,469	2004	196.780	43,555	2004	33.280	7,366	2004	-	-	2004	70.910	15,695	2004	43.830	9,701	523.120	
2005	184.100	39,978	2005	227.100	49,316	2005	35.360	7,679	2005	-	-	2005	63.460	13,781	2005	44.540	9,672	554.560	
2006	200.420	42,176	2006	210.340	44,263	2006	38.140	8,026	2006	-	-	2006	62.180	13,085	2006	47.720	10,042	558.800	
2007	298.320	59,844	2007	183.930	36,897	2007	159.120	31,92	2007	292.960	58,768	2007	62.200	12,477	2007	72.500	14,544	1.069.030	
2008	329.880	63,955	2008	163.060	31,613	2008	227.300	44,067	2008	363.440	70,461	2008	86.800	16,828	2008	72.740	14,102	1.243.220	
2009	318.060	60,617	2009	159.380	30,375	2009	214.440	40,869	2009	362.400	69,068	2009	69.410	13,229	2009	70.120	13,364	1.193.810	
2010	311.689	58,271	2010	176.080	32,918	2010	221.360	41,383	2010	358.780	67,074	2010	56.390	10,542	2010	80.910	15,126	1.205.209	
2011	313.850	57,992	2011	177.640	32,823	2011	204.160	37,724	2011	371.320	68,61	2011	60.840	11,242	2011	98.630	18,224	1.226.440	
2012	307.580	56,005	2012	178.610	32,522	2012	237.265	43,202	2012	360.120	65,572	2012	51.770	9,426	2012	94.020	17,119	1.229.365	
2013	289.030	52,19	2013	178.490	32,23	2013	308.990	55,795	2013	371.440	67,071	2013	21.630	3,906	2013	89.300	16,125	1.258.880	



Anno	CARTA			VETRO			VERDE			ORGANICO			METALLI			PLASTICA			TOTALE LE KG/anno
	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	
	Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab *anno)		
2004	466.940	88,069	2004	245.980	46,394	2004	295.620	55,756	2004	330.490	62,333	2004	138.471	26,117	2004	123.640	23,32	1.601.141	
2005	455.980	85,662	2005	231.400	43,472	2005	285.440	53,624	2005	350.320	65,813	2005	125.739	23,622	2005	104.280	19,59	1.553.159	
2006	402.660	74,802	2006	256.130	47,581	2006	299.440	55,627	2006	351.240	65,25	2006	89.115	16,555	2006	117.450	21,819	1.516.035	
2007	435.840	80,741	2007	250.820	46,465	2007	294.460	54,55	2007	362.870	67,223	2007	80.310	14,878	2007	111.780	20,708	1.536.080	
2008	403.490	73,375	2008	290.160	52,766	2008	300.630	54,67	2008	386.130	70,218	2008	61.710	11,222	2008	118.600	21,568	1.560.720	
2009	408.640	73,709	2009	277.350	50,027	2009	319.040	57,547	2009	354.940	64,022	2009	63.860	11,519	2009	115.930	20,911	1.539.760	
2010	404.510	71,017	2010	275.330	48,337	2010	310.590	54,528	2010	359.230	63,067	2010	57.920	10,169	2010	125.140	21,97	1.532.720	
2011	397.670	68,481	2011	242.500	41,76	2011	367.030	63,205	2011	376.750	64,879	2011	62.390	10,744	2011	96.600	16,635	1.542.940	
2012	387.360	65,146	2012	250.570	42,141	2012	360.460	60,622	2012	393.100	66,112	2012	46.130	7,758	2012	98.690	16,598	1.536.310	
2013	350.450	58,272	2013	239.960	39,9	2013	407.900	67,825	2013	395.310	65,732	2013	46.370	7,71	2013	100.370	16,689	1.540.360	

Anno	CARTA			VERDE			ORGANICO			METALLI			PLASTICA			TOTALE
	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	Comune		Anno	
	Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab*anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab*anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab*anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab*anno)		Totale (Kg/anno)	Procapite (Kg/ab*anno)		
2004	114.800	52,903	2004	83.050	38,272	2004	80.640	37,161	2004	125.410	57,793	2004	19.310	8,899	423.210	
2005	113.680	51,909	2005	79.840	36,457	2005	97.570	44,553	2005	125.490	57,301	2005	21.240	9,699	439.900	
2006	133.050	60,92	2006	82.100	37,592	2006	103.600	47,436	2006	113.070	51,772	2006	22.510	10,307	454.330	
2007	125.500	56,303	2007	89.560	40,179	2007	111.020	49,807	2007	108.560	48,703	2007	23.860	10,704	461.450	
2008	121.940	53,813	2008	104.450	46,094	2008	134.600	59,4	2008	115.480	50,962	2008	25.200	11,121	503.700	
2009	120.960	52,614	2009	91.610	39,848	2009	130.520	56,773	2009	132.950	57,829	2009	25.370	11,035	501.450	
2010	129.170	56,381	2010	96.220	41,999	2010	100.550	43,889	2010	121.810	53,169	2010	33.090	14,443	480.840	
2011	118.480	51,113	2011	96.070	41,445	2011	93.480	40,328	2011	117.430	50,66	2011	35.920	15,496	461.400	
2012	127.010	54,231	2012	97.300	41,546	2012	82.980	35,431	2012	120.360	51,392	2012	36.390	15,538	492.550	
2013	121.150	51,183	2013	100.980	42,662	2013	94.890	40,089	2013	116.400	49,176	2013	41.130	17,376	493.110	

Anno residui	t residui entranti	Organico	triagem	%org	%triagem	A	B	C	D	E	COD [tC/residuo]	L <sub>0</sub> [tCH <sub>4</sub> /residuo]	L <sub>0</sub> [kgCH <sub>4</sub> /tr esiduo]	L <sub>0</sub> [Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / residuo]
2003	724,87	583,69	141,18	0,81	0,19	0,064921	0,604	0,282	0,000	0,065	0,216945	0,122502	122,5016	170,9245
2004	969,80	784,88	184,92	0,81	0,19	0,063559	0,607	0,283	0,000	0,064	0,216642	0,12233	122,3305	170,6857
2005	1.214,72	986,07	228,66	0,81	0,19	0,062746	0,609	0,284	0,000	0,063	0,216461	0,122228	122,2283	170,5432
2006	1.459,65	1.187,25	272,40	0,81	0,19	0,062206	0,610	0,285	0,000	0,062	0,216341	0,12216	122,1605	170,4486
2007	1.704,58	1.388,44	316,14	0,81	0,19	0,061821	0,611	0,285	0,000	0,062	0,216255	0,122112	122,1121	170,3811
2008	1.949,51	1.589,63	359,88	0,82	0,18	0,061533	0,612	0,285	0,000	0,062	0,216191	0,122076	122,0759	170,3306
2009	2.194,44	1.790,82	403,62	0,82	0,18	0,061309	0,612	0,286	0,000	0,061	0,216141	0,122048	122,0478	170,2913
2010	2.715,39	2.218,92	496,47	0,82	0,18	0,060945	0,613	0,286	0,000	0,061	0,21606	0,122002	122,0021	170,2275
2011	2.885,79	2.358,84	526,95	0,82	0,18	0,060867	0,613	0,286	0,000	0,061	0,216043	0,121992	121,9922	170,2138
2012	3.062,42	2.503,88	558,54	0,82	0,18	0,060795	0,613	0,286	0,000	0,061	0,216027	0,121983	121,9831	170,2011
2013	3.245,46	2.654,19	591,26	0,82	0,18	0,060727	0,613	0,286	0,000	0,061	0,216012	0,121975	121,9747	170,1893
2014	3.435,11	2.809,94	625,17	0,82	0,18	0,060665	0,614	0,286	0,000	0,061	0,215998	0,121967	121,9668	170,1783
2015	3.631,57	2.971,29	660,29	0,82	0,18	0,060606	0,614	0,286	0,000	0,061	0,215985	0,121959	121,9594	170,1681
2016	3.835,06	3.138,41	696,65	0,82	0,18	0,060551	0,614	0,286	0,000	0,061	0,215973	0,121953	121,9526	170,1584
2017	4.045,79	3.311,48	734,31	0,82	0,18	0,0605	0,614	0,286	0,000	0,060	0,215961	0,121946	121,9461	170,1494
2018	4.263,98	3.490,69	773,29	0,82	0,18	0,060452	0,614	0,287	0,000	0,060	0,21595	0,12194	121,94	170,141
2019	4.489,85	3.676,21	813,64	0,82	0,18	0,060406	0,614	0,287	0,000	0,060	0,21594	0,121934	121,9343	170,133
2020	4.723,65	3.868,25	855,40	0,82	0,18	0,060363	0,614	0,287	0,000	0,060	0,215931	0,121929	121,9289	170,1255
2021	4.965,61	4.066,99	898,62	0,82	0,18	0,060323	0,614	0,287	0,000	0,060	0,215922	0,121924	121,9238	170,1184
2022	5.215,97	4.272,64	943,32	0,82	0,18	0,060284	0,614	0,287	0,000	0,060	0,215913	0,121919	121,919	170,1117
2023	5.474,99	4.485,42	989,57	0,82	0,18	0,060248	0,614	0,287	0,000	0,060	0,215905	0,121914	121,9145	170,1053
2024	5.742,94	4.705,53	1037,41	0,82	0,18	0,060214	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215898	0,12191	121,9101	170,0993
2025	6.020,08	4.933,20	1086,88	0,82	0,18	0,060181	0,615	0,287	0,000	0,060	0,21589	0,121906	121,906	170,0935
2026	6.306,68	5.168,65	1138,04	0,82	0,18	0,06015	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215883	0,121902	121,9021	170,0881
2027	6.603,04	5.412,11	1190,92	0,82	0,18	0,06012	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215877	0,121898	121,8984	170,0828
2028	6.909,43	5.663,83	1245,60	0,82	0,18	0,060092	0,615	0,287	0,000	0,060	0,21587	0,121895	121,8948	170,0779
2029	7.226,17	5.924,06	1302,11	0,82	0,18	0,060065	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215864	0,121891	121,8914	170,0731
2030	7.553,56	6.193,04	1360,52	0,82	0,18	0,060039	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215859	0,121888	121,8882	170,0686
2031	7.891,91	6.471,03	1420,88	0,82	0,18	0,060014	0,615	0,287	0,000	0,060	0,215853	0,121885	121,8851	170,0643

Appendice VI – pag 104 calcolo delle emissioni di CH<sub>4</sub> previste nella discarica di Timbò.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
	12389.8	11210.7	10143.9	9178.6	8305.1	7514.8	6799.6	6152.6	5567.1	5037.3	4557.9	4124.2	3731.7	3376.6	3055.3	2764.5	2501.4	2263.4	2048.0	1853.1	1676.8	1517.2	1372.8
	0.0	16553.0	14977.8	13552.5	12262.8	11095.8	10039.9	9084.5	8220.0	7437.7	6730.0	6089.5	5510.0	4985.7	4511.2	4081.9	3693.5	3342.0	3024.0	2736.2	2475.8	2240.2	2027.0
	0.0	0.0	20716.3	18744.9	16961.1	15347.0	13886.5	12565.1	11369.3	10287.4	9308.4	8422.6	7621.1	6985.9	6239.6	5645.8	5108.6	4622.4	4182.5	3784.5	3424.4	3098.5	2803.6
	0.0	0.0	0.0	24879.5	22511.9	20369.7	18431.2	16877.3	15090.2	13664.2	12354.8	11179.1	10115.3	9152.7	8281.7	7493.6	6780.5	6135.2	5551.4	5023.1	4545.1	4112.6	3721.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	29042.8	26279.0	23778.2	21515.4	19468.0	17615.4	15939.0	14422.2	13049.8	11807.9	10684.3	9667.5	8747.5	7915.1	7161.9	6480.3	5863.6	5305.6	4800.7
	0.0	0.0	0.0	0.0	33206.1	27186.8	24599.7	22258.7	20140.5	18223.9	16489.7	14920.5	13500.6	12215.8	11053.3	10001.5	9048.7	8188.5	7409.3	6704.2	6066.2	5490.2	4966.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37389.3	33813.2	30595.4	27683.9	25049.4	22665.7	20508.7	18557.1	16791.1	15193.2	13747.4	12439.2	11255.4	10184.3	9215.2	8338.2	7544.7
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46223.3	41824.6	37844.5	34243.1	30984.4	28035.9	25367.9	22953.8	20769.5	18793.0	17004.6	15386.4	13922.2	12597.3	11398.5	10313.8
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	49120.1	44445.7	40216.2	36389.1	32926.2	29792.9	26957.7	24392.3	22071.1	19970.8	18070.3	16350.7	14794.7	13386.8	12112.9
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52122.7	47162.5	42674.4	38613.4	34938.9	31614.0	28605.5	25883.3	23420.2	21191.5	19174.9	17350.1	15699.0	14205.1
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	55234.2	49978.0	45221.9	40918.5	37024.6	33501.2	30313.2	27428.5	24818.3	22456.5	20319.5	18385.9	16636.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58458.1	52895.1	47861.4	43306.8	39185.6	35456.6	32082.5	29029.4	26286.9	23767.3	21505.5	19459.0	17636.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61797.8	55916.9	50595.7	45780.9	41424.3	37482.2	33915.3	30687.9	27767.5	25125.1	22734.1
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	65256.8	59046.8	53427.8	48343.5	43743.0	39580.3	35813.7	32405.6	29321.8	26531.5
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	68838.9	62288.0	56360.5	50997.1	46144.1	41752.9	37779.6	34184.4	30931.3	28009.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	72547.8	65643.9	59397.1	53744.7	48630.2	44002.4	39815.1	36026.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	76387.2	69118.0	62540.6	56589.1	51203.9	46331.2	41922.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80361.3	72713.9	65794.3	59533.1	53867.8	48741.6
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	84474.1	76435.3	69161.5	62579.9	56624.7
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88729.7	80286.0	72645.7	65732.6
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTNm3																							
CH4	12389.8	27763.7	45837.9	66355.4	89083.7	113812.3	140351.0	173216.2	205854.4	238387.4	270936.1	303611.2	336516.5	369749.6	403402.2	437561.1	472308.9	507724.1	543881.9	580854.4	618711.3	657520.2	697346.5

Appendice VI – pag 104 calcolo delle emissioni di CH<sub>4</sub> previste nella discarica di Timbò.

	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
1242.2	1124.0	1017.0	920.2	832.7	753.4	681.7	616.8	558.1	505.0	457.0	413.5	374.1	338.5	306.3	277.2	250.8	226.9	205.3	185.8	168.1	152.1	137.6	124.5	112.7	
1834.1	1659.6	1501.7	1358.8	1229.5	1112.5	1006.6	910.8	824.1	745.7	674.7	610.5	552.4	499.9	452.3	409.2	370.3	335.1	303.2	274.3	248.2	224.6	203.2	183.9	166.4	
2536.8	2285.4	2077.0	1879.3	1700.5	1538.7	1392.2	1259.8	1139.9	1031.4	933.3	844.4	764.1	691.4	625.6	566.0	512.2	463.4	419.3	379.4	343.3	310.7	281.1	254.3	230.1	
3367.1	3046.7	2756.7	2494.4	2257.0	2042.2	1847.9	1672.0	1512.9	1369.0	1238.7	1120.8	1014.1	917.6	830.3	751.3	679.8	615.1	556.6	503.6	457.7	412.3	373.1	337.6	305.5	
4343.9	3930.5	3556.5	3218.0	2911.8	2634.7	2384.0	2157.1	1951.8	1766.1	1598.0	1446.0	1308.4	1183.8	1071.2	969.3	877.0	793.6	718.0	649.7	587.9	531.9	481.3	435.5	394.1	
5488.9	4966.6	4494.0	4066.3	3679.3	3329.2	3012.4	2725.7	2466.3	2231.6	2019.3	1827.1	1653.2	1495.9	1353.6	1224.7	1108.2	1002.7	907.3	821.0	742.8	672.2	608.2	550.3	497.9	
6826.8	6177.1	5589.3	5057.4	4576.1	4140.6	3746.6	3390.1	3067.5	2775.6	2511.4	2272.4	2056.2	1860.5	1683.5	1523.3	1378.3	1247.1	1128.5	1021.1	923.9	836.0	756.4	684.4	619.3	
9332.3	8444.2	7640.7	6913.6	6255.6	5660.3	5121.7	4634.3	4193.3	3794.2	3433.2	3106.5	2810.8	2543.4	2301.3	2082.3	1884.2	1704.9	1542.6	1395.8	1263.0	1142.8	1034.1	935.6	846.6	
10860.2	9917.2	8973.4	8119.5	7348.8	6647.7	6015.1	5442.7	4924.7	4456.1	4032.0	3648.3	3301.1	2987.0	2702.7	2445.5	2212.8	2002.2	1811.7	1639.3	1483.3	1342.1	1214.4	1098.9	994.3	
12853.3	11630.1	10523.4	9521.9	8615.8	7795.9	7054.0	6382.8	5775.4	5225.8	4728.5	4278.5	3871.3	3502.9	3169.6	2868.0	2595.0	2348.1	2124.6	1922.4	1739.5	1574.0	1424.2	1288.7	1166.0	
15053.1	13620.6	12324.4	11151.6	10090.4	9130.1	8261.3	7475.1	6763.8	6120.1	5537.7	5010.7	4533.9	4102.4	3712.0	3358.8	3039.2	2749.9	2488.3	2251.5	2037.2	1843.3	1667.9	1509.2	1365.6	
17607.2	15931.7	14415.6	13043.8	11802.5	10679.3	9663.1	8743.5	7911.4	7158.6	6477.3	5860.9	5303.2	4798.5	4341.9	3928.7	3544.8	3216.6	2910.5	2633.5	2382.9	2156.1	1950.9	1765.3	1597.3	
20570.7	18613.1	16841.9	15239.1	13788.9	12476.8	11289.4	10215.1	9243.0	8363.4	7567.5	6847.4	6195.8	5606.2	5072.7	4589.9	4153.2	3757.9	3400.3	3076.7	2783.9	2519.0	2279.3	2062.4	1866.1	
24006.7	21722.1	19655.0	17784.6	16092.1	14560.8	13175.1	11921.3	10786.9	9760.4	8831.6	7991.1	7230.7	6542.6	5920.0	5366.6	4846.9	4385.6	3988.3	3590.6	3248.9	2939.8	2660.0	2406.9	2177.8	
27987.8	25324.4	22914.5	20733.9	18760.8	16975.5	15360.0	13898.3	12575.7	11379.0	10296.1	9316.3	8429.8	7627.6	6901.7	6244.9	5650.6	5112.9	4626.4	4186.1	3787.7	3427.3	3101.1	2806.0	2539.0	
32597.8	29495.7	26688.8	24149.1	21851.0	19771.6	17890.1	16187.6	14647.1	13253.3	11992.1	10850.9	9818.3	8833.9	8038.5	7273.6	6581.4	5955.1	5388.4	4875.6	4411.6	3991.8	3611.9	3268.2	2957.2	
37932.8	34323.0	31056.7	28101.3	25427.1	23007.4	20818.0	18836.9	17044.3	15422.3	13954.7	12626.7	11425.1	10337.9	9354.1	8463.9	7658.5	6929.7	6270.2	5673.6	5133.6	4645.1	4203.1	3803.1	3441.2	
44103.2	39906.3	36108.7	32672.5	29563.3	26750.0	24204.4	21901.0	19816.9	17931.0	16224.7	14680.7	13283.6	12019.5	10875.7	9840.8	8904.3	8056.9	7290.2	6596.5	5968.7	5400.7	4886.8	4421.7	4001.0	
51236.1	46360.4	41948.6	37956.7	34344.6	31076.3	28119.0	25443.1	23021.9	20831.1	18848.7	17055.0	15432.0	13963.5	12634.7	11432.3	10344.4	9360.0	8469.3	7663.3	6934.1	6274.2	5677.1	5136.9	4648.0	
59477.3	53817.3	48895.9	44061.9	39868.8	36074.8	32641.8	29535.6	26724.9	24181.7	21880.5	19798.3	17914.2	16209.5	14666.9	13271.2	12008.3	10865.5	9831.5	8895.9	8049.4	7283.4	6590.3	5963.1	5395.7	
68994.3	62428.6	56487.7	51112.2	46248.3	41847.1	37864.9	34261.5	31001.1	28051.0	25381.6	22962.8	20780.7	18803.1	17013.8	15394.7	13929.7	12604.1	11404.7	10319.4	9327.4	8448.8	7644.8	6917.3	6259.0	
79979.3	72368.3	65481.6	59250.2	53611.8	48509.9	43893.6	39716.6	35937.0	32517.2	29422.8	26622.8	24089.3	21796.9	19722.7	17845.8	16147.6	14610.9	13220.5	11962.4	10824.0	9794.0	8862.0	8018.6	7255.6	
92653.2	83836.1	75858.0	68639.2	62107.3	56197.0	50849.2	46010.2	41631.8	37670.0	34085.2	30841.6	27906.6	25250.9	22848.0	20673.7	18706.4	16926.2	15315.5	13858.0	12539.2	11346.0	10286.3	9289.3	8405.3	
107289.1	97061.1	87824.5	79486.7	71904.7	65062.0	58870.6	52885.3	48199.1	43612.4	39462.1	35706.8	32308.8	29234.3	26452.2	23935.0	21657.3	19596.3	17311.5	16044.1	14517.3	13135.8	11885.8	10754.9	9731.2	
0	112306.3	101619.0	91948.7	83198.6	75281.2	68117.2	61635.0	55769.7	50462.5	45660.3	41315.2	37383.5	33826.0	30607.0	27694.0	25059.8	22874.3	20516.5	18564.1	16795.5	15199.0	13752.6	12443.9	11259.7	
0	0	117514.2	106331.2	96212.5	87056.6	78772.1	71276.0	64493.1	58355.8	52802.5	47777.7	43231.1	39111.6	35394.6	32026.4	28978.6	26221.0	23757.0	21467.9	19425.0	17576.4	15903.8	14390.4	13029.0	
0	0	0	122897.8	111202.5	100620.2	91044.9	82380.8	74541.3	67447.7	61029.2	55221.5	49966.5	45228.9	40909.1	37016.1	33493.5	30306.2	27422.2	24812.6	22451.4	20314.9	18381.6	16632.4	15049.6	
0	0	0	0	128462.3	116237.5	105176.0	95167.2	86110.9	77916.3	70501.6	63792.5	57721.8	52228.9	47258.6	42761.4	38692.1	35010.1	31678.4	28663.8	25936.1	23467.9	21234.7	19213.9	17385.5	
0	0	0	0	0	134213.2	121441.1	109884.5	99427.6	89965.8	81404.4	73657.8	66648.3	60305.9	54567.0	49374.3	44675.7	40424.2	36577.4	33096.6	29947.0	27097.2	24518.5	22185.3	20074.1	
738254.3	780306.5	823564.7	869039.9	913942.5	961182.6	869713.9	786949.7	712061.6	644299.9	582986.7	527508.2	477309.1	431887.2	390787.7	353599.3	319949.9	289502.6	261952.6	237024.7	214468.8	194059.4	175592.2	158882.4	143762.7	

Appendice VI – pag 104 calcolo delle emissioni di CH<sub>4</sub> previste nella discarica di Timbò.

	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075
102,0	92,3	83,5	75,5	68,3	61,8	56,0	50,6	45,8	41,5	37,5	33,9	30,7	27,8	25,1	22,8	20,6	18,6	16,9	15,3	13,8	12,5	11,3	10,2	9,3	
150,6	136,2	123,3	111,5	100,9	91,3	82,6	74,8	67,6	61,2	55,4	50,1	45,3	41,0	37,1	33,6	30,4	27,5	24,9	22,5	20,4	18,4	16,7	15,1	13,7	
208,2	188,4	170,5	154,3	139,6	126,3	114,3	103,4	93,6	84,7	76,6	69,3	62,7	56,8	51,4	46,5	42,0	38,0	34,4	31,1	28,2	25,5	23,1	20,9	18,9	
276,4	250,1	226,3	204,8	185,3	167,6	151,7	137,2	124,2	112,4	101,7	92,0	83,2	75,3	68,2	61,7	55,8	50,5	45,7	41,3	37,4	33,8	30,6	27,7	25,1	
356,6	322,6	291,9	264,2	239,0	216,3	195,7	177,1	160,2	145,0	131,2	118,7	107,4	97,2	87,9	79,6	72,0	65,1	58,9	53,3	48,3	43,7	39,5	35,7	32,3	
450,6	407,7	368,9	333,8	302,0	273,3	247,3	223,7	202,4	183,2	165,8	150,0	135,7	122,8	111,1	100,5	91,0	82,3	74,5	67,4	61,0	55,2	49,9	45,2	40,9	
560,4	507,0	458,8	415,1	375,6	339,9	307,5	278,3	251,8	227,8	206,2	186,5	168,8	152,7	138,2	125,0	113,1	102,4	92,6	83,8	75,8	68,6	62,1	56,2	50,8	
766,0	693,1	627,2	567,5	513,5	464,6	420,4	380,4	344,2	311,5	281,8	255,0	230,7	208,8	188,9	170,9	154,7	139,9	126,6	114,6	103,7	93,8	84,9	76,8	69,5	
899,7	814,1	736,6	666,5	603,1	545,7	493,7	446,8	404,2	365,8	331,0	299,5	271,0	245,2	221,9	200,7	181,6	164,4	148,7	134,6	121,8	110,2	99,7	90,2	81,6	
1055,1	954,7	863,8	781,6	707,2	639,9	579,0	523,9	474,1	429,0	386,1	351,2	317,8	287,5	260,2	235,4	213,0	192,7	174,4	157,8	142,8	128,2	116,9	105,8	95,7	
1235,6	1118,0	1011,6	915,4	828,3	749,4	678,1	613,6	555,2	502,4	454,6	411,3	372,2	336,7	304,7	275,7	249,5	225,7	204,2	184,8	167,2	151,3	136,9	123,9	112,1	
1445,3	1307,8	1183,3	1070,7	968,8	876,6	793,2	717,7	649,4	587,6	531,7	481,1	435,3	393,9	356,4	322,5	291,8	264,0	238,9	216,2	195,6	177,0	160,1	144,9	131,1	
1688,5	1527,9	1382,5	1250,9	1131,9	1024,2	926,7	838,5	758,7	686,5	621,2	562,1	508,6	460,2	416,4	376,8	340,9	306,5	279,1	252,6	228,5	206,8	187,1	169,3	153,2	
1970,6	1783,1	1613,4	1459,8	1320,9	1195,2	1081,5	978,6	885,4	801,2	724,9	656,0	593,5	537,0	485,9	439,7	397,9	360,0	325,7	294,7	266,7	241,3	218,3	197,6	178,8	
2297,4	2078,8	1880,9	1701,9	1540,0	1393,4	1260,8	1140,8	1032,3	934,0	845,2	764,7	692,0	626,1	566,5	512,6	463,8	419,7	379,8	343,6	310,9	281,3	254,6	230,3	208,4	
2675,8	2421,2	2190,8	1992,3	1793,6	1622,9	1468,5	1328,8	1202,3	1087,9	984,4	890,7	805,9	729,2	659,8	597,0	540,2	488,8	442,3	400,2	362,1	327,7	296,5	266,3	242,7	
3113,7	2817,4	2549,3	2306,7	2087,2	1888,6	1708,8	1546,2	1399,1	1265,9	1145,5	1036,5	937,8	848,6	767,8	694,8	628,6	568,8	514,7	465,7	421,4	381,3	345,0	312,2	282,5	
3620,2	3275,7	2964,0	2681,9	2426,7	2195,8	1988,8	1797,7	1626,7	1471,9	1331,8	1205,1	1090,4	986,6	892,7	807,8	730,9	661,4	598,4	541,5	489,9	443,3	401,1	363,0	328,4	
4205,7	3805,5	3443,3	3115,7	2819,2	2550,9	2308,1	2088,5	1898,8	1709,9	1547,2	1400,0	1266,7	1146,2	1037,1	938,4	849,1	768,3	695,2	629,0	569,2	515,0	466,0	421,7	381,5	
4882,2	4417,6	3997,2	3616,8	3272,6	2961,2	2679,4	2424,4	2193,7	1985,0	1796,1	1625,1	1470,5	1330,6	1203,9	1089,4	985,7	891,9	807,0	730,2	660,7	597,9	541,0	489,5	442,9	
5663,4	5124,5	4636,8	4195,5	3796,3	3435,0	3108,1	2812,4	2544,7	2302,6	2083,4	1885,2	1705,8	1543,5	1396,6	1263,7	1143,4	1034,6	936,2	847,1	766,5	693,5	627,5	567,8	513,8	
6565,1	5940,4	5375,1	4863,5	4400,7	3981,9	3603,0	3260,1	2949,9	2669,2	2415,2	2185,3	1977,4	1789,2	1618,9	1464,9	1325,5	1195,3	1085,2	981,9	888,5	803,9	727,4	658,2	595,6	
7605,4	6881,7	6226,8	5634,2	5098,1	4612,9	4174,0	3776,7	3417,3	3092,1	2797,9	2531,6	2290,7	2072,7	1875,5	1697,0	1535,5	1389,4	1257,2	1137,5	1029,3	931,3	842,7	762,5	689,9	
8805,2	7967,3	7209,1	6523,0	5902,3	5340,6	4832,4	4372,5	3956,4	3579,9	3239,2	2931,0	2652,1	2399,7	2171,3	1964,7	1777,7	1608,6	1485,5	1370,0	1191,7	1078,3	975,6	882,8	798,4	
10188,2	9218,7	8341,4	7547,6	6829,4	6179,5	5591,4	5059,3	4577,9	4142,2	3748,0	3391,4	3068,6	2776,6	2512,4	2273,3	2057,0	1861,2	1694,1	1523,8	1378,8	1247,6	1128,9	1021,5	924,3	
11781,8	10660,6	9646,2	8728,2	7897,6	7146,0	6466,0	5850,7	5293,9	4790,1	4334,3	3921,4	3548,9	3210,9	2905,4	2628,9	2378,7	2152,3	1947,5	1762,2	1594,5	1442,8	1305,5	1181,2	1068,8	
13617,5	12321,6	11149,0	10088,1	9128,1	8259,4	7473,4	6762,2	6118,7	5536,4	5009,6	4532,9	4101,5	3711,2	3358,0	3038,5	2749,3	2487,7	2251,0	2036,7	1842,9	1667,5	1508,9	1365,3	1235,3	
15731,0	14234,0	12879,5	11653,8	10544,8	9541,4	8633,4	7811,8	7068,4	6395,8	5787,1	5236,4	4738,1	4287,2	3879,2	3510,1	3176,0	2873,8	2600,3	2352,9	2129,0	1926,4	1743,0	1577,2	1427,1	
18163,8	16435,3	14871,2	13456,1	12175,5	11016,9	9968,5	9019,9	8161,5	7384,8	6682,1	6046,2	5470,8	4950,2	4479,1	4052,9	3667,2	3318,2	3002,5	2716,7	2488,2	2224,3	2012,6	1821,1	1647,8	
130081,9	117703,0	106502,1	96367,1	87196,5	78898,7	71390,5	64596,8	58449,6	52887,4	47854,5	43300,5	39179,9	35451,5	32077,8	29025,2	26263,1	23763,8	21502,4	19456,2	17604,7	15929,4	14413,5	13041,9	11800,8	

Appendice VI – pag 104 calcolo delle emissioni di CH<sub>4</sub> previste nella discarica di Timbò.

	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100
8.4	7.6	6.9	6.2	5.1	5.6	5.1	4.6	4.2	3.8	3.4	3.1	2.8	2.5	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8
12.4	11.2	10.1	9.2	8.3	7.5	7.5	6.8	6.1	5.6	5.0	4.5	4.1	3.7	3.4	3.0	2.8	2.5	2.3	2.0	1.8	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1
17.1	15.5	14.0	12.7	11.5	10.4	9.4	8.5	7.7	7.1	6.9	6.3	5.7	5.1	4.7	4.2	3.8	3.5	3.1	2.8	2.6	2.3	2.1	1.9	1.7	1.6
22.7	20.5	18.6	16.8	15.2	13.8	12.5	11.3	10.2	10.2	9.2	8.3	7.6	6.8	6.2	5.6	5.1	4.6	4.1	3.8	3.4	3.1	2.8	2.5	2.3	2.1
29.3	26.5	24.0	21.7	19.6	17.8	16.1	14.5	13.2	13.2	11.9	10.8	9.7	8.8	8.0	7.2	6.5	5.9	5.3	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.9	2.7
37.0	33.5	30.3	27.4	24.8	22.4	20.3	18.4	16.6	16.6	15.0	13.6	12.3	11.1	10.1	9.1	8.3	7.5	6.8	6.1	5.5	5.0	4.5	4.1	3.7	3.4
46.0	41.6	37.7	34.1	30.8	27.9	25.2	22.8	20.7	18.7	16.9	15.3	13.9	12.5	11.3	10.3	9.3	8.4	7.6	6.9	6.2	5.6	5.1	4.6	4.2	4.2
62.9	56.9	51.5	46.6	42.2	38.1	34.5	31.2	28.3	25.6	23.1	20.9	18.9	17.1	15.5	14.0	12.7	11.5	10.4	9.4	8.5	7.7	7.0	6.3	5.7	5.7
73.8	66.8	60.5	54.7	49.5	44.8	40.5	36.7	33.2	30.0	27.2	24.6	22.2	20.1	18.2	16.5	14.9	13.5	12.2	11.0	10.0	9.0	8.2	7.4	6.7	6.7
86.6	78.4	70.9	64.2	58.1	52.5	47.5	43.0	38.9	35.2	31.9	28.8	26.1	23.6	21.4	19.3	17.5	15.8	14.3	13.0	11.7	10.6	9.6	8.7	7.9	7.9
101.4	91.8	83.0	75.1	68.0	61.5	55.7	50.4	45.6	41.2	37.3	33.8	30.5	27.6	25.0	22.6	20.5	18.5	16.8	15.2	13.7	12.4	11.2	10.2	9.2	9.2
118.6	107.3	97.1	87.9	79.5	72.0	65.1	58.9	53.3	48.2	43.6	39.5	35.7	32.3	29.3	26.5	24.0	21.7	19.6	17.7	16.1	14.5	13.1	11.9	10.8	10.8
138.6	125.4	113.5	102.7	92.9	84.1	76.1	68.8	62.3	56.4	51.0	46.1	41.7	37.8	34.2	30.9	28.0	25.3	22.9	20.7	18.8	17.0	15.4	13.9	12.6	12.6
161.8	146.4	132.4	119.8	108.4	98.4	88.8	80.3	72.7	65.8	59.5	53.8	48.7	44.1	40.1	36.9	34.1	31.2	28.6	26.7	24.2	21.9	19.8	17.9	16.2	14.7
188.6	170.6	154.4	139.7	126.4	114.4	103.5	93.6	84.7	76.7	69.4	62.8	56.8	51.4	46.5	42.1	38.1	34.5	31.2	28.2	25.5	23.1	20.9	18.9	17.1	17.1
219.6	198.7	179.8	162.7	147.2	133.2	120.5	109.1	98.7	89.3	80.8	73.1	66.2	59.9	54.2	49.0	44.3	40.1	36.3	32.9	29.7	26.9	24.3	22.0	19.9	19.9
255.6	231.3	209.3	189.3	171.3	155.0	140.3	126.9	114.8	103.9	94.0	85.1	77.0	69.7	63.0	57.0	51.6	46.7	42.2	38.2	34.6	31.3	28.3	25.6	23.2	23.2
297.2	268.9	243.3	220.1	199.2	180.2	163.1	147.6	133.5	120.8	109.3	98.9	89.5	81.0	73.3	66.3	60.0	54.3	49.1	44.4	40.2	36.4	32.9	29.8	27.0	27.0
345.2	312.4	282.6	255.7	231.4	209.4	189.5	171.4	155.1	140.4	127.0	114.9	104.0	94.1	85.1	77.0	69.7	63.1	57.1	51.6	46.7	42.3	38.3	34.6	31.3	31.3
400.8	362.6	328.1	296.9	268.6	243.1	219.9	199.0	180.1	162.9	147.4	133.4	120.7	109.2	98.8	89.4	80.9	73.2	66.2	60.2	54.2	49.1	44.4	40.2	36.4	36.4
464.9	420.6	380.6	344.4	311.6	282.0	255.1	230.9	208.9	189.0	171.0	154.7	140.0	126.7	114.6	103.7	93.9	84.9	76.8	69.5	62.9	56.9	51.5	46.6	42.2	42.2
538.9	487.6	441.2	399.2	361.2	326.9	295.8	267.6	242.1	219.1	198.2	179.4	162.3	146.9	132.9	120.2	108.8	98.4	89.1	80.6	72.9	66.0	59.7	54.0	48.9	48.9
624.3	564.9	511.1	462.5	418.5	378.7	342.6	310.0	280.5	253.8	229.7	207.8	188.0	170.1	153.9	139.3	126.0	114.0	103.2	93.4	84.5	76.4	69.2	62.6	56.6	56.6
722.8	654.0	591.8	535.4	484.5	436.4	396.7	358.9	324.8	293.9	265.9	240.6	217.7	197.0	178.2	161.3	145.9	132.0	119.5	108.1	97.8	88.5	80.1	72.5	65.6	65.6
836.3	756.7	684.7	619.5	560.6	507.2	459.0	415.3	375.8	340.0	307.7	278.4	251.9	227.9	206.2	186.6	168.8	152.8	138.2	125.1	113.2	102.4	92.7	83.8	75.9	75.9
967.1	875.1	791.8	716.5	648.3	586.6	530.8	480.3	434.6	393.2	355.8	321.9	291.3	263.6	238.5	215.8	195.3	176.7	159.9	144.6	130.9	118.4	107.2	97.0	87.7	87.7
1117.8	1011.4	915.2	828.1	749.3	678.0	613.5	555.1	502.3	454.5	411.2	372.1	336.7	304.6	275.6	249.4	225.7	204.2	184.8	167.2	151.3	136.9	123.9	112.1	101.4	101.4
1291.3	1168.4	1057.2	956.6	865.6	783.2	708.7	641.2	580.2	525.0	475.0	429.8	388.9	351.9	318.4	288.1	260.7	235.9	213.4	193.1	174.8	158.1	143.1	129.5	117.1	117.1
1491.0	1349.1	1220.7	1104.5	999.4	904.3	818.3	740.4	669.9	606.2	548.5	496.3	449.1	406.3	367.7	332.7	301.0	272.4	246.5	223.0	201.8	182.6	165.2	149.5	135.3	135.3
10677.8	9661.6	8742.2	7910.3	7157.5	6476.4	5860.1	5302.4	4797.8	4341.3	3928.1	3554.3	3216.1	2910.0	2633.1	2382.5	2155.8	1950.7	1765.0	1597.1	1445.1	1307.6	1183.1	1070.5	968.7	968.7

Appendice VI – pag 104 calcolo delle emissioni di CH<sub>4</sub> previste nella discarica di Timbò.

**Appendice VII - Tabella 4.5 – previsione produzione rifiuti organici e rifiuti inviati in discarica.**

Anno	Popolazione	Produzione pro capite [Kg/ab/giorno]	Residui Organici [kg/anno]	Produzione pro capite [kg/ab/giorno]	Residui misti inviati in discarica [kg/anno]	Residui totali ricevuti dalla discarica [kg/anno]
2010	27.759	0,219	2.218.916	0,049	496.470	2.715.385
2011	28.430	0,228	2.365.949	0,051	527.980	2.893.929
2012	28.907	0,237	2.500.582	0,053	556.670	3.057.251
2013	29.392	0,245	2.628.337	0,055	586.173	3.214.509
2014	29.884	0,254	2.770.581	0,057	616.509	3.387.089
2015	30.386	0,263	2.916.856	0,058	647.697	3.564.553
2016	30.895	0,272	3.067.258	0,060	679.759	3.747.017
2017	31.413	0,28	3.210.418	0,062	712.713	3.923.131
2018	31.940	0,289	3.369.176	0,064	746.581	4.115.757
2019	32.475	0,298	3.532.354	0,066	781.385	4.313.739
2020	33.020	0,307	3.700.058	0,068	817.146	4.517.204
2021	33.574	0,315	3.860.139	0,070	853.887	4.714.026
2022	34.137	0,324	4.037.007	0,072	891.630	4.928.638
2023	34.709	0,333	4.218.722	0,073	930.399	5.149.121
2024	35.291	0,342	4.405.396	0,075	970.218	5.375.614
2025	35.883	0,35	4.584.047	0,077	1.011.110	5.595.157
2026	36.485	0,359	4.780.768	0,079	1.053.101	5.833.869
2027	37.096	0,368	4.982.797	0,081	1.096.215	6.079.013
2028	37.719	0,377	5.190.258	0,083	1.140.480	6.330.738
2029	38.351	0,385	5.389.277	0,085	1.185.921	6.575.198
2030	38.994	0,394	5.607.744	0,087	1.232.565	6.840.309
2031	39.648	0,403	5.832.022	0,088	1.280.440	7.112.462



**Appendice VIII - Tabella 4.6 – Produzione costante rifiuti organici e inviati in discarica.**

Anno	Popolazione	Produzione pro capite [Kg/ab/giorno]	Residui Organici [kg/anno]	Produzione pro capite [kg/ab/giorno]	Residui misti inviati in discarica [kg/anno]	Residui Totali ricevuti dalla discarica [kg/anno]
2010	27.759	0,219	2.218.916	0,049	496.470	2.715.385
2011	28.430	0,219	2.272.552	0,049	508.471	2.781.023
2012	28.907	0,219	2.310.681	0,049	517.002	2.827.683
2013	29.392	0,219	2.349.450	0,049	525.676	2.875.125
2014	29.884	0,219	2.388.778	0,049	534.475	2.923.253
2015	30.386	0,219	2.428.905	0,049	543.454	2.972.359
2016	30.895	0,219	2.469.592	0,049	552.557	3.022.149
2017	31.413	0,219	2.510.998	0,049	561.822	3.072.820
2018	31.940	0,219	2.553.124	0,049	571.247	3.124.371
2019	32.475	0,219	2.595.889	0,049	580.815	3.176.705
2020	33.020	0,219	2.639.454	0,049	590.563	3.230.016
2021	33.574	0,219	2.683.738	0,049	600.471	3.284.209
2022	34.137	0,219	2.728.741	0,049	610.540	3.339.281
2023	34.709	0,219	2.774.464	0,049	620.770	3.395.234
2024	35.291	0,219	2.820.986	0,049	631.180	3.452.166
2025	35.883	0,219	2.868.308	0,049	641.767	3.510.075
2026	36.485	0,219	2.916.428	0,049	652.534	3.568.963
2027	37.096	0,219	2.965.269	0,049	663.462	3.628.731
2028	37.719	0,219	3.015.068	0,049	674.604	3.689.673
2029	38.351	0,219	3.065.587	0,049	685.908	3.751.495
2030	38.994	0,219	3.116.985	0,049	697.408	3.814.393
2031	39.648	0,219	3.169.263	0,049	709.104	3.878.367

**Appendice IX - Tabella 4.7 – Produzione in diminuzione dei rifiuti organici e inviati in discarica.**

Anno	Popolazione	Produzione pro capite [Kg/ab/giorno]	Residui Organici [kg/anno]	Produzione pro capite [kg/ab/giorno]	Residui misti inviati in discarica [kg/anno]	Residui Totali ricevuti dalla discarica [kg/anno]
2010	27.759	0,219	2.218.916	0,049	496.470	2.715.385
2011	28.430	0,215	2.231.044	0,048	498.695	2.729.740
2012	28.907	0,21	2.215.722	0,047	497.124	2.712.845
2013	29.392	0,206	2.209.984	0,046	495.358	2.705.343
2014	29.884	0,201	2.192.440	0,045	493.375	2.685.815
2015	30.386	0,197	2.184.905	0,044	491.216	2.676.121
2016	30.895	0,193	2.176.398	0,043	488.821	2.665.220
2017	31.413	0,188	2.155.560	0,042	486.216	2.641.776
2018	31.940	0,184	2.145.090	0,041	483.391	2.628.482
2019	32.475	0,18	2.133.608	0,041	480.322	2.613.930
2020	33.020	0,175	2.109.153	0,040	477.030	2.586.183
2021	33.574	0,171	2.095.521	0,039	473.490	2.569.011
2022	34.137	0,166	2.068.361	0,038	469.692	2.538.053
2023	34.709	0,162	2.052.343	0,037	465.629	2.517.972
2024	35.291	0,158	2.035.232	0,036	461.302	2.496.534
2025	35.883	0,153	2.003.886	0,035	456.703	2.460.589
2026	36.485	0,149	1.984.237	0,034	451.820	2.436.057
2027	37.096	0,145	1.963.306	0,033	446.632	2.409.938
2028	37.719	0,14	1.927.441	0,032	441.164	2.368.605
2029	38.351	0,136	1.903.744	0,031	435.369	2.339.113
2030	38.994	0,131	1.864.498	0,030	429.262	2.293.760
2031	39.648	0,127	1.837.883	0,029	422.829	2.260.712

**Appendice X - Tabella 4.8 – previsione di produzione futura di residui organici e verde nei tre scenari considerati per la popolazione di ABPT.**

<b>Anno</b>	<b>Popolazione</b>	<b>A - Produzione Pro Capite [kg/ab/giorno]</b>	<b>[kg/anno]</b>	<b>B - Produzione pro capite [kg/ab/giorno]</b>	<b>[kg/anno]</b>	<b>C - Produzione pro capite [kg/ab/giorno]</b>	<b>[kg/anno]</b>
2011	21.411	0,655	5.048.714	0,655	5.048.714	0,655	5.048.714
2012	21.634	0,683	5.322.385	0,655	5.101.203	0,641	4.994.973
2013	22.008	0,712	5.639.527	0,655	5.189.506	0,628	4.973.369
2014	22.389	0,740	5.965.962	0,655	5.279.256	0,614	4.949.444
2015	22.776	0,769	6.301.932	0,655	5.370.499	0,600	4.923.148
2016	23.169	0,797	6.647.685	0,655	5.463.279	0,587	4.894.431
2017	23.569	0,825	7.003.479	0,655	5.557.644	0,573	4.863.235
2018	23.976	0,854	7.369.583	0,655	5.653.639	0,560	4.829.502
2019	24.391	0,882	7.746.272	0,655	5.751.313	0,546	4.793.171
2020	24.812	0,911	8.133.832	0,655	5.850.714	0,532	4.754.174
2021	25.241	0,939	8.532.558	0,655	5.951.891	0,519	4.712.444
2022	25.678	0,967	8.942.756	0,655	6.054.895	0,505	4.667.908
2023	26.123	0,996	9.364.740	0,655	6.159.776	0,491	4.620.490
2024	26.576	1,024	9.798.837	0,655	6.266.587	0,478	4.570.112
2025	27.037	1,053	10.245.383	0,655	6.375.381	0,464	4.516.689
2026	27.507	1,081	10.704.725	0,655	6.486.211	0,450	4.460.137
2027	27.986	1,109	11.177.221	0,655	6.599.135	0,437	4.400.363
2028	28.474	1,138	11.663.244	0,655	6.714.207	0,423	4.337.275
2029	28.972	1,166	12.163.174	0,655	6.831.486	0,409	4.270.774
2030	29.479	1,195	12.677.406	0,655	6.951.031	0,396	4.200.757
2031	29.995	1,223	13.206.348	0,655	7.072.901	0,382	4.127.119
2032	30.522	1,251	13.750.420	0,655	7.197.159	0,369	4.049.748
2033	31.060	1,280	14.310.056	0,655	7.323.868	0,355	3.968.530
2034	31.608	1,308	14.885.703	0,655	7.453.093	0,341	3.883.346
2035	32.167	1,310	15.169.796	0,655	7.584.898	0,328	3.794.070