



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. di AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E
AMBIENTE

Corso di laurea in Scienza e Cultura della Gastronomia

**RUOLO DELLA TECNOLOGIA DEL BIOGAS NEL
RIDURRE L'IMPATTO AMBIENTALE DELLA FILIERA
AGROALIMENTARE: LUCI E OMBRE**

Relatore

Prof. Franco Tagliapietra

Laureando

Alberto Basso

Matricola n. 2015348

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 IL CONTESTO IN GENERALE	1
2. BIOGAS E FILIERA AGROALIMENTARE	4
2.1 CONCETTO E PROCESSI CHIAVE NELLA PRODUZIONE DI BIOGAS.....	4
2.2 MATERIE PRIME UTILIZZATE NELLA PRODUZIONE DI BIOGAS	7
2.2.1 IL SETTORE AGRICOLO	7
2.2.2 IL SETTORE AGROINDUSTRIALE	9
2.2.3 SETTORE INDUSTRIALE	12
2.2.4 SETTORE CIVILE	12
2.3 APPLICAZIONI DEL BIOGAS ALL'INTERNO DELLA FILIERA AGROALIMENTARE.....	13
3. DIGESTIONE ANAEROBICA (DA)	14
3.1 LE TECNICHE DI DIGESTIONE ANAEROBICA.....	15
3.2 IL PROCESSO DI DIGESTIONE ANAEROBICA	16
3.3 PARAMETRI CHIAVE DEL PROCESSO	19
4. SOSTENIBILITÀ E IMPATTO AMBIENTALE	22
4.1 BENEFICI DEL BIOGAS IN GENERALE	25
4.2 DIGESTATO ED EMISSIONI DI METANO DERIVANTI DAL SUO STOCCAGGIO	29
4.3 COMPETIZIONE NELL'USO DEL SUOLO.....	32
4.4 LE COLTURE DI COPERTURA	35
4.4.1. Aumento del carbonio organico nel suolo	36
4.4.2 Erosione del suolo.....	36
4.4.3 Compattazione del suolo	36
4.4.4 Assorbimento dei nutrienti.....	37
4.5 UTILIZZO DI TERRENI MARGINALI	37
5. CONCLUSIONI	41
6. BIBLIOGRAFIA	47
7. SITOGRAFIA	50

ACRONIMI:

AGV: Acidi Grassi Volatili
BSE: encefalopatia spongiforme
CiB: Consorzio italiano Biogas
CE: Comunità Europea
CH₄: metano
C/N: rapporto carbonio/azoto
CNG: gas naturale compresso
CO: monossido di carbonio
CO₂: anidride carbonica
COV: Carico Organico Volumetrico
CRPA Centro Ricerca Produzioni Animali
DA: digestione anaerobica
EBA: European Biogas Association
FORSU: frazione organica dei rifiuti solidi urbani
GHG: gas ad effetto serra
GSE: gestore dei servizi elettrici
H₂: idrogeno
H₂S: idrogeno solforato
HRT: tempo di ritenzione idraulica
LUC: Land Use Change
Mt: milioni di tonnellate
N₂: azoto
N₂O: protossido di azoto
NH₃: ammoniaca
O₂: ossigeno
SOA: sottoprodotti di origine animale
SOC: carbonio organico del suolo
SS: sostanza secca
UE: Unione Europea
WBA: World Biogas Association

ABSTRACT:

Con questa tesi si analizzerà il ruolo della tecnologia nella produzione di biogas per ridurre l'impatto ambientale della filiera agroalimentare, risaltandone gli aspetti positivi ma mostrando anche alcune criticità che comporta la produzione stessa.

Nella prima parte viene fatta un'introduzione, in cui si andranno a delineare i principali concetti legati alla produzione di biogas all'interno della filiera agroalimentare e successivamente si vedranno quali sono le sfide connesse alla riduzione dell'impatto ambientale attraverso questa tecnologia.

Si passerà poi ad analizzare i benefici ambientali derivanti dall'utilizzo del biogas, come la produzione di energia "verde" e il reddito integrativo per gli agricoltori.

Quindi si procederà con l'esaminazione delle tecnologie presenti nel settore focalizzandosi nella digestione anaerobica.

Tuttavia, si analizzeranno esempi di impatti ambientali negativi derivanti dall'utilizzo di questa energia verde ponendo particolare attenzione ai problemi ambientali associati e all'utilizzo e gestione dei sottoprodotti.

La tesi si concluderà con una riflessione sulla possibile efficacia del biogas nella riduzione degli impatti ambientali all'interno della filiera agroalimentare.

ABSTRACT:

This thesis will analyze the role of technology in the production of biogas to reduce the environmental impact of the agri-food chain, highlighting the positive aspects but also showing some critical issues that the production itself entails.

In the first part, an introduction is made, in which the main concepts related to the production of biogas within the agri-food chain will be outlined and then we will see what are the challenges related to the reduction of environmental impact through this technology.

We will then move on to analyze the environmental benefits deriving from the use of biogas, such as the production of "green" energy and supplementary income for farmers.

Then we will proceed with the examination of the technologies present in the sector focusing on anaerobic digestion.

However, examples of negative environmental impacts deriving from the use of this green energy will be analyzed, paying particular attention to the associated environmental problems and the use and management of by-products.

The thesis will conclude with a reflection on the possible effectiveness of biogas in reducing environmental impacts within the agri-food chain.

1. INTRODUZIONE

1.1 IL CONTESTO IN GENERALE

Le crescenti preoccupazioni per l'ambiente, insieme alla crescente domanda di energia di una popolazione globale in crescita, hanno spinto i paesi di tutto il mondo a dare priorità all'energia sostenibile proveniente da fonti alternative come la biomassa¹.

Per questi motivi, diversi paesi hanno cercato di individuare nuove soluzioni efficaci in grado di limitare l'impatto ambientale, e in alcuni casi cercando anche di azzerarlo, e di utilizzare per la produzione di energia fonti rinnovabili.

L'Unione Europea (UE) e le autorità mondiali hanno affermato che la diffusione delle fonti di energia rinnovabile, il miglioramento dell'efficienza energetica e la mitigazione dell'impronta di carbonio dei sistemi energetici sono azioni che possono contribuire in maniera efficace alla riduzione dell'inquinamento ambientale.

A livello mondiale, il primo protocollo che impegna gli Stati aderenti ad esso a ridurre le emissioni di gas serra è stato il protocollo di Kyoto, adottato nel 1997 ma entrato in vigore soltanto nel 2005 e con scadenza al 2020 anno in cui è entrato in vigore l'accordo di Parigi²; il quale mira a limitare il riscaldamento globale al di sotto di 2°C e a proseguire gli sforzi per limitarlo a 1,5°C al fine di ridurre le conseguenze del cambiamento climatico³.

A livello regionale l'UE è la regione più attiva perché ha fissato obiettivi per il 2020, il 2030 e il 2050⁴. Secondo il rapporto statistico redatto dall'EBA (Associazione Europea Biogas) a Bruxelles il 05/12/23 la produzione di biometano in Europa è cresciuta di quasi il 20% nel 2022 rispetto all'anno precedente. Nel frattempo, la dipendenza dell'UE dalle importazioni di gas naturale è passata dall'83% nel 2021 al 97% nel 2022⁵.

Come mostrato in figura 1, tra i 17662 impianti di biogas esistenti, il 71% funziona con materie prime agricole, mentre il 16% e il 9% derivano il biogas rispettivamente da acque reflue e materie prime di discarica. I restanti impianti hanno prodotto biogas da vari tipi di rifiuti come i rifiuti organici e urbani (denominati "altro") o la fonte è sconosciuta⁶.

¹ Gadirli G., Pilarska A. A., Dach J., Pilarski K., Kolasa-Więcek A. e Borowiak C., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospect.

² Benato A., Marcor A., 2019, Italian Biogas Plan: Trends, Subsidies, Cost; Biogas Composition and Engine Emissions.

³ Parlamento Europeo, 2019, L'UE e l'accordo di Parigi: verso la neutralità climatica, <https://www.europarl.europa.eu/>

⁴ Benato A., Marcor A., 2019, Italian Biogas Plan: Trends, Subsidies, Cost; Biogas Composition and Engine Emissions.

⁵ <https://www.europeanbiogas.eu/>

⁶ Benato A., Marcor A., 2019, Italian Biogas Plan: Trends, Subsidies, Cost; Biogas Composition and Engine Emissions.

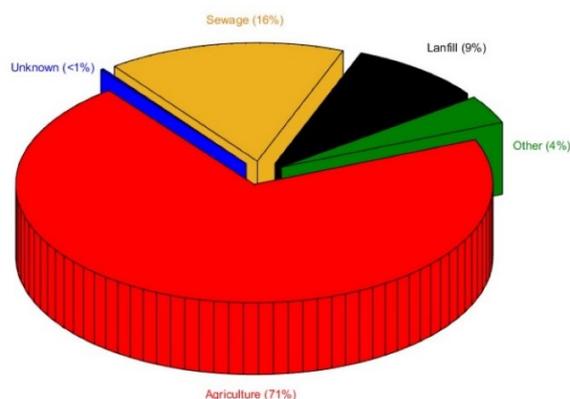


Figura 1. Andamento del biogas nell'UE

La produzione europea di biogas (biogas e biometano combinati) nel 2022 è stata pari a 21 miliardi di metri cubi e rappresenta il 6% del consumo di gas naturale dell'UE nel 2022. La sola produzione di biometano è passata da 3,5 miliardi di metri cubi nel 2021 a 4,2 miliardi di metri cubi nel 2022.

Di questa produzione il 22% è stato utilizzato per gli edifici, mentre un ulteriore 14% è stato utilizzato nell'industria, il 19% per i trasporti e il 15% per la produzione di energia.

Come scritto sopra la dipendenza dell'Europa per l'importazione di gas naturale nel 2022 rappresenta il 97%, questa dipendenza dalle importazioni pone rischi anche per la sicurezza alimentare, a causa della dipendenza dalle importazioni di fertilizzanti chimici. Secondo i dati dell'EBA, nel 2022 l'Europa ha prodotto 31 Mt (SS) di digestato il quale potrebbe già coprire il 15% della domanda di fertilizzanti a base di azoto dell'UE. In questo modo si potrebbero risparmiare 10 Mt di CO₂ equivalente e 2 miliardi di metri cubi di consumo di gas naturale⁷.

L'EBA (European Biogas Association) ritiene che entro il 2030 i settori del biogas e del biometano possano quasi raddoppiare la loro produzione e che per il 2050 la loro produzione possa quadruplicare⁸.

Negli ultimi anni, in Italia, abbiamo assistito alla proliferazione di numerosi impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Sulla loro diffusione hanno avuto un peso molto importante i fattori istituzionali, in particolare le politiche energetiche per la diffusione delle rinnovabili⁹.

A far crescere l'interesse ha contribuito l'approvazione, per gli impianti di taglia non superiore a 1 MWe, di un'incentivazione omnicomprensiva di 0,28 euro/kWh per l'energia elettrica immessa in rete e del coefficiente moltiplicatore 1,8 per i certificati verdi per gli impianti di potenza elettrica installata superiore a 1 MWe (a patto che le matrici utilizzate derivino da una filiera agricola corta o da contratti di filiera)¹⁰.

La tariffa è omnicomprensiva perché incorpora sia una quota incentivante che un corrispettivo per la vendita di energia. Il produttore che beneficia di questa tariffa non ha il diritto di vendere l'energia prodotta, rinunciando così a un ulteriore corrispettivo economico.

L'evoluzione del fotovoltaico in Italia, ad esempio, è stata emblematica. Grazie al sistema di incentivazione proposto e la regolazione degli enti regionali per moderarne o meno la

⁷ <https://www.europeanbiogas.eu/>

⁸ Fiper (2020), "La strategia a Biogas di EBA", in Report impianti biogas agricolo 2020, pp 53.

⁹ Carrosio, G. (2012) La diffusione degli impianti per la produzione di energia da biogas agricolo in Italia: una storia di isomorfismo istituzionale, in Studi Organizzativi, n.2, pp. 9-26, 2012.

¹⁰ Piccini S., Soldano M., Fabbri C. e CRPA (2011), La produzione di biogas del settore agricolo in Italia, Agriregionieuropa anno 7 n°24, Marzo 2011.

proliferazione, ha fatto sì che vi sia una maggiore incidenza di grandi campi fotovoltaici realizzati sul suolo agricolo in alcune regioni d'Italia, e che in altre regioni vi siano principalmente impianti medio-piccoli.

Ciò è avvenuto anche per gli impianti di biogas agricolo che, grazie all'importanza data dagli organismi istituzionali all'energia proveniente da fonti rinnovabili, ne ha permesso una maggiore diffusione all'interno del territorio italiano.

Durante gli anni 90 c'è stata una progressione molto lenta nell'integrazione della tecnologia del biogas all'interno delle aziende agricole, ciò è stato dovuto alla *liability of newness* (Stinchcombe, 1965)¹¹ che descrive la novità come un qualcosa che causa instabilità ed insicurezza e che porta le persone a guardare con scetticismo la novità stessa.

Con l'intervento delle politiche pubbliche nazionali, volte ad incentivare il settore, e di quelle regionali, orientate a mettere in funzione impianti pilota dimostrativi, l'installazione di nuovi impianti ha avuto un forte aumento facendo in modo che la tecnologia del biogas iniziasse a diffondersi¹².

La filiera italiana del biogas, grazie all'attività simultanea di agricoltori e allevatori da un lato e dell'agroindustria dall'altro, ha registrato dal 2008 ad oggi investimenti per circa 4,5 miliardi di euro consentendo all'Italia di raggiungere la leadership europea per il numero di impianti con 1600.

Tutti questi investimenti proposti nel corso degli anni sono stati accompagnati dal Consorzio italiano del Biogas (CiB) che ha favorito le sinergie tra il mondo agricolo e le industrie; questo ha permesso che l'Italia diventasse il secondo produttore europeo di biogas¹³.

Tuttavia, il panorama rimane frammentato tra le industrie, le parti interessate e i produttori di biomassa, unito alla mancanza di consapevolezza sociale dei benefici economici e ambientali del biogas ha fatto sì che il suo potenziale non sia stato pienamente sviluppato¹⁴.

Nonostante ciò, il biogas continua a contribuire alla diversificazione della produzione di energia, promuovendo la sostenibilità ambientale e la riduzione delle emissioni dei gas serra.

¹¹ Stinchcombe, A. (1965), "Social Structure and Organizations", in March J.G. e McNally R. (a cura di), *Handbook of Organizations*, Chicago Ill, pp. 142-193.

¹² Carrosio, G. (2012) La diffusione degli impianti per la produzione di energia da biogas agricolo in Italia: una storia di isomorfismo istituzionale, in *Studi Organizzativi*, n.2, pp. 9-26, 2012.

¹³ Dell'Orefice G. (2020), *Biogas, Italia leader in Europa con 1600 impianti attivi in il Sole 24 ore*.

¹⁴ Progetto ISACC, *Commissione Europea Biogas in Italy: from a marginal option to a mainstream energy source in Increasing Social Awareness and Acceptance of Biogas and Biomethano*, Horizon 2020.

2. BIOGAS E FILIERA AGROALIMENTARE

2.1 CONCETTO E PROCESSI CHIAVE NELLA PRODUZIONE DI BIOGAS

Il biogas è una fonte di energia pulita e rinnovabile; può essere utilizzato in diverse applicazioni finali come carburante per i trasporti, la generazione di elettricità, il riscaldamento e la cottura dei cibi; ma per essere utilizzato come carburante per il trasporto ed essere immesso nella rete del gas nazionale è necessario che venga trasformato in biometano. Il biogas viene prodotto dalla digestione anaerobica della sostanza organica¹⁵ e con il termine biogas ci si riferisce al gas prodotto ottenuto dalla digestione anaerobica (decomposizione batterica che avviene in assenza di ossigeno) di materiali organici, che producono una miscela di gas composta da metano (CH₄) per il 40% – 75%, da anidride carbonica (CO₂) per il 25% - 60% e altre tracce di gas quali l'idrogeno (H₂), idrogeno solforato (H₂S), azoto (N₂), ammoniaca (NH₃), monossido di carbonio (CO) e ossigeno (O₂)¹⁶.

Per consentire il processo di digestione anaerobica le materie organiche utilizzate devono essere ricche di proteine, grassi, zuccheri e amido; sostanze contenute in materie prime come rifiuti urbani e industriali, reflui zootecnici e colture agricole. Pertanto, a differenza dei combustibili fossili, il biogas è una risorsa rinnovabile¹⁷.

Il metano prodotto dalla decomposizione batterica della materia organica continuerà ad essere prodotto naturalmente nelle discariche e nei terreni agricoli, indipendentemente dal fatto che venga utilizzato come gas o meno. Infine, il residuo lasciato dalla combustione del biogas, chiamato fango attivo, può essere essiccato e utilizzato sul terreno come fertilizzante¹⁸.

Diversi tipi di biomassa provenienti da varie fonti (vedi **figura 2**) possono essere utilizzate come materie prime per la produzione di biogas grezzo; queste possono essere classificate in cinque diverse categorie:

1. Rifiuti agricoli
2. Rifiuti solidi urbani
3. Acque reflue
4. Rifiuti industriali
5. Rifiuti in discarica

Nonostante la possibilità di ricavare il biogas da rifiuti agricoli e industriali, rifiuti solidi urbani e reflui zootecnici; negli ultimi anni la produzione di biogas adotta sempre di più l'uso di colture energetiche quali mais, barbabietole e graminacee.

Queste materie prime hanno la capacità di stabilizzare il processo di digestione anaerobica (DA), sono caratterizzate da una crescita rapida e sono facili da reperire. Questo è un fatto che ha suscitato notevoli preoccupazioni sul potenziale impatto negativo sulla salute dei consumatori in quanto i terreni destinati alla produzione di mangimi per gli animali ora vengono destinati alla produzione di

¹⁵ Poudel R. C., Khatiwada D., Aryal P. e Sapkota M., 2021, Large-scale biogas upgrading plants: future prospective and technical challenges in Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading, pp. 467 – 491.

¹⁶ Aryal N., Mørck Ottosen L. D., Bentien A., Pantalone D. e Wegener Kofoed M. V., 2021, Bioelectrochemical systems for biogas upgrading and biomethane production” in Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading, pp. 363 – 382.

¹⁷ Chinicci G., Selvaggi R., D'Amico M. e Biagio P., 2018, Assesment of the potential energy supply and biomethane from the anaerobic digestion of agro-food feedstock in Sicily in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 1, pp.: 6 – 13.

¹⁸ Baredar P., Khare V. e Nema S., 2020, Biogas energy system in Design and Optimization of Biogas Energy Systems, pp. 1 – 31.

colture energetiche per il biogas e di conseguenza gli animali vengono alimentati con mangimi comprati sul mercato andando così a creare il problema della destinazione dei sottoprodotti e dei residui agroalimentari per la produzione di energia o per l'alimentazione animale.

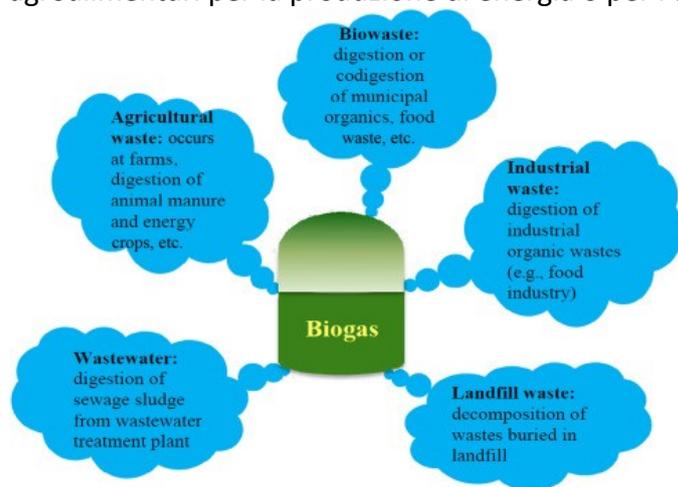


Figura 2: Diversi tipi di materie prime utilizzabili per la produzione di biogas¹⁹.

Prima di essere utilizzato a fini energetici il biogas deve essere sottoposto ad opportuni trattamenti necessari ad aumentare la percentuale di metano a discapito di quella degli altri gas al fine di accrescerne il potere calorifero finale. Il trattamento a cui è sottoposto il biogas ha lo scopo di ridurre la presenza di sostanze che si comporterebbero da agenti corrosivi, come l'idrogeno solforato, che possono causare danni agli impianti di utilizzazione²⁰.

I materiali organici e le colture quindi, per produrre biogas o biocarburanti, possono essere utilizzate in quattro modi principali:

1. COMBUSTIONE TERMICA DEL BIOGAS:

la combustione di materiali solidi di biogas, chiamata anche incenerimento, è oggi l'uso più comune dei combustibili a biogas. La bioenergia rilasciata da questo processo viene utilizzata per il riscaldamento degli ambienti e dell'acqua, nonché per cucinare e lavare.

2. PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA UTILIZZANDO IL BIOGAS:

Pre-miscelando il carbone con una materia prima solida di biogas, è possibile produrre un nuovo tipo di combustibile che può essere bruciato in caldaie a carbone esistenti.

Il vantaggio principale degli impianti di co-combustione di energia a biogas è che il biogas è molto più economico del carbone, quindi la co-combustione è più economica della sola combustione del carbone e si riduce, anche, la dipendenza dai combustibili fossili e le emissioni di carbonio nell'atmosfera²¹.

¹⁹ Poudel R. C., Khatiwada D., Aryal P. e Sapkota M., 2021, Large-scale biogas upgrading plants: future prospective and technical challenges in Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading, pp. 467 – 491.

²⁰ Gelletti R., Roberto R., Mauro G, Migliardi D., Picco D., Pin M, Tomasinsig E, Tommasoni L, Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia (C.E.T.A.), Chinese D., Monaco B., Nardin G. e Simeoni P., 2006, Energia dalle biomasse: le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, pp. 43.

²¹ Baredar P., Khare V. e Nema S., 2020, Biogas energy systems. In Design and Optimization of Biogas Energy Systems, pp 1-31.

3. GASSIFICAZIONE DEL BIOGAS:

un sottoprodotto del biogas è la gassificazione del biogas, che è un prodotto naturalmente generato da fonti biologiche come letame animale, rifiuti in decomposizione e alghe. La gassificazione del biogas in combustibile, che può quindi essere usato direttamente o trasportato su strada o tramite gasdotto al consumatore finale per il riscaldamento o la produzione di energia, è un'altra fonte utile di bioenergia.

4. CONVERSIONE LIQUIDA DEL BIOGAS:

un'altra interessante alternativa è la produzione di biocarburanti. Il biocarburante è un combustibile liquido ricavato dal biogas; ad oggi esistono molti tipi di biocarburante, tra cui il più comune è il bioetanolo, che viene prodotto da mais, canna da zucchero e semi di soia, e viene considerato una risorsa rinnovabile in quanto è il prodotto della conversione dell'energia solare in energia utilizzabile²².

In base a quanto detto sino ad ora si può affermare che il biogas è un prodotto risultante della decomposizione di materiali organici. Con l'aiuto di una serie di batteri la materia organica si decompone rilasciando una miscela di gas composta dal 45 – 85% in volume di metano (CH₄) e 25 – 50% in volume di anidride carbonica (CO₂). L'output prodotto è un gas rinnovabile che può essere utilizzato per molteplici applicazioni.

Se miglioriamo il biogas otteniamo il biometano. Questa forma purificata di biogas grezzo può essere utilizzata come sostituto del gas naturale ed essere immessa nella rete pubblica²³.

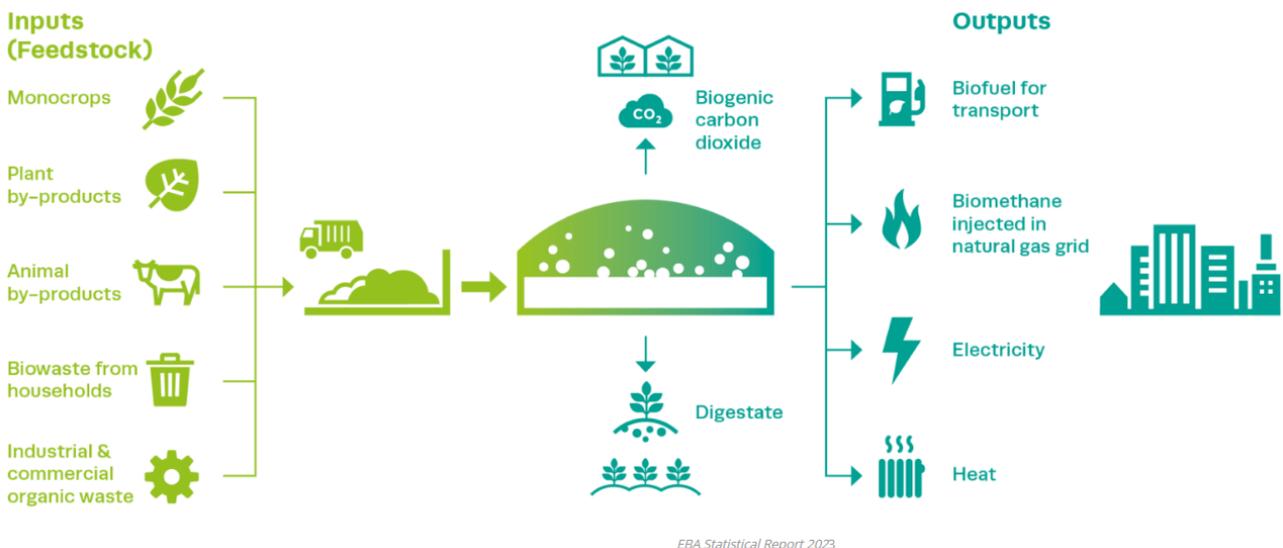


Figura 3: panoramica degli input e degli output del processo di produzione del biogas (EBA Statistical Report 2023).

²² Baredar P., Khare V. e Nema S., 2020, Biogas energy systems. In Design and Optimization of Biogas Energy Systems, pp 1-31.

²³ European Biogas Association (EBA), 2024, About Biogas and Biomethane, <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>

2.2 MATERIE PRIME UTILIZZATE NELLA PRODUZIONE DI BIOGAS

Come scritto in precedenza, il biogas deriva da un processo chiamato digestione anaerobica; questo è un processo biologico che avviene in un ambiente privo di ossigeno e ha lo scopo di degradare le materie organiche della biomassa producendo un combustibile gassoso chiamato biogas e un sottoprodotto detto digestato.

Con il termine biomassa, secondo il Decreto Legislativo 28/2011 ci si riferisce alla 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, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani²⁴.

Questa definizione riunisce un'ampia categoria di prodotti di origine animale e vegetale compresa la parte biologica dei rifiuti. Come conseguenza, le biomasse utilizzabili per la digestione anaerobica per la produzione di biogas risultano essere di vario tipo e derivabili, perciò, da diversi settori produttivi; questi settori sono:

1. Settore agricolo: reflui zootecnici (es.: liquami bovini e suini), residui colturali, colture energetiche dedicate (es.: mais, sorgo, erba...).
2. Settore agroindustriale: scarti organici di macellazione, siero e sottoprodotti orto-frutticoli
3. Settore industriale: acque reflue e/o fanghi ottenuti dalla loro depurazione.
4. Settore civile: acque reflue e/o fanghi ottenuti dalla loro depurazione, frazione organiche dei rifiuti solidi urbani (FORSU)²⁵.

2.2.1 IL SETTORE AGRICOLO

Il settore agricolo svolge un ruolo fondamentale nella produzione di biomassa da destinare per la produzione di biogas, comprende i residui colturali derivanti da altre coltivazioni, i materiali derivanti da specifiche colture energetiche dedicate e anche i reflui zootecnici.

Residui colturali

I residui colturali comprendono l'insieme dei sottoprodotti derivanti dalla coltivazione di colture, dedicate generalmente a scopo alimentare, altrimenti non utilizzabili o con impieghi marginali.

Di queste colture, per esempio, si possono utilizzare:

- le paglie dei cereali autunno-vernini (frumento tenero e duro, orzo, avena, segale): sono le principali sostanze di scarto che vengono ricavate dalla trebbiatura dei cereali autunno-vernini e sebbene questo materiale, solitamente, venga lasciato sul campo per essere

²⁴ - 2011. Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n.28. 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. Gazzetta Ufficiale n.71, supplemento ordinario, 29 marzo.

²⁵ Zampieri G., 2010, Il Biogas. In Rapporto sulle bioenergie in Veneto pp. 90 – 108. Veneto Agricoltura.

interrato oppure venga raccolto e utilizzato come lettiera, può trovare utilità anche per la produzione di biogas²⁶.

- Stocchi, tutoli e bratee di mais: sono i principali sottoprodotti del mais da granella e attualmente vengono utilizzate come lettiera negli allevamenti ma, anch'essi, possono venire usati per la produzione di biogas.

Colture energetiche dedicate

Con il termine colture energetiche dedicate ci si riferisce a quelle colture coltivate con lo scopo di produrre biomassa da destinare esclusivamente ad usi energetici. Di queste colture, quelle destinate alla produzione di biogas possono essere:

- Colture da biomassa lignocellulosica: comprendono specie erbacee o legnose caratterizzate dalla produzione di biomassa costituita principalmente da lignina e/o cellulosa.

A sua volta la biomassa lignocellulosica si suddivide in:

- a. Colture erbacee annuali (hanno un ciclo di vita annuale) come il mais.
- b. Colture erbacee poliennali (hanno un ciclo di vita che dura per più anni) come la canna comune.
- c. Colture arboree (sono colture energetiche legnose caratterizzate da una crescita rapida in seguito al taglio ed hanno un'elevata resa in biomassa) come i salici, la ginestra e il pizzo.

Le principali colture utilizzate per la produzione di biogas rientrano, principalmente, nella categoria delle colture erbacee annuali in quanto si inseriscono bene nel ciclo di rotazione delle colture e non occupano in modo permanente il terreno.

- Colture alcoligene: ci si riferisce a quelle colture atte alla produzione di biomassa dagli elevati contenuti di carboidrati fermentescibili, che mediante un processo di fermentazione possono essere destinate alla produzione di bioenergia; un esempio possono essere il mais e il sorgo.

Reflui zootecnici

Con il termine reflui o deiezioni zootecniche si intende l'insieme dei prodotti di scarto di un allevamento risultato dalla miscela di feci, urine, acqua, lettiera, peli, residui alimentari ecc. Invece, con il termine deiezioni tal quali ci si riferisce solamente alle feci e alle urine prodotte dagli animali. Le deiezioni zootecniche, quindi, presentano una composizione molto variabile che dipende dal metodo di allevamento e di gestione ma, anche, dall'origine di queste deiezioni (bovina o suina). In particolare, l'apporto di acqua e, quindi, il contenuto di sostanza secca gioca un ruolo determinante nella scelta della modalità di trattamento e/o smaltimento più idonea.

²⁶ Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni E. C.E.T.A. – Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia, Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P. e Università degli Studi di Udine - Dipartimento di Energetica e Macchine, 2006, Identità della biomassa. In Energia dalle biomasse: le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, ed. Progetto Novimpresa e Area Science Park, 1-44.

In figura 4 viene illustrata la classificazione delle deiezioni zootecniche in funzione del contenuto di sostanza secca²⁷.

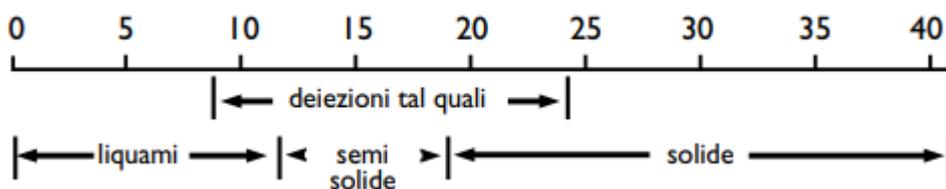


Figura 4: classificazione delle deiezioni zootecniche in funzione al contenuto di sostanza secca

Oltre a tenere conto della quantità di sostanza secca poiché questa influenza la produzione di biogas è importante tenere in considerazione, anche, la qualità del materiale in quanto anche questo aspetto è in grado di condizionare il rendimento complessivo di biogas. I fattori che bisogna particolarmente prendere in considerazione sono:

- Composizione del materiale: condiziona la velocità di degradazione (in ordine decrescente: lignina -> cellulosa -> grassi -> proteine -> carboidrati).
Un liquame bovino a maggior contenuto di materiale cellulosico presenta una velocità di degradazione superiore rispetto ad un liquame suino a maggior contenuto di grassi.
- Presenza di elementi essenziali: il carbonio, l'azoto, il fosforo e lo zolfo sono elementi essenziali per il corretto sviluppo delle attività microbiche durante la fermentazione.
- Presenza di elementi tossici: sono spesso micronutrienti come calcio, magnesio e sodio che, se presenti in eccesso possono indurre tossicità²⁸.

2.2.2 IL SETTORE AGROINDUSTRIALE

Il settore dell'agroindustria produce scarti di lavorazione che possono essere utilizzati come materiale per produrre biogas.

Siero

È lo scarto principale derivante dalla lavorazione del formaggio; solitamente viene usato come prodotto per l'alimentazione suina ma può essere anche impiegato per la produzione di biogas grazie al suo elevato contenuto calorico e proteico.

²⁷ Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni E. C.E.T.A. – Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia, Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P. e Università degli Studi di Udine - Dipartimento di Energetica e Macchine, 2006, Identità della biomassa. In Energia dalle biomasse: le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, ed. Progetto Novimpresa e Area Science Park, 1-44.

²⁸ Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni E. C.E.T.A. – Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia, Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P. e Università degli Studi di Udine - Dipartimento di Energetica e Macchine, 2006, Identità della biomassa. In Energia dalle biomasse: le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, ed. Progetto Novimpresa e Area Science Park, 1-44.

Sottoprodotti orto-frutticoli

I sottoprodotti ortofrutticoli sono tutti quei prodotti di scarto derivanti dalla lavorazione della frutta e della verdura come i residui provenienti dalla lavorazione dei succhi di frutta e gli scarti della frutta e della verdura quali bucce, torsoli, semi o ortaggi danneggiati che non possono essere venduti.

Scarti organici di macellazione

Il settore della macellazione genera una quantità molto elevata di residui e sottoprodotti che possono essere valorizzati mediante processi di recupero anziché essere smaltiti semplicemente come rifiuto.

Indicativamente i residui e i sottoprodotti rappresentano circa il 20% - 50% del peso vivo dell'animale di partenza in quanto la resa al macello normalmente varia dal 80% al 50% in relazione all'età, alla razza e alla tipologia dell'animale.

Tutti questi scarti di lavorazione, per essere smaltiti in modo adeguato devono seguire le direttive scritte nel Regolamento CE n.1774/2002 al fine di evitare problemi di carattere sanitario, come conseguenza, chi lavora in questo settore è orientato a minimizzare il problema attraverso il rimpiego economico degli scarti o attraverso la valorizzazione energetica.

La composizione merceologica degli scarti derivanti dai macelli è: carbonio (C) 48%, Idrogeno (H₂) 8,5%, ossigeno (O₂) 28%, azoto (N₂) 9,3%, ceneri 5,8% e umidità 60%.

Uno dei metodi per riutilizzare questi scarti è attraverso la produzione di biogas ottenibile dalla fermentazione anaerobica di tali scarti, non tutto il materiale, però, può essere digerito anaerobicamente sia per un aspetto fisico (come nel caso delle ossa) che per un aspetto normativo. L'evoluzione normativa attuata a livello comunitario e nazionale, avvenuta dall'esigenza di prevenire e contenere la diffusione dell'encefalopatia spongiforme (BSE), ha circoscritto le opzioni tecnologiche per il trattamento dei rifiuti di origine animale. Nello specifico il regolamento CE n.1774/2002 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano e successive modifiche e integrazioni ha classificato i sottoprodotti di origine animale in tre categorie, in base alla relativa pericolosità, individuando per ciascuna categoria le tipologie di impiego e i trattamenti consentiti.

Il Reg. CE in questione fissa i requisiti relativi alla raccolta ed al trasporto, agli impianti di transito, di magazzinaggio ed agli impianti di trasformazione per le differenti categorie di animali. In base alla terminologia introdotta dal Reg. 1774 non si parla più di "scarti" e "carcasse animali", ma di "sottoprodotti di origine animale" (SOA) e di "corpi interi o parti di animali"²⁹.

I sottoprodotti di origine animale devono essere classificati in categoria 1, 2 o 3 in modo da evidenziarne l'appartenenza:

- Materiali di categoria 1: materiale a rischio di BSE che vengono eliminati mediante incenerimento con recupero di energia; animali che non sono né animali d'allevamento né animali selvatici, come gli animali da compagnia, gli animali da giardino zoologico e gli animali da circo; animali selvatici se si sospetta che siano affetti da malattie trasmissibili all'uomo o agli animali ecc.

²⁹ Colonna N., Alfano V., Gaeta T., 2009, stima del potenziale di biogas da scarti di macellazione. In La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia, pp 66-96.

- Materiali di categoria 2: stallatico e il contenuto del tubo digerente, fanghi di macellazione, prodotti di origine animale contenenti residui di farmaci veterinari ecc.
A parte lo stallatico e il contenuto del tubo digerente, gli altri sottoprodotti, per ragioni di praticità e di costi, vengono miscelati ai materiali di categoria 1 rinunciando, così, alle possibili opzioni di valorizzazione.

- Materiali di categoria 3: parti di animale macellate ritenute idonee al consumo umano che non presentano segni di malattie trasmissibili all'uomo o agli animali e provenienti da carcasse idonee al consumo umano, ma non destinate per motivi commerciali, pelli, zoccoli e corna, setole di suini e piume ottenuti da animali macellati in un macello dopo aver subito un'ispezione ante mortem e considerati, in seguito a detta ispezione, idonei alla macellazione ai fini del consumo umano ecc³⁰.

I materiali solidi (ossa, grasso, carniccio e materiale organico proveniente da sequestri ispettivi) appartenenti a questa categoria vengono raccolti separatamente da quelli liquidi (principalmente sangue) e inviati ad impianti di trasformazione, sottoposti obbligatoriamente a pastorizzazione a 70°C per almeno 60 minuti, per l'ottenimento di semilavorati destinati alle industrie dei mangimi, dei fertilizzanti, dei saponi, oppure, in base a contingenze di mercato, all'incenerimento.

Il sangue viene avviato alla trasformazione in farina di sangue, impiegata come materia prima per la produzione di mangimi e fertilizzanti o incenerita con recupero energetico³¹.

In base a quanto afferma il Reg. CE i sottoprodotti avviabili a digestione anaerobica per la produzione di biogas risultano essere quelli appartenenti alla categoria 3 e parte di quelli della categoria 2 (stallatico e il contenuto del tubo digerente).

Nella tabella 1 vengono individuati i potenziali sottoprodotti di origine animale (SOA) destinabili a digestione anaerobica.

Fasi della macellazione	Specie animali		
	Bovini	Suini	Ovicapri
Dissanguamento con aspirazione	Sangue edibile	-	-
Dissanguamento per caduta	Sangue non edibile	Sangue non edibile	Sangue non edibile
Scuoimento	Carniccio	Carniccio	Carniccio
Eviscerazione	Rumini e stomaci + contenuto	Intestini + contenuto	Intestini + contenuto
Divisione e toelettatura	Ossa, grasso e carniccio	Ossa, grasso e carniccio	Ossa, grasso e carniccio

tabella 1: tipologie di SOA destinabili a digestione anaerobica³².

³⁰ - 2002. Regolamento (CE) n.1774/2002 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano. Parlamento europeo e Consiglio europeo, 3 ottobre.

³¹ Colonna N., Alfano V., Gaeta T., 2009, stima del potenziale di biogas da scarti di macellazione. In La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia, pp 66-96.

³² Ruol G., 2006, mappatura biomasse e organizzazione data-base, pp 9.

Gli scarti individuati sono tutti avviabili a digestione anaerobica ad eccezione delle ossa, in quanto non digeribili dai microrganismi. Tutti questi sottoprodotti sono caratterizzati da un elevato contenuto di materia organica ed un elevato tenore di azoto e grassi. Generalmente queste sostanze non vengono mai valorizzate tal quali, ma vengono co-digerite con reflui zootecnici o altri rifiuti organici³³.

2.2.3 SETTORE INDUSTRIALE

Acque reflue industriali

Con il termine acque reflue industriali, secondo il Decreto legislativo n.135/2006, si intende “qualsiasi tipo di acque reflue provenienti da edifici od installazioni in cui vengono svolte attività commerciali o di produzione di beni, differenti qualitativamente dalle acque reflue domestiche e da quelle meteoriche di dilavamento, intendendosi per tali anche quelle venute in contatto con sostanze o materiali, anche inquinanti, non connessi con le attività esercitate nello stabilimento”³⁴.

Fanghi industriali

Con il termine fanghi industriali ci si riferisce ai fanghi ottenuti dalla depurazione delle acque reflue industriali.

2.2.4 SETTORE CIVILE

Acque reflue domestiche

Con il termine acque reflue domestiche, secondo il Decreto legislativo n.135/2006, si intendono le “acque reflue provenienti da insediamenti di tipo residenziale e da servizi e derivanti prevalentemente dal metabolismo umano e da attività domestiche”³⁵.

Fanghi domestici

Con il termine fanghi domestici ci si riferisce ai fanghi ottenuti dalla depurazione delle acque reflue domestiche.

³³ Colonna N., Alfano V., Gaeta T., 2009, stima del potenziale di biogas da scarti di macellazione. In La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia, pp 66-96.

³⁴ - 2006, Decreto legislativo 3.4.2006 n.152. Norme in materia ambientale. Gazzetta Ufficiale n.88, supplemento ordinario n.96, 29 aprile.

³⁵ - 2006, Decreto legislativo 3.4.2006 n.152. Norme in materia ambientale. Gazzetta Ufficiale n.88, supplemento ordinario n.96, 29 aprile.

Frazioni organiche dei rifiuti solidi urbani (FORSU)

Con il termine FORSU si intende il materiale raccolto dalla raccolta differenziata dell'organico comunemente chiamata umido domestico; questa frazione comprende residui di cibo o preparazioni alimentari.

Questa frazione di rifiuti può trovare impiego nella produzione di biogas sfruttando i processi di fermentazione che avvengono durante la digestione anaerobica.

2.3 APPLICAZIONI DEL BIOGAS ALL'INTERNO DELLA FILIERA AGROALIMENTARE

Come scritto in precedenza, per la produzione di biogas possono essere utilizzati parecchi materiali organici, gran parte della biomassa utilizzabile deriva dalla filiera agroalimentare e, proprio per questo motivo, viene spesso utilizzata all'interno di questa filiera.

Perciò alcune delle principali applicazioni a cui viene destinato il biogas ottenuto dalla digestione anaerobica sono:

1. **PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA:** il biogas può essere utilizzato per la produzione di energia elettrica.

L'energia elettrica viene per la maggior parte immessa nella rete elettrica gestita dal Gestore dei Servizi Elettrici (GSE) oppure viene utilizzata per le operazioni agricole e agroalimentari³⁶ (può essere utilizzata per alimentare trattori o altri macchinari agricoli che utilizzano energia elettrica o per l'illuminazione dell'azienda agricola...).

2. **PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA:** il biogas può essere utilizzato per la produzione di energia termica utile per la produzione di calore.

Il calore, all'interno delle aziende, viene utilizzato come stabilizzatore della temperatura del digestato, per il riscaldamento delle stalle o altri edifici utilizzati per le lavorazioni e produzione di acqua calda a vari fini di autoconsumo aziendale o residenziale.

3. **PRODUZIONE DI BIOMETANO:** il biogas dopo opportuno trattamento e purificazione, che lo porterà ad avere un contenuto di metano del 95-98%, può essere utilizzato come carburante per i veicoli a gas naturale compresso (CNG) se presenti in azienda oppure può essere immesso in rete³⁷.

4. **PRODUZIONE DI FERTILIZZANTI:** come sottoprodotto della produzione di biogas si ottiene il digestato.

Il digestato può essere utilizzato in sostituzione dei fertilizzanti sintetici e minerali, per ripristinare la capacità di stoccaggio e sequestro del carbonio dei suoli oppure può essere applicato alle colture coltivate per nutrire il bestiame³⁸.

³⁶ Zampieri G., 2010, Il Biogas. In Rapporto sulle bioenergie in Veneto pp. 90 – 108. Veneto Agricoltura.

³⁷ Zampieri G., 2010, Il Biogas. In Rapporto sulle bioenergie in Veneto pp. 90 – 108. Veneto Agricoltura.

³⁸ Dr Jain S., 2019, Introduction. In Global Potential of Biogas pp. 4 – 14. World Biogas Association (WBA).

3. DIGESTIONE ANAEROBICA (DA)

La digestione anaerobica è un processo biologico che avviene all'interno di un digestore (sistema solitamente costituito da una vasca di digestione all'interno della quale i microrganismi convertono i substrati immessi; solitamente sono dotati di due aperture: un ingresso dove viene immesso il materiale da digerire ed un'uscita dove viene rimosso il digestato rimanente³⁹) ad opera di diversi gruppi batterici per mezzo del quale la sostanza organica viene trasformata in una miscela chiamata biogas, costituita principalmente da metano e anidride carbonica. La percentuale di metano nel biogas varia a seconda del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo, da un minimo del 50% fino all'80% circa⁴⁰.

La digestione anaerobica si applica a quasi tutti i materiali di scarto biodegradabili come erba tagliata, avanzi di cibo, liquami, rifiuti animali o rifiuti industriali. I digestori anaerobici possono anche essere alimentati con colture energetiche appositamente coltivate per aumentare il contenuto biodegradabile e quindi aumentare la produzione di biogas; tuttavia, la lignina non può essere degradata mediante digestione anaerobica, il che rende la biomassa legnosa non adatta a questo processo di conversione⁴¹; come conseguenza, substrati ad alto contenuto di materia organica e basso contenuto di lignina, come ad esempio il letame prodotto dal bestiame, tendono a produrre un quantitativo di biogas maggiore rispetto ai substrati che contengono meno materia organica⁴².

I primi impianti a biogas sono nati per risolvere il problema dello smaltimento dei reflui zootecnici e per la stabilizzazione dei fanghi organici prodotti negli impianti di depurazione dei rifiuti urbani. Successivamente gli incentivi legati alla produzione di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili hanno reso l'utilizzo di biomasse dedicate per la produzione di biogas veramente interessante.

Il processo di digestione anaerobica è considerato il metodo più sostenibile dal punto di vista ambientale per il trattamento dei rifiuti organici, difatti, la digestione anaerobica non solo sottrae materiali biodegradabili alle discariche ma, da questi materiali, è in grado di ricavarne bioenergia e sottoprodotti come i biofertilizzanti del suolo⁴³.

Attualmente la cultura più utilizzata negli impianti nord europei è l'insilato di mais, seguita da insilati di cereali autunno vermini, di trifoglio e di loietto. La resa in biogas di una coltura è direttamente proporzionale al suo contenuto in grassi, zuccheri/amidi, proteine, cellulosa ed emicellulosa; in generale, maggiori sono i solidi totali della biomassa e maggiore sarà la sua resa in metano⁴⁴.

³⁹ Dahunsi S.O., Ogunwole O. J., 2021, Biofertilizer production systems: Industrial insights. In Biofertilizer, pp 21-30.

⁴⁰ Piccini S., Centro Ricerche Produzioni Animali – CRPA S.p.A., 2003, La digestione biologica dei rifiuti organici ed altre biomasse: la situazione e le prospettive in Italia.

⁴¹ Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Annex 3: Bioenergy routes and conversion technologies. In Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source. pp 85-93.

⁴² Gadirli G., Dach J., Pilarska Agnieszka A., Pilarski k., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospects.

⁴³ Gadirli G., Dach J., Pilarska Agnieszka A., Pilarski k., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospects.

⁴⁴ Candolo G., 2006, Energia dalle biomasse vegetali: le opportunità per le aziende agricole.

3.1 LE TECNICHE DI DIGESTIONE ANAEROBICA

Le tecniche di digestione anaerobica si suddividono in due categorie:

1. **Digestione a secco** (*dry digestion*): quando il substrato digerito ha un contenuto di sostanza secca superiore al 20%,
2. **Digestione a umido** (*wet digestion*): quando il substrato in digestione ha un contenuto di sostanza secca inferiore al 10%.

Attualmente, vengono utilizzati, anche se in maniera poco comune, processi con valori intermedi di sostanza secca e vengono definiti come processi a semisecco.

Il processo di digestione anaerobica può essere classificato anche in base alla tipologia di processo e, quindi, troviamo:

- **Processo monostadio** dove le fasi di idrolisi, fermentazione acida e metanigena avvengono contemporaneamente e all'interno dello stesso digestore.
- **Processo bistadio** dove il substrato organico viene idrolizzato separatamente in un primo digestore dove avviene anche la fase acida, mentre la fase metanigena avviene in un secondo digestore⁴⁵.

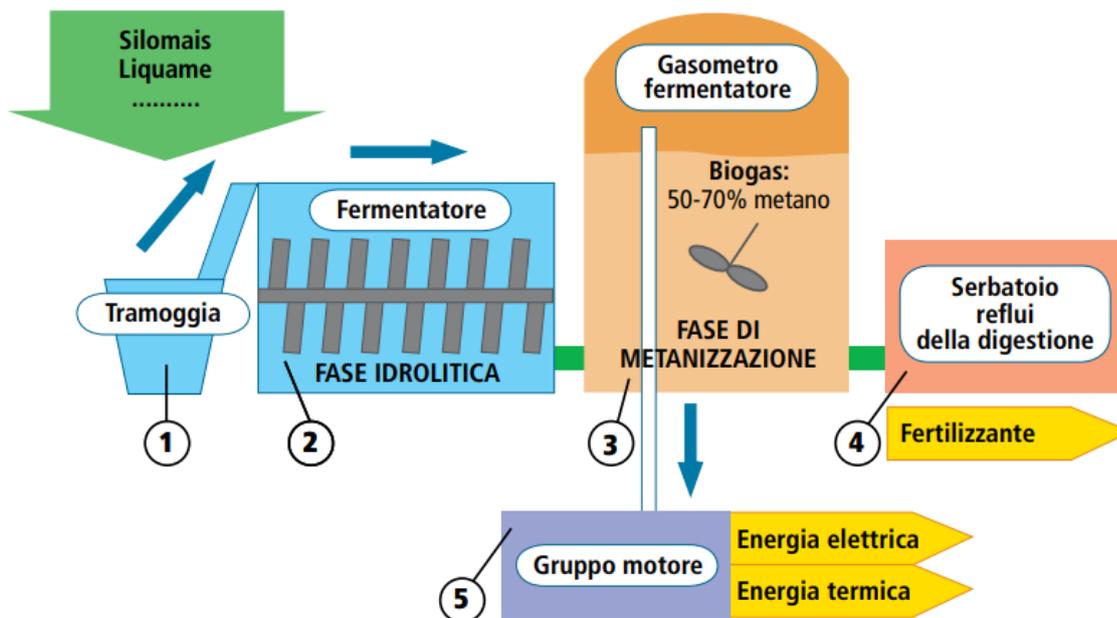


Figura 5: schema di un impianto di biogas a bistadio. La biomassa viene collocata nella tramoggia (1) da cui viene automaticamente portata nel fermentatore (2). Nel fermentatore avviene la decomposizione microbica della biomassa in materiali idrosolubili. Il materiale viene successivamente portato nel reattore (3) dove in condizioni di anaerobiosi e termofilia i batteri metanigeni completano il processo digestivo; come risultato finale si ha la produzione di biogas. Il biogas prodotto, depurato delle sostanze corrosive, viene usato per alimentare un motore endotermico (5) a cui è collegato un alternatore. Nel serbatoio (4), viene immagazzinato il refluo digerito⁴⁶.

⁴⁵ Piccini S., Centro Ricerche Produzioni Animali – CRPA S.p.A., 2003, La digestione biologica dei rifiuti organici ed altre biomasse: la situazione e le prospettive in Italia.

⁴⁶ Candolo G., 2006, Energia dalle biomasse vegetali: le opportunità per le aziende agricole.

La digestione anaerobica, inoltre, può essere condotta anche a diverse temperature di esercizio che ne determinano la cinetica di reazione. A seconda del livello di temperatura utilizzato tale processo viene classificato in:

- Psicrofilo: 10-20°C
- Mesofilo: 20-40°C con un valore ottimale di 35°C,
- Termofilo: 55-60°C con un valore ottimale di 55°C.

La scelta tra queste condizioni determina il tempo di residenza all'interno dei digestori; mediamente in mesofilia si hanno tempi di residenza compresi tra i 14 e i 30 giorni, mentre in condizioni termofile il tempo di ritenzione è generalmente inferiore ai 14-16 giorni.

Con impianti di tipo semplificato è possibile operare in psicrofilia ma, come conseguenza, i tempi di residenza all'interno del digestore possono essere superiori ai 30 giorni, fino ad un massimo di 90 giorni.

Il rendimento in biogas e, quindi, del processo è molto variabile e dipende dalla biodegradabilità del substrato trattato⁴⁷.

3.2 IL PROCESSO DI DIGESTIONE ANAEROBICA

Il processo di digestione anaerobica è un processo biologico mediante il quale, in assenza di ossigeno, la materia organica immessa nel digestore viene degradata tramite una serie di reazioni interconnesse che avvengono in modo sequenziale e in parallelo⁴⁸. Il processo di digestione anaerobica prevede quattro fasi che avvengono contemporaneamente:

1. Idrolisi,
2. Acidogenesi,
3. Acetogenesi,
4. Metanogenesi.

Ogni processo coinvolge diversi gruppi di microrganismi, ad esempio i batteri idrolitici nella fase di idrolisi i quali trasformano le molecole complesse (proteine, lipidi e carboidrati) in molecole semplici (amminoacidi, acidi grassi e zuccheri), i batteri acidogeni nella fase di acidogenesi i quali trasformano le molecole organiche semplici in acidi organici (acido acetico, acido lattico, acido butirrico...), i batteri acetogeni nella fase di acetogenesi i quali convertono gli acidi grassi volatili e alcoli in acetato e idrogeno e i batteri metanigeni nella fase di metanogenesi i quali utilizzano acetato e idrogeno per produrre metano⁴⁹.

⁴⁷ Piccini S., Centro Ricerche Produzioni Animali – CRPA S.p.A., 2003, La digestione biologica dei rifiuti organici ed altre biomasse: la situazione e le prospettive in Italia.

⁴⁸ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁴⁹ Tamosiunas A., Khiari B, Jeguirim M., 2022, Bioflues production: Biogas, biodiesel and bioethanol from tomato waste. In tomato Processing by-Products, pp. 333-370.

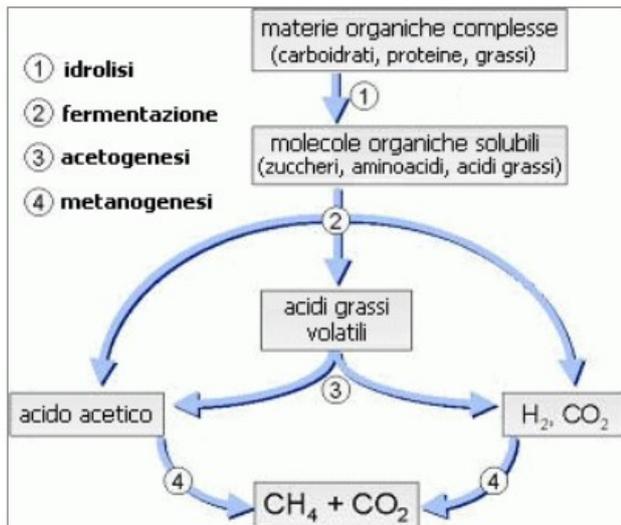


Figura 5: Schema riassuntivo della decomposizione anaerobica delle sostanze organiche durante la digestione⁵⁰

Prima fase – Idrolisi

L'idrolisi è la prima fase del processo; in questa fase i substrati organici complessi, che comprendono colture dedicate, effluenti di allevamento e/o residui agro-industriali, costituiti prevalentemente da cellulosa, proteine, lipidi e carboidrati vengono degradati nei loro monomeri (monosaccaridi, amminoacidi e acidi grassi volatili). Questa degradazione avviene ad opera di batteri idrolitici che colonizzano il materiale e lo degradano.

Per favorire al meglio l'attività di idrolisi è importante ottenere uno stretto contatto tra i batteri e i substrati immessi nel digestore, questo dipende da: dimensione, forma, concentrazione e composizione dei substrati.

Quando i substrati di partenza sono caratterizzati da un'elevata componente di lignocellulosa, questa fase diventa limitante, in quanto la presenza di lignina nelle strutture lignocellulose forma una barriera all'accesso degli enzimi idrolitici riducendo l'efficacia di questi enzimi; anche la presenza di elevate percentuali di emicellulosa riduce la velocità di degradazione⁵¹.

Seconda fase – Acidogenesi

Dai prodotti ottenuti dall'idrolisi inizia l'acidogenesi, durante l'acidogenesi gli zuccheri, gli amminoacidi e gli acidi grassi volatili vengono trasformati tramite processi di fermentazione, condotti da batteri anaerobico obbligati e facoltativi, in acidi grassi volatili a catena corta (acido propionico, butirrico, acetico e formico).

In questa fase vengono prodotti anche idrogeno, anidride carbonica (CO₂), alcoli (metanolo, etanolo e glicerolo) e chetoni (acetone). Questi composti costituiscono i substrati di partenza per la fase successiva. L'acidogenesi è la fase più veloce del processo di digestione anaerobica⁵².

⁵⁰ Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica, pp 4-8.

⁵¹ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁵² Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

Terza fase – Acetogenesi

In questa fase vi è l'attacco del substrato molecolare precedentemente formato, da parte dei batteri acetogeni producendo acido acetico, idrogeno (H₂) e anidride carbonica (CO₂).

La produzione di acido acetico può avvenire principalmente ad opera di due tipologie di batteri:

- Acetogeni: che ossidano gli acidi grassi volatili ad acido acetico rilasciando idrogeno e biossido di carbonio;
- Omoacetogeni: che utilizzano l'idrogeno e l'anidride carbonica per produrre acido acetico.

Durante questa fase, se si ha un eccesso di alimentazione del digestore che può essere dovuto alla presenza di substrati facilmente degradabili o alla presenza di fattori inibenti, si può andare in contro ad una sovrapproduzione di acidi grassi volatili che possono causare una inibizione del processo.

Queste condizioni possono portare a concentrazioni elevate di idrogeno che sono sfavorevoli all'attività degli acetogeni; come conseguenza si possono riscontrare cambiamenti del pH.

Valori bassi di pH possono determinare un aumento della concentrazione di acidi ed in particolare di acido propionico. Questo tipo di acido è di difficile degradazione e una sua elevata concentrazione è sintomo di problemi di processo.

Pertanto, l'attività dei batteri responsabili di questa fase è fortemente legata alla presenza dell'attività dei batteri coinvolti nella metanogenesi in quanto questi batteri trasformano l'idrogeno e l'anidride carbonica in metano⁵³.

Quarta fase – Metanogenesi

La metanogenesi svolge un ruolo cruciale nel processo di digestione anaerobica, in quanto è proprio in questa fase che si ha la maggiore produzione di metano (circa il 70% del metano viene generato durante la metanogenesi)⁵⁴.

Il metano, infatti, è l'unico composto non reattivo nell'intero processo di digestione anaerobica e può, pertanto, essere considerato il prodotto finale della digestione anaerobica.

Gli archeobatteri sono i responsabili di questo processo e la metanogenesi può avvenire attraverso due vie differenti dovute all'utilizzo di due gruppi di microrganismi coinvolti in questa reazione:

- Metanigeni acetoclastici che convertono l'acido acetico in metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂): $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$;
- Metanigeni idrogenotrofi che utilizzano l'idrogeno (H₂) e l'anidride carbonica (CO₂) per produrre metano (CH₄): $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ⁵⁵.

Per favorire la produzione di metano occorre intervenire sulle condizioni di processo, perciò, bisogna creare condizioni che favoriscono la degradazione dei prodotti intermedi⁵⁶.

⁵³ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁵⁴ Gadirli G., Dach J., Pilarska Agnieszka A., Pilarski k., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospects.

⁵⁵ Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica, pp 4-8.

⁵⁶ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

In particolare, la via idrogenotrofa è rallentata se vi è un accumulo di idrogeno (H_2), la via acetoclastica può essere inibita se vi è un'elevata concentrazione di acido acetico.

Pertanto, se intervengono condizioni tali da creare un accumulo di prodotti intermedi (accumulo di acidi grassi volatili o composti inibenti), si creano condizioni dove si ha l'inibizione dell'intero processo di digestione; come conseguenza, per poter ottimizzare le rese di metano si devono controllare i diversi parametri che regolano le condizioni di ciascuna fase, al fine di mantenere il più stabile possibile l'intero processo di digestione⁵⁷.

3.3 PARAMETRI CHIAVE DEL PROCESSO

Al fine di massimizzare la produzione di biogas e di metano durante il processo di digestione anaerobica è necessario prendere in considerazione diversi parametri critici in modo da garantire l'evolversi di tutti i processi metabolici di cui sono responsabili le popolazioni microbiche coinvolte. I parametri più comunemente monitorati durante il processo di digestione anaerobica sono:

- **Temperatura:** tutte le reazioni che avvengono all'interno del digestore durante la digestione anaerobica sono molto sensibili alle variazioni di temperatura, in quanto è in grado di selezionare le popolazioni batteriche all'interno di esso⁵⁸.

Le popolazioni batteriche all'interno di un digestore, come detto in precedenza, possono svolgere la loro attività in tre range termici diversi:

- Psicofilo: 10-20°C
- Mesofilo: 20-40°C con un valore ottimale di 35°C,
- Termofilo: 55-60°C con un valore ottimale di 55°C.

Se vengono utilizzate temperature elevate (operare in condizioni termofile) la cinetica di reazione sarà più veloce, ci saranno maggiori rese di biogas, il tasso di distruzione dei patogeni sarà maggiore e i tempi di ritenzione idraulica saranno inferiori a parità di sostanza organica digerita all'interno del digestore ma, d'altra parte, tali condizioni operative richiedono più calore per tenere il digestore ad una temperatura di 55°C e inoltre, è stata osservata una minore stabilità di processo.

Infatti, in condizioni operative termofile i microrganismi sembrano essere più sensibili alle variazioni ambientali⁵⁹.

- **pH:** gioca un ruolo decisivo nel processo di decomposizione della sostanza organica in quanto è in grado di influenzare le reazioni e le attività della flora batterica che avvengono durante la digestione anaerobica. I valori ottimali di pH differiscono durante le varie fasi del processo a causa delle trasformazioni biologiche che avvengono nello stesso⁶⁰.

⁵⁷ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁵⁸ Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica, pp 4-8.

⁵⁹ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁶⁰ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

Durante le fasi di acidogenesi e acetogenesi il pH ottimale è acido (5-5,5), mentre durante la fase di metanogenesi i valori ottimali di pH sono compresi tra 7 e 7,5. Se si dovesse scendere al di sotto di tale pH l'attività dei batteri metanigeni ne risulterebbe compromessa e per evitare ciò, bisognerebbe bloccare la produzione di acidi grassi in modo che il pH non vada sotto tali valori, per fare ciò occorre controllare l'alcalinità in modo periodico.

Per mantenere il pH al valore desiderato è molto importante, anche, alimentare con regolarità il digestore. Cadute di pH al di sotto di 7 indicano un accumulo di acidi grassi volatili, spesso dovuto ad una sovralimentazione del digestore e quindi un errato rapporto tra il materiale digerito (digestato) e materiale fresco (ancora da decomporre)⁶¹.

- **Effetto tampone (alcalinità):** il sistema tampone dell'ambiente di fermentazione è determinato dalla presenza di acidi deboli (gli stessi acidi che vengono prodotti e utilizzati da batteri durante le varie fasi di digestione anaerobica), dalla presenza di bicarbonato (prodotto dall'anidride carbonica disciolta in acqua) e dall'ammoniaca formatasi in seguito alla degradazione delle proteine.

Il sistema tampone è in grado di controllare entro certi limiti le variazioni di pH, quindi, quando l'ambiente raggiunge valori anomali, ha già superato la capacità tampone del sistema; per questo motivo è bene associare alla lettura del pH altri valori che completano la descrizione delle condizioni del digestore⁶².

- **Ammoniaca (NH₃):** viene prodotta durante la degradazione delle proteine e costituisce uno dei più importanti parametri da tenere sotto controllo perché:
 - fornisce capacità tampone necessaria a contrastare gli effetti di una produzione eccessiva di acidi grassi volatili;
 - diventa inibente se si superano determinate concentrazioni (1,5-4 g/L).

Perciò l'ammoniaca è un composto alcalinizzante ma che, allo stesso tempo, ha effetti tossici sulla microflora⁶³.

- **Acidi grassi volatili (AGV):** come già descritto in precedenza per il pH, la loro concentrazione subisce variazioni a seguito dell'alimentazione del digestore. L'eccesso di alimentazione determina variazioni continue del livello di acidi grassi volatili con conseguente aumento della loro concentrazione. Tali condizioni indicano che il processo di digestione sta andando verso la fase di acidogenesi piuttosto che verso la fase di metanogenesi, determinando valori di pH inferiori al 6 ed un blocco della produzione di biogas⁶⁴.
- **Rapporto acidi grassi volatili/alcalinità:** questo rapporto da una dimensione numerica delle capacità tampone del digestore e di quanto possa ancora agire ed essere in grado di controllare l'effetto dovuto all'accumulo degli AGV.

⁶¹ Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica, pp 4-8.

⁶² Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁶³ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁶⁴ Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica, pp 4-8.

Ogni fermentatore, anche in base al tipo di alimentazione, ha valori propri di rapporto AGV/alcalinità che vanno determinati verificando alcuni parametri come il pH, la quantità di biogas prodotta e la determinazione quali-quantitativa degli acidi grassi prodotti.

Indicativamente, per controllare che il sistema non si allontani dalle condizioni di stabilità, il rapporto dovrebbe essere pari a 0,3-0,4⁶⁵.

- **Rapporto carbonio/azoto (C/N):** durante il processo di idrolisi le proteine vengono idrolizzate in amminoacidi e polipetidi fornendo azoto che, in piccole quantità, è utilizzato dai microrganismi per la loro crescita. Essi, per la loro crescita utilizzano anche il carbonio e, un contenuto insufficiente di azoto rispetto al carbonio rallenta il tasso di crescita microbica e di conseguenza tutte le reazioni del processo sarebbero più lente. Un rapporto C/N 20-30:1 viene indicato come un rapporto ottimale. Se questo rapporto è troppo basso, la biodegradazione comporta la formazione di ammoniaca oltre i limiti consentiti diventando tossica per i microrganismi⁶⁶.
- **Tempo di ritenzione idraulica (HRT):** questo parametro indica la durata di tempo in cui il substrato organico rimane all'interno del digestore. Un tempo di ritenzione idraulica lungo favorisce una maggiore degradazione e una maggiore stabilità di processo. Generalmente il tempo di ritenzione idraulica per i microrganismi mesofili varia tra i 14 e i 30 giorni, mentre per i microrganismi termofili il tempo richiesto è più breve ed è di circa 14-16 giorni⁶⁷.
- **Carico organico volumetrico (COV):** per evitare il sovraccarico di alimentazione del digestore e favorire al meglio i processi di degradazione che avvengono al suo interno in modo tale da prevenire l'accumulo di substrato e di non inibire la crescita della biomassa è bene mantenere il carico organico volumetrico in modo appropriato. In caso di elevati volumi di alimentazione del sistema, i batteri responsabili delle fasi di idrolisi e di acidogenesi tendono a produrre una quantità maggiore di acidi grassi volatili, che ostacolano la fase di idrolisi e la produzione di metano ad opera dei batteri metanogeni. Pertanto, il controllo di questo parametro è fondamentale per avere una produzione di biogas ottimale e per garantire un processo di digestione anaerobica stabile⁶⁸.

⁶⁵ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁶⁶ Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed. Castelli S., pp. 163-181.

⁶⁷ Gadirli G., Dach J., Pilarska Agnieszka A., Pilarski k., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospects.

⁶⁸ Gadirli G., Dach J., Pilarska Agnieszka A., Pilarski k., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospects.

4. SOSTENIBILITÀ E IMPATTO AMBIENTALE

Durante gli ultimi anni, le attività umane sempre più intensive hanno contribuito in modo sempre più significativo all'accumulo di emissioni nocive nell'atmosfera, con attività come la combustione dei combustibili fossili per l'energia e i trasporti, la deforestazione e la produzione di bestiame.

Le emissioni del bestiame provengono da emissioni derivanti dalla gestione del letame, dalla produzione di foraggi per animali, dalle emissioni enteriche, dal letame sparso sui suoli e dalle emissioni derivanti dai fertilizzanti utilizzati per la produzione di mangimi. Tali emissioni si presentano sotto forma di anidride carbonica, metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O)⁶⁹.

Le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica (CO₂) sono aumentate del 35% dalla rivoluzione preindustriale, anche le concentrazioni di metano e protossido di azoto nell'atmosfera sono aumentate rispetto ai livelli preindustriali.

La fonte primaria di CO₂ sin dal periodo preindustriale può essere collegata all'uso di combustibili fossili e ai cambiamenti di uso del suolo. Tuttavia, per il metano e il protossido di azoto che hanno un potenziale più dannoso rispetto all'anidride carbonica le emissioni provengono principalmente da fonti di biomassa, con l'agricoltura che ne rappresenta una percentuale importante.

Tutti questi aumenti di emissione di gas a effetto serra hanno portato ad un aumento della temperatura superficiale media globale che ha raggiunto il picco massimo fra il 2010 e il 2019 (il decennio più caldo registrato fino ad ora). Dei 20 anni più caldi registrati, 19 si sono verificati dal 2000 e, si prevede che, tale aumento di temperatura aumenterà ulteriormente col passare degli anni.

I dati del Programma europeo di osservazione della terra *Copernicus* indicano che il 2022 è stato l'anno con l'estate più calda e il secondo anno più caldo di sempre.

La temperatura media globale risulta, attualmente, tra 0,94 e 1,03°C più alta rispetto alla fine del diciannovesimo secolo. Se questo aumento di temperatura dovesse salire fino ad arrivare ad un aumento di due gradi in più rispetto al periodo preindustriale gli scienziati ritengono che ci saranno conseguenze pericolose e catastrofiche sia sul clima che sull'ambiente. Per questo motivo le comunità internazionali ritengono che l'aumento del riscaldamento globale debba restare ben al di sotto dei 2°C.

Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente, nel 2015 l'Unione Europea è stata il terzo produttore di gas serra dopo Cina e Stati Uniti.

Con l'accordo di Parigi, che è entrato in vigore nel 2020 anno in cui il protocollo di Kyoto è terminato, l'UE si è impegnata a ridurre le emissioni di gas serra almeno del 40% entro il 2030 (rispetto ai livelli preindustriali). Nel 2021 tale obiettivo è stato ulteriormente aumentato fino a portarlo al 55% di riduzione entro il 2030 e alla neutralità climatica entro il 2050.

Questo obiettivo a zero emissioni nette è sancito dalla legge sul clima attraverso il Green Deal europeo.

Il Green Deal europeo è la tabella di marcia dell'UE affinché diventi neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050⁷⁰.

⁶⁹ Dr Jain S., 2019, Livestock Manure. In Global Potential of Biogas pp. 15 – 20. World Biogas Association (WBA).

⁷⁰ Parlamento Europeo, 2024, Le soluzioni dell'UE per contrastare i cambiamenti climatici. <https://www.europarl.europa.eu/>

L'UE, per quanto riguarda le energie rinnovabili e l'efficienza energetica, combatte il cambiamento climatico con una politica energetica adottata dal Parlamento nel 2018. L'attenzione viene posta sull'incremento al 32% della quota di energia rinnovabile consumata entro il 2030 e sulla creazione di possibilità per le persone di produrre la propria energia verde.

A settembre 2023, il Parlamento ha appoggiato un accordo per promuovere le energie rinnovabili; la quota di energie rinnovabili nel consumo finale di energia dell'UE dovrebbe aumentare al 42,5% entro il 2030, mentre i singoli paesi dovrebbero puntare al 45%⁷¹.

Come detto in precedenza, questo aumento di temperatura sta causando e causerà effetti dannosi per gran parte della popolazione mondiale, soprattutto nei paesi in via di sviluppo e, si prevede che, andrà a colpire in modo sempre più intenso i settori come l'approvvigionamento idrico e la produzione alimentare.

Le attività come l'agricoltura, la deforestazione e la produzione di rifiuti svolgono un ruolo sempre più importante nelle emissioni di gas ad effetto serra di origine antropica.

Le pratiche agricole, che utilizzano i fertilizzanti inorganici per far fronte ad una domanda di cibo in costante aumento, e la produzione di bestiame, possono portare all'emissione di sostanze dannose per l'ambiente come l'ammoniaca, contribuendo così all'aumento dei fenomeni riguardanti le piogge acide, l'acidificazione degli ecosistemi e ad ulteriori danni sul territorio⁷².

I cambiamenti climatici, l'uso di risorse fossili, l'inquinamento delle acque superficiali e profonde e l'inquinamento dell'aria sono tutti impatti correlati al settore agricolo ma che, grazie alla tecnologia del biogas, si potrebbero in parte risolvere⁷³.

Grazie alla digestione anaerobica il biogas viene considerato come una tecnologia rispettosa dell'ambiente, in grado di ridurre le emissioni di gas a effetto serra (GHG) della gestione dei reflui zootecnici sia direttamente siccome parte del carbonio organico viene trasformato grazie ai processi che avvengono durante la DA in metano e anidride carbonica, sia indirettamente grazie alla produzione di energia termica ed elettrica da fonti rinnovabili, con un conseguente risparmio di combustibili fossili⁷⁴. Il crescente interesse verso il biogas e i biocarburanti in generale è stato il risultato di alcuni vantaggi associati come:

- La potenzialità di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra;
- Prestazioni in materia di sicurezza energetica;
- Sostituzione con conseguente diminuzione dell'uso di petrolio;
- Potenziali impatti positivi sulla gestione dei rifiuti;
- Capacità di convertire un'ampia gamma di rifiuti in energia pulita⁷⁵.

⁷¹ Parlamento Europeo, 2024, Le soluzioni dell'UE per contrastare i cambiamenti climatici. <https://www.europarl.europa.eu/>

⁷² Bo Holm Nielsen J., Oleskowicz-Popiel P., Al Seadi T., ACABS Research Group, Esbjerg Institute of Technology, Aalborg University, Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 2007, Energy crop potential for bioenergy in EU-27. In Proceedings 15. European Biomass Conference & Exhibition, 94-103. Berlin, Germany, 7-11 May.

⁷³ Fiper, 2020, "La strategia a Biogas di EBA", in Report impianti biogas agricolo 2020, pp 53.

⁷⁴ Dinuccio E., Gioielli F. e Balsari P., 2011, Emissioni di metano ed ammoniaca legate alle fasi di stoccaggio e distribuzione del liquame digerito. In Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione, ed Castelli S., 245-282.

⁷⁵ Baredar P., Khare V. e Nema S., 2020, Biogas energy system in Design and Optimization of Biogas Energy Systems, pp. 1 – 31.

Una volta che le materie prime utilizzate per produrre il biogas sono state trattate e l'energia prodotta da esse recuperata, ciò che ne rimane viene chiamato digestato.

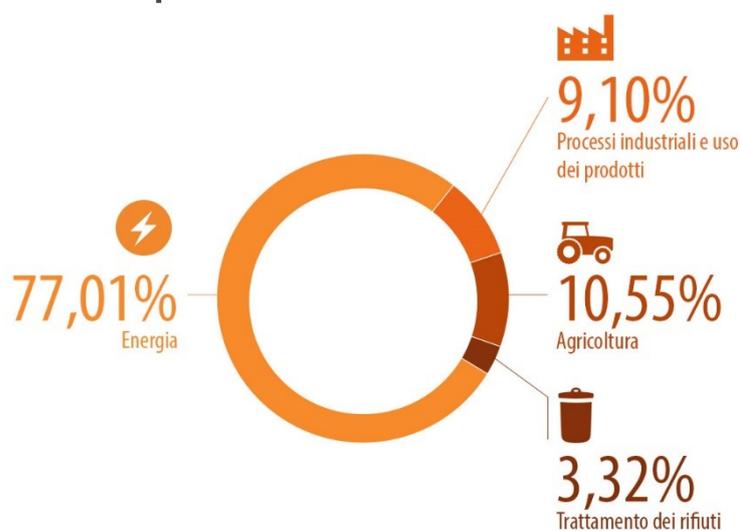
Questo digestato si presenta ricco di nutrienti e può essere applicato al terreno per il recupero dei nutrienti e carbonio nel suolo. Esistono prove empiriche che la digestione anaerobica renda i nutrienti presenti nelle materie prime più disponibili per l'assorbimento da parte delle piante.

La digestione anaerobica permette di recuperare, anche, i nutrienti dei rifiuti alimentari e delle acque reflue che altrimenti andrebbero persi nelle discariche o nei corpi idrici; quindi, uno dei vantaggi del digestato deriva da una maggiore disponibilità di nutrienti⁷⁶.

In quanto tale, perciò, il biogas viene considerato come un'opzione rispettosa dell'ambiente che include la riduzione delle emissioni di gas serra, la riduzione delle emissioni di metano, la sostituzione dei combustibili fossili, il riciclaggio dei nutrienti, la riduzione al minimo degli odori e la capacità di promuovere lo sviluppo sostenibile tra le comunità povere⁷⁷.

Tuttavia, però, questi vantaggi sono messi in discussione in quanto lo sviluppo della digestione anaerobica può comportare alcuni rischi per l'agricoltura e l'ambiente; ciò include la concorrenza con la produzione alimentare, la concorrenza con le aziende agricole e alcune questioni riguardanti l'inquinamento idrico⁷⁸.

Emissioni di gas serra nell'UE divise per settore* nel 2019



*Tutti i settori esclusi uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e silvicoltura (LULUCF)
La percentuale totale è diversa da 100% a causa dell'arrotondamento delle cifre

Fonte: Agenzia europea dell'ambiente (EEA)



Figura 6: Emissioni di gas serra nell'UE divise per settore nel 2019.

⁷⁶ Dr Jain S., 2019, Results and Conclusions. In Global Potential of Biogas pp. 15 – 20. World Biogas Association (WBA).

⁷⁷ Gadirli G., Pilarska A. A., Dach J., Pilarski K., Kolasa-Więcek A. e Borowiak C., 2023, Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospect.

⁷⁸ Cadiou J., Aubert Pierre-M., Meynard Jean-M., 2023, The importance of considering agricultural dynamics when discussing agro-environmental sustainability in futures studies of biogas. Futures 153 (103218): 1-16.

4.1 BENEFICI DEL BIOGAS IN GENERALE

In base agli studi presi in esame fino ad ora è emerso che il biogas, ma in particolare la digestione anaerobica, consente la stabilizzazione e la deodorizzazione dei reflui zootecnici. Gli effetti della DA sono riconducibili ad un aumento della qualità della sostanza organica, ad un incremento relativo degli elementi fertilizzanti ed infine ad un incremento della disponibilità di azoto. Tutti questi effetti positivi hanno fatto sì che agli inizi degli anni '80 in Italia si diffondessero gli impianti a biogas per il trattamento dei liquami zootecnici⁷⁹.

Grazie alla digestione anaerobica il carbonio più volatile presente nei liquami zootecnici viene catturato e trasformato sotto forma di biogas, eliminando così le emissioni di metano. La riduzione dell'esposizione all'ossigeno permette, anche, di ridurre le emissioni di protossido di azoto derivante dallo stoccaggio del letame⁸⁰.

Successivamente, questa tecnologia fu estesa anche agli scarti di lavorazione del settore dell'agroindustria, ai rifiuti alimentari e all'utilizzo di colture energetiche.

Il riutilizzo di questi rifiuti può essere molto vantaggioso in quanto permettono la produzione di calore, elettricità o carburante per i veicoli (biometano ottenuto dall'upgrading del biogas), riducendo così la dipendenza dal petrolio, permettendo la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e migliorando la qualità ambientale.

Inoltre, i sistemi a biogas riducono la necessità di utilizzare i fertilizzanti petrolchimici ed estrattivi e offrono la possibilità di riciclare preziosi nutrienti, migliorando così le prospettive per il settore agricolo e la sicurezza energetica.

Uno studio condotto nel 2019 dalla WBA (World Biogas Association)⁸¹ ha messo in evidenza il potenziale della digestione anaerobica come tecnologia utile per: abbattere le emissioni di gas ad effetto serra, recuperare i nutrienti e generare energia rinnovabile, nonché il ruolo che può svolgere per il raggiungimento degli obiettivi sul cambiamento climatico previsti dall'Accordo di Parigi.

Ha anche affermato che l'industria del biogas, in quanto tale, grazie alla cattura del metano, che altrimenti sarebbe entrato nell'atmosfera da rifiuti alimentari in decomposizione, dai liquami, dagli scarti agricoli e dagli scarti dei processi dell'agroindustria, attualmente riesce a catturare circa il 2% del potenziale globale di emissioni di gas ad effetto serra.

In questo studio sono state prese in esame, singolarmente, le principali materie prime che vengono utilizzate per la produzione di biogas e da ognuna sono stati stimati i potenziali benefici, i quali riguardano la produzione di energia, la riduzione delle emissioni ed il possibile recupero dei nutrienti.

Le materie prime prese in esame in questo studio sono:

1. Letame;
2. Acque reflue;
3. Rifiuti alimentari;
4. Residui colturali;
5. Colture energetiche.

⁷⁹ Zampieri G., 2010, Il Biogas. In Rapporto sulle bioenergie in Veneto pp. 90 – 108. Veneto Agricoltura.

⁸⁰ Dr Jain S., 2019, Results and Conclusions. In Global Potential of Biogas pp. 42 – 47. World Biogas Association (WBA).

⁸¹ Dr Jain S., 2019, Global Potential of Biogas. World Biogas Association (WBA).

Per ogni voce presa in esame si sono poi calcolati il potenziale di riduzione delle emissioni globali di gas ad effetto serra, la potenziale energia generata e il recupero dei nutrienti potenziale.

Infine, sulla base dei dati ottenuti e sulle considerazioni fatte, hanno stilato una serie di punti che permettesse la realizzazione di questo potenziale.

Si è potuto notare che:

- Per il letame, se questo venisse raccolto e successivamente digerito anaerobicamente si avrebbe il potenziale per ridurre le emissioni globali di gas pari al 13-18% delle attuali emissioni legate al bestiame; l'energia prodotta potrebbe soddisfare la domanda di elettricità di un numero compreso di persone tra le 330 e le 490 milioni a livello globale. L'energia generata dal letame trattato avrebbe perciò il potenziale di soddisfare il 100% del fabbisogno energetico dell'agricoltura mondiale e, se dovesse venire aggiornato al biometano, esisterebbe il potenziale per soddisfare la domanda di gas naturale di India e Cina messe assieme.
- Per le acque reflue, se venissero raccolte e trattate tramite digestione anaerobica, esisterebbe il potenziale per generare elettricità pari al fabbisogno di elettricità di 27-38 milioni di persone in tutto il mondo o il fabbisogno di gas naturale dell'intera Ucraina. Avrebbe anche il potenziale di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra pari a 75-100Mt di CO₂ eq. il che equivale alle intere emissioni dell'Israele. Inoltre, se tutti i liquami venissero raccolti e tutti i fanghi digeriti, si potrebbero produrre 0,23 miliardi di tonnellate di digestato che consentirebbero la sostituzione di circa lo 0,4-3% dei fertilizzanti inorganici globali utilizzati.
- Rifiuti alimentari: attualmente un terzo di tutto il cibo prodotto a livello mondiale ogni anno (1,6 miliardi di tonnellate) viene sprecato o perso. Il cibo sprecato o perso ha un costo molto elevato e rappresenta circa l'8% di tutte le emissioni di gas serra di origine antropica. Questo, oltre a costituire uno spreco in termini di risorse ed energie, è anche eticamente discutibile in quanto, a livello mondiale, circa 800 milioni di persone soffrono la fame. Ad oggi, se tutti i rifiuti/perdite alimentari dovessero essere raccolti e riciclati tramite digestione anaerobica esisterebbe il potenziale per generare elettricità in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico di 112-135 milioni di persone. Per quanto riguarda l'emissione di gas a effetto serra, queste emissioni si verificano in tutte le fasi del ciclo di vita degli alimenti e comprendono, ad esempio, le emissioni dovute al cambiamento nell'uso del suolo e alla deforestazione o quelle derivanti dai combustibili fossili utilizzati per la produzione alimentare. Il modo migliore per ridurre queste emissioni è quello di sprecare meno cibo, il che a sua volta, ridurrebbe la quantità di cibo necessario o le risorse necessarie per produrlo. Se tutti i rifiuti alimentari dovessero venire raccolti e digeriti in modo anaerobico esisterebbe un potenziale per compensare da 510 a 560 milioni di emissioni di GHG, le quali equivarrebbero alle emissioni del Regno Unito. Per quanto riguarda il recupero dei nutrienti, se il digestato ottenuto dai rifiuti alimentari dovesse essere applicato come fertilizzante organico nei terreni agricoli per la produzione di colture, ciò consentirebbe di fornire nutrienti sufficienti per fertilizzare milioni di ettari di terreno che equivarrebbero all'intera superficie coltivabile australiana o al 2-5% dell'attuale consumo globale di fertilizzanti inorganici.
- I residui colturali rappresentano un flusso di rifiuti con un elevato potenziale non sfruttato per la produzione di energia e la mitigazione dei gas ad effetto serra.

Recuperare l'intera pianta sarebbe impossibile e non è auspicabile in quanto le radici delle piante tengono insieme il terreno, gli danno struttura e aggiungono humus o contenuto di carbonio al suolo. Questo è importante per prevenire i fenomeni di erosione del suolo e aumentarne anche la capacità di ritenzione idrica. Si stima che il 30-60% dei residui colturali possa essere recuperato in modo sostenibile. Di questa percentuale una parte viene utilizzata come mangime per gli animali, con un conseguente tasso di recupero finale del 25-35%.

Si stima che l'utilizzo dei residui colturali disponibili in modo sostenibile (25-35%) nella digestione anaerobica consentirebbe la mitigazione delle emissioni dei gas serra equivalenti a 865-1100Mt di CO₂ equivalente che sarebbero pari alle emissioni della Germania.

Consentirebbe anche una produzione elevata di energia che, se trasformata in energia elettrica, potrebbe soddisfare il 5,2-6,5% della popolazione mondiale.

- Se le colture energetiche fossero coltivate in modo efficiente e sostenibile sul 7% dei terreni agricoli, con l'utilizzo di coltivazioni annuali, doppie, di copertura e di rotazione, esisterebbe il potenziale per generare energia sotto forma di elettricità o calore equivalente all'elettricità consumata in India.

Questi, possono mitigare le emissioni di GHG uguali a 910-1350 Mt di CO₂ l'anno, equivalenti alle emissioni della Germania sotto forma di emissioni evitate derivanti dalla produzione di elettricità e calore da combustibili fossili.

I nutrienti utilizzati per coltivarle, poi, non vengono dirottati verso la produzione di cereali o verdure rimanendo all'interno dell'insilato e, dopo digestione anaerobica, vengono restituiti al terreno sotto forma di digestato.

Pertanto, presuppongono che i fertilizzanti necessari per produrre le colture energetiche siano compensati dal digestato applicato successivamente ai terreni agricoli e che non vi sia alcun beneficio netto in termini di recupero dei nutrienti.

In base a quanto scritto in precedenza, le principali scoperte di questo articolo redatto dalla WBA sono state che:

1. Il potenziale di generazione di energia dalle principali materie prime disponibili nel mondo recuperabile attraverso DA potrebbe coprire il 6-9% del consumo mondiale di energie primaria o il 23-32% del consumo mondiale di carbone. Questa energia può essere utilizzata sotto forma di elettricità o trasformata in biometano per essere utilizzata come carburante per i veicoli. Se utilizzata come elettricità ha il potenziale di coprire il 16-22% dell'elettricità consumata nel mondo.

Invece, se trasformata in biometano, può sostituire fino al 26-37% dell'attuale gas naturale consumato.

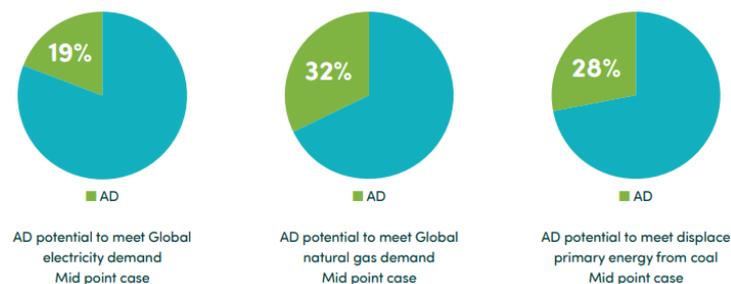


Figura 7: potenziale AD corrispettivamente per la produzione di elettricità, sostituzione del gas naturale e, sostituzione del consumo globale di carbone (fonte WBA: Global Potential of Biogas).

2. L'abbattimento dei gas serra derivanti dalla DA dei flussi dei rifiuti organici avviene in diverse forme: emissioni evitate dalla combustione dei combustibili fossili, emissioni evitate dalla produzione di fertilizzanti inorganici, emissioni evitate in discarica dalla digestione dei rifiuti alimentari, emissioni evitate dalla gestione del letame ed emissioni evitate derivanti dalla combustione dei raccolti.

In generale, il principale risultato è che, il potenziale per ridurre le emissioni di GHG equivarrebbe a circa il 10-13% delle attuali emissioni di gas ad effetto serra.

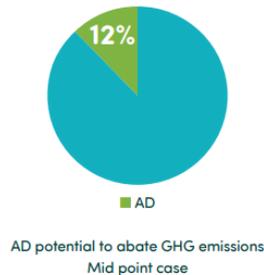


Figura 8: potenziale della DA nel ridurre le emissioni di gas a effetto serra (fonte WBA: Global Potential of Biogas).

La figura seguente (figura 9) mostra il potenziale contributo delle varie materie prime prese in esame per l'abbattimento dei GHG. Le colture energetiche risultano avere il contributo potenziale più elevato, seguite dalla raccolta e digestione del letame animale tramite AD e dai residui colturali.

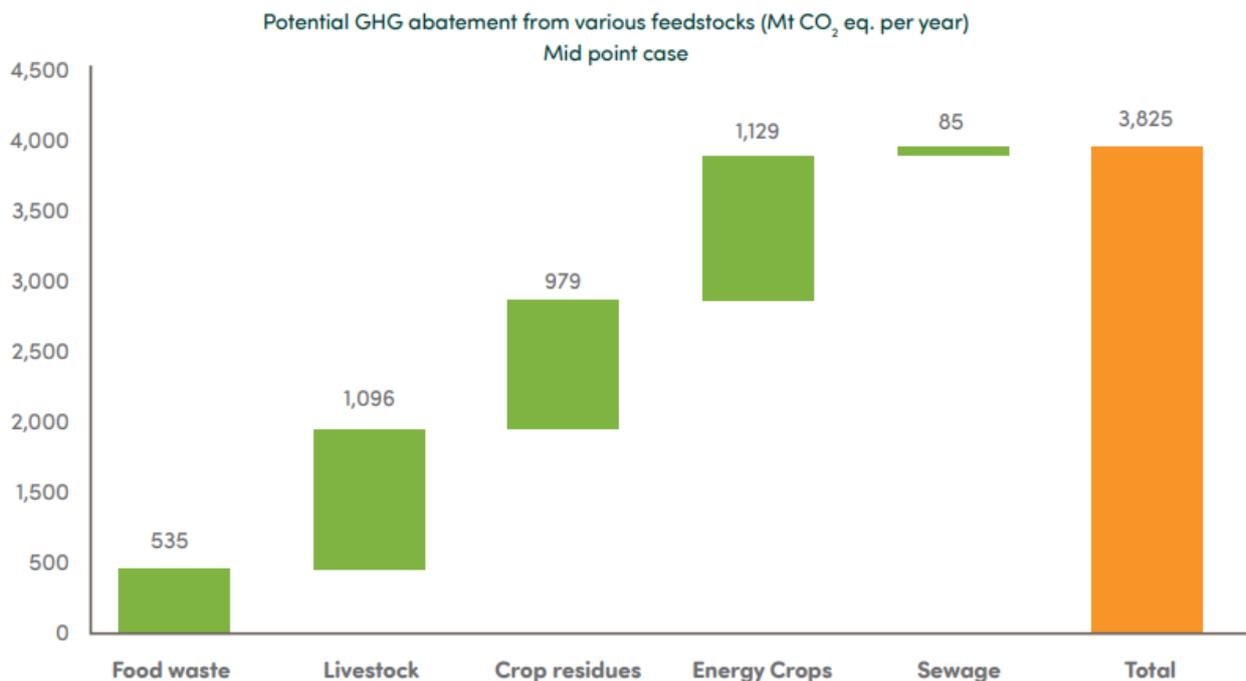


Figura 9: potenziale abbattimento dei GHG dalle varie materie prime prese in esame (fonte WBA: Global Potential of Biogas).

L'analisi svolta dalla WBA permette di affermare che il trattamento dei rifiuti organici tramite AD presenta molteplici vantaggi sotto forma di produzione di energia rinnovabile, mitigazione del cambiamento climatico (sostituzione dei fertilizzanti sintetici e minerali con digestato, riduzione delle emissioni di GHG dei veicoli mediante la sostituzione del diesel e della benzina con il biometano...), contribuzione ad un economia circolare (ricircolo dei nutrienti e della materia

organica presente nei rifiuti organici attraverso AD che successivamente vengono restituiti al suolo sottoforma di digestato), contribuzione alla sicurezza alimentare (attraverso il ripristino dei suoli grazie al riciclaggio dei nutrienti, della materia organica e del carbonio), contribuisce a migliorare la salute e l'igiene attraverso una migliore gestione dei rifiuti solidi (permette, ad esempio, di trattare i rifiuti organici per ridurre gli odori e la diffusione di malattie attraverso una raccolta e gestione corretta) ed infine permette lo sviluppo di un'economia e la creazione di posti di lavoro (generare occupazione nel settore edile a breve termine e occupazione a lungo termine nella produzione e manutenzione di attrezzature, nonché occupazione nella gestione degli impianti).

Il rapporto presenta, quindi, il potenziale globale per la produzione di energia, l'abbattimento dei gas serra e il recupero dei nutrienti attraverso la digestione anaerobica dei rifiuti e delle colture energetiche coltivate. Gli autori riconoscono che le misurazioni di molti di questi input e output diversi è soggetta a un certo grado di variazione.

4.2 DIGESTATO ED EMISSIONI DI METANO DERIVANTI DAL SUO STOCCAGGIO

Una volta che le materie prime utilizzate per la produzione di biogas sono state trattate e l'energia da esse recuperata, ciò che ne rimane viene chiamato digestato o fertilizzante naturale. Questo digestato si presenta ricco di nutrienti e può essere applicato al terreno per il ricircolo di nutrienti e carbonio nel suolo.

Esistono prove empiriche che la digestione anaerobica renda i nutrienti presenti nelle materie prime più disponibili per l'assorbimento da parte delle piante. Dal punto di vista del ciclo di vita, la DA dei rifiuti alimentari e delle acque reflue è in grado di recuperarli, così facendo non andrebbero persi nelle discariche o nei corpi idrici.

Grazie alla sua capacità di rendere i nutrienti maggiormente disponibili, il digestato può essere applicato al terreno come fertilizzante organico. Il suo effetto, però, varia in modo significativo in base ad alcuni fattori esterni come il tipo di terreno in cui viene applicato e le condizioni climatiche⁸². Ne consegue che l'applicazione del digestato ai suoli agricoli è un metodo per ridurre l'impronta del carbonio dell'ambiente attraverso il ciclo dei materiali, la riduzione nell'uso di fertilizzanti chimici per la coltivazione delle colture e il miglioramento dei nutrienti nel suolo.

Tuttavia, le caratteristiche agronomiche dei digestati possono provocare anche effetti dannosi in termini di squilibrio della sostanza organica e soprattutto contenuto di metalli pesanti.

Difatti, prima di applicarlo al terreno sarebbero necessarie delle analisi che tengano conto dei materiali usati per produrlo, del tipo di impianto a biogas che li ha trattati e dei fattori ambientali prevalenti. È importante, perciò, studiare l'analisi chimica e la disponibilità dei nutrienti prima della sua applicazione; infine, dovrebbe essere controllata, anche, la crescita delle colture per permettere ad esse di svilupparsi nel miglior modo possibile.

Al fine di evitare problemi ambientali come la contaminazione del suolo e dell'acqua e la tossicità per i microrganismi a causa di livelli elevati di alcuni elementi indesiderati nel preparato (come i metalli pesanti) è necessaria una sua adeguata gestione⁸³.

⁸² Dr Jain S., 2019, Results and Conclusions. In Global Potential of Biogas pp. 42 – 47. World Biogas Association (WBA).

⁸³ Dahunsi S.O., Ogunwole O.J., 2021, Biofertilizer Production systems: Industrial insights. In Biofertilizer, pp. 21 – 30.

Sebbene quindi, come precedentemente scritto, la digestione anaerobica venga considerata come una tecnologia in grado di ridurre le emissioni di GHG, le caratteristiche chimiche del materiale digerito lo rendono potenzialmente emissivo in termini di emissioni potenziali di metano derivanti dal suo stoccaggio, pertanto, particolare attenzione deve essere posta anche al suo stoccaggio⁸⁴.

I due principali gas prodotti dalla digestione anaerobica sono la CO₂ e il metano (CH₄). Per quanto riguarda l'anidride carbonica, anche se la combustione del biogas rilascia CO₂, la quantità di anidride carbonica generata equivale alla quantità prodotta dalle piante durante il processo di digestione anaerobica che converte il materiale organico. Di conseguenza, il biogas, dal punto di vista delle emissioni di CO₂, è una fonte di energia a zero emissioni che combatte efficacemente il riscaldamento globale.

Gli impianti di biogas consentono anche, di ridurre l'effetto serra catturando e utilizzando le emissioni di metano come combustibile, il che aiuta a frenare l'impatto di questo gas nocivo⁸⁵.

Possono verificarsi però, delle emissioni fuggitive di metano che comprendono perdite accidentali e scarichi diffusi, i quali comportano un fenomeno negativo lungo la filiera del biogas.

I vantaggi della riduzione delle emissioni di metano durante la produzione del biogas, oltre alla mitigazione del cambiamento climatico, consentono di avere una maggiore efficienza in termini di costi in quanto una quantità sempre maggiore di metano può essere prodotta e utilizzata; consentono di aumentare la sicurezza lavorativa riducendo il rischio di esplosione (se la concentrazione di biogas nell'aria è compresa tra il 6 e il 22vol% si potrebbe dare origine ad esplosioni in presenza di una fonte di innesco), e infine, consentono anche la riduzione delle emissioni di odori derivanti, ad esempio, dai composti dello zolfo⁸⁶.

Il metano è un gas serra il cui potere di riscaldamento globale si attesta essere 28-36 volte superiore a quello della CO₂, quindi, nella valutazione dell'impatto dell'industria del biogas sul cambiamento climatico, le emissioni di metano sono un punto fondamentale. Il metano può essere rilasciato durante la sua combustione per la produzione di biogas, oppure, durante lo stoccaggio e la gestione del digestato⁸⁷.

Ne risulta che, uno dei principali metodi per ridurre al minimo le emissioni di metano è un corretto stoccaggio del digestato.⁸⁸

La sua generazione può ancora continuare anche all'interno dei serbatoi di stoccaggio del digestato; il potenziale produttivo residuo, in termini di biogas, è pari al 15% circa della miscela utilizzata per l'alimentazione dell'impianto. Questo può dipendere dalla sua temperatura di stoccaggio (l'attività dei batteri metanigeni risulta maggiore quando il digestato si trova in condizioni di temperatura prossime ai 35°C), dal tempo di ritenzione idraulica che hanno avuto le materie prime utilizzate per

⁸⁴ Dinuccio E., Gioielli F. e Balsari P., 2011, Emissioni di metano ed ammoniaca legate alle fasi di stoccaggio e distribuzione del liquame digerito. In *Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione*, ed Castelli S., 245-282.

⁸⁵ Gadirli G., Pilarska A. A., Dach J., Pilarski K., Kolasa-Więcek A. e Borowiak C., 2023, *Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospect*.

⁸⁶ European Biogas Association (EBA), 2023, Fugitive methane emission sources. In *Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions*, pp 10 – 13.

⁸⁷ Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L., Naja N. e Cecinato A., 2018, Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. In *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* (53), pp 899 – 906.

⁸⁸ European Biogas Association (EBA), 2023, Fugitive methane emission sources. In *Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions*, pp 10 – 13.

produrlo, dalla temperatura dell'aria circostante, oltre che dalla tipologia di biomasse utilizzate per l'alimentazione del digestore (più energy crops vengono utilizzate all'interno della miscela di alimentazione, più alto sarà il potenziale metanigeno finale del digestato), perciò, l'uso di serbatoi di stoccaggio del digestato non a tenuta di gas può causare emissioni indesiderate⁸⁹.

Il raffreddamento e tempi di ritenzione adeguati possono ridurre al minimo le emissioni.

Per tali ragioni, alcuni Paesi dell'UE si sono dichiarati favorevoli all'obbligo di copertura del digestato. Ciò consentirebbe sia di ridurre al minimo le emissioni di metano e GHG della digestione anaerobica, sia di recuperare il potenziale metanigeno residuo⁹⁰.

La mitigazione delle emissioni di metano durante il processo di DA inizia durante la fase di progettazione dell'impianto, in quanto i materiali utilizzati per produrlo dovrebbero essere tecnicamente a prova di perdita a lungo termine.

Una volta che l'impianto è avviato per la produzione di biogas attraverso la DA, il raggiungimento di una decomposizione quasi completa della materia organica digeribile è indicato come la misura di mitigazione più importante. Pertanto, è importante garantire un HRT sufficiente per tutti i substrati utilizzati per alimentare il digestore; in questo modo, anche le emissioni di metano dallo stoccaggio del digestato saranno ridotte.

Anche se, l'entità delle emissioni che avvengono durante il suo stoccaggio varia a seconda della materia prima utilizzata, dal volume di stoccaggio e dalle variazioni stagionali della temperatura ambientale, molti ricercatori sono giunti alla conclusione che la gestione del digestato svolge un ruolo importante nell'impatto delle emissioni di metano; alcuni hanno anche avanzato l'idea di rendere obbligatoria la copertura delle vasche di digestato, in quanto, secondo uno studio condotto dall'EBA (European Biogas Association) gli impianti con stoccaggio chiuso del digestato raggiungono tassi di emissione inferiori all'1% (figura 10) rispetto a quelli con digestato aperto (figura 11)⁹¹⁹².

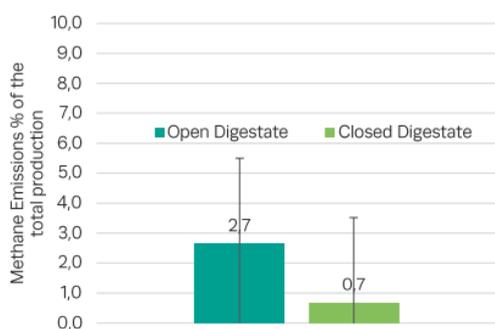


Figura 10: emissioni fuggitive di metano (%del metano prodotto) da stoccaggio del digestato a cielo aperto (Fonte: database EBA).



Figura 11: immagine di una vasca di stoccaggio aperta ed una chiusa.

⁸⁹ Dinuccio E., Gioielli F. e Balsari P., 2011, Emissioni di metano ed ammoniaca legate alle fasi di stoccaggio e distribuzione del liquame digerito. In *Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione*, ed Castelli S., 245-282.

⁹⁰ Dinuccio E., Gioielli F. e Balsari P., 2011, Emissioni di metano ed ammoniaca legate alle fasi di stoccaggio e distribuzione del liquame digerito. In *Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione*, ed Castelli S., 245-282.

⁹¹ Coperture vasche di stoccaggio - CMA (b-cma.it)

⁹² European Biogas Association (EBA), 2023, Results from measurement campaigns. In *Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions*, pp 28 – 32.

Sulla base degli studi presi in esame si è visto come la digestione anaerobica ha un ruolo fondamentale nella riduzione delle emissioni di metano sia durante lo stoccaggio del digestato che durante la produzione di biogas. Le emissioni vengono evitate quando la materia organica, come letame e rifiuti organici, viene portata all'interno di un ambiente chiuso e controllato.

In un impianto di biogas, il metano viene catturato e utilizzato, consentendo così, di diminuire il suo rilascio nell'atmosfera. Ad esempio, senza la digestione anaerobica il letame potrebbe essere immagazzinato nelle aziende agricole e generare un rilascio incontrollato di metano⁹³.

Si è visto quindi, che l'AD ha il potenziale per ridurre in modo sostanziale le emissioni fuggitive di metano ma per farlo devono essere soddisfatte tre condizioni principali:

1. L'impianto di digestione anaerobica deve essere ben progettato in modo da eliminare le emissioni fuggitive di metano;
2. La progettazione e il funzionamento dell'impianto devono garantire un tempo di ritenzione idraulico (HRT) adeguato a estrarre la maggior parte dell'energia dai substrati organici;
3. Il serbatoio di stoccaggio che riceve l'effluente dall'impianto di biogas deve essere dotato di una copertura a tenuta di gas per raccogliere e riciclare il metano residuo⁹⁴.

4.3 COMPETIZIONE NELL'USO DEL SUOLO

Le differenti possibilità di destinazione di uso dei terreni hanno creato e stanno ulteriormente creando una competizione per la terra, dovuta ad un aumento della popolazione globale che è in continua crescita, ad un cambio della domanda dei prodotti alimentari, ad una modifica dei sistemi di approvvigionamento energetico a causa dell'esaurirsi delle fonti fossili e quindi ad una conseguente ricerca di fonti alternative per soddisfare tale domanda e, infine, agli organismi di governo tramite una serie di politiche attuate per contrastare il cambiamento climatico che hanno conseguenze secondarie sull'uso della terra.

Politiche per il clima, fabbisogno energetico e fabbisogno alimentare non trovano un'integrazione sostenibile sui territori, tanto è vero che a livello internazionale si sente sempre più parlare di "*food-energy-environment trilemma*" (Tilam et al, 2009)⁹⁵.

L'aumento della domanda e della produzione di energia da fonti alternative continuerà a crescere nei prossimi anni e, con l'espansione del settore della bioenergia la domanda di terreni per la produzione di colture bioenergetiche sarà in costante aumento. Questo aumento costante della domanda di terreno rende necessario convertire ulteriore suolo ad uso agricolo e/o migliorare la produttività dei terreni agricoli esistenti, con conseguenti cambiamenti diretti o indiretti nell'uso del suolo.

⁹³ European Biogas Association (EBA), 2023, Results from measurement campaigns. In Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions, pp 28 – 32.

⁹⁴ Massé D. I., Talbot G. e Gilbert Y., 2011, On farm biogas production: A method to reduce GHG emission and develop more sustainable livestock operation. In Animal Feed Science and Technology 166-167, pp 436 – 445.

⁹⁵ Carrosio G., e Osti G., 2012, Conflitto cibo-energia ed oltre: il caso degli impianti a biogas del Nord Italia. In Agricoltura Istituzioni Mercati.

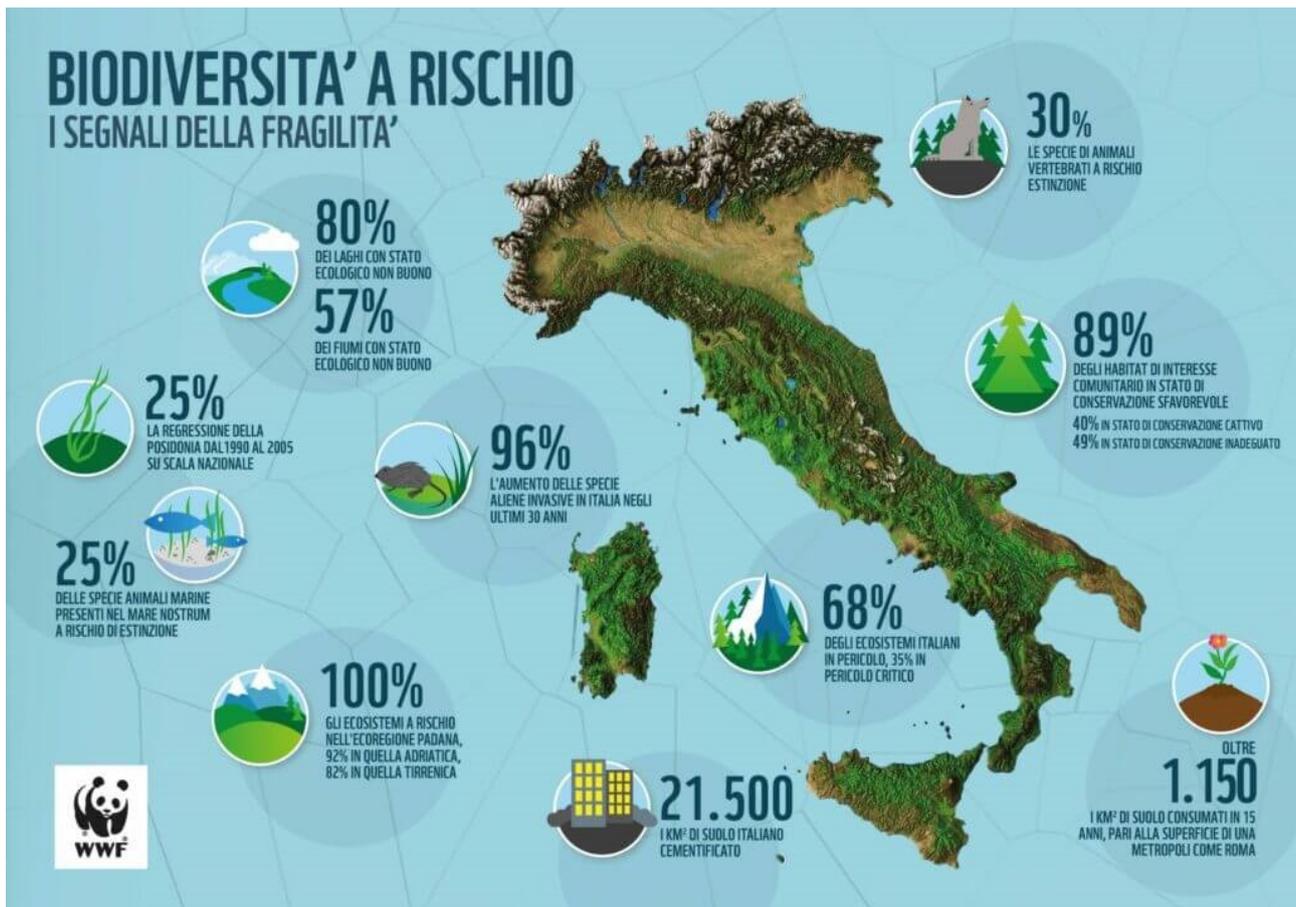


Figura 12: biodiversità a rischio in Italia.

Il cambiamento di uso del suolo viene considerato uno dei principali fattori che determinano la perdita di biodiversità a livello globale e vi è una forte preoccupazione che un'estesa produzione di materie prime per la produzione di bioenergia possa aggravare la perdita di biodiversità⁹⁶(ad esempio figura 12 per quanto riguarda l'Italia)⁹⁷.

Gli impatti più dannosi sulla biodiversità si riscontrano quando gli habitat naturali, i terreni agricoli ad alto valore naturale o gli habitat prioritari per la conservazione della natura verranno convertiti in colture bioenergetiche⁹⁸.

Questa tipologia di coltura, però, se porta ad un aumento dell'eterogeneità degli habitat nei terreni agricoli, o se aiuta ad invertire gli effetti della perdita di biodiversità derivanti dall'abbandono di terreni agricoli marginali potrebbe essere benefica per la biodiversità.

Questo fenomeno, derivante dall'interazione di una serie di fattori che ne sono la causa, lo rende molto complesso. Produzioni feed-food, infrastrutture, urbanizzazione, attività estrattive, conservazione ambientale sono tutti esempi di utilizzi del suolo che, in un paese carente di grandi

⁹⁶ Dauber J., e Bolte A., 2014, Bioenergy: Challenge or support for the conservation of bioenergy? In GCB Bioenergy, pp 180-182.

⁹⁷ WWF, 2023, Ricchezza del patrimonio naturalistico italiano. In Biodiversità Fragile, maneggiare con cura: Status, tendenze, minacce e soluzioni per un futuro nature-positive pp.: 12-13.

⁹⁸ Dauber J., e Bolte A., 2014, Bioenergy: Challenge or support for the conservation of bioenergy? In GCB Bioenergy, pp 180-182.

spazi aperti (ad esempio l'Italia) entrano in competizione e, come conseguenza, il modo in cui usare il terreno (LUC – Land Use Change –) diventa complesso⁹⁹.

Negli ultimi 50 anni, i maggiori effetti sul cambiamento della biodiversità negli ecosistemi terrestri sono stati causati dal cambiamento di uso del suolo (LUC), difatti, la maggior parte delle ricerche sugli impatti sulla biodiversità della produzione di colture energetiche si sono concentrate sul cambiamento di uso del suolo¹⁰⁰.

Un altro aspetto da prendere in considerazione quando si modifica l'utilizzo del suolo è il pool di stoccaggio del carbonio (serbatoi di carbonio in grado di assorbire la CO₂ diminuendo la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera e di conseguenza diminuire il riscaldamento globale provocato dall'effetto serra). Generalmente, il carbonio organico viene immagazzinato in cinque diverse "vasche": vegetazione fuori terra, vegetazione sottoterra, legno morto, lettiera e terra. Quando si verifica un cambiamento di utilizzo del suolo questi stock di carbonio organico del suolo (SOC) cambiano fino a raggiungere un nuovo equilibrio: anche piccole variazioni possono avere una rilevanza molto importante nel bilancio dei gas a effetto serra.

I cambiamenti di uso del suolo sono quindi ritenuti particolarmente importanti per la loro capacità di ridurre i GHG dei sistemi bioenergetici basati su colture dedicate o su residui agricoli e forestali.

I LUC possono essere di due tipi:

1. LUC diretto: il LUC diretto si verifica quando le materie prime per scopi energetici vengono messe in un terreno che era precedentemente destinato ad un altro uso (ad esempio la conversione di foreste in piantagioni per le colture energetiche) generando così dei cambiamenti nello stock di carbonio organico del suolo. A seconda dell'uso precedente del terreno, questo tipo di LUC può essere uno svantaggio o un vantaggio¹⁰¹:
 - Quando una foresta viene convertita in terreno agricolo per la produzione di bioenergia, si può prevedere una perdita di carbonio oltre che, una diminuzione della biodiversità. Questa perdita di carbonio influisce sul bilancio dei gas serra in modo negativo.
 - Quando i terreni messi a riposo vengono messi in produzione, o le colture erbacee perenni sostituiscono le colture annuali, i depositi di carbonio possono aumentare. Questo significa che si ha un aumento del sequestro di anidride carbonica atmosferica che verrà immagazzinata nel carbonio organico del suolo caratterizzando, così, un effetto positivo.
2. LUC indiretto: il LUC indiretto si verifica quando il terreno utilizzato per la produzione di materie prime alimentari o mangimi viene trasformato per la produzione di colture bioenergetiche e la domanda per l'uso precedente del suolo (materie prime per l'alimentazione e mangimi) viene spostata in altri luoghi (ad esempio, l'espansione di terreni agricoli dopo la deforestazione).

⁹⁹ Carrosio G., e Osti G., 2012, Conflitto cibo-energia ed oltre: il caso degli impianti a biogas del Nord Italia. In Agricoltura Istituzioni Mercati.

¹⁰⁰ Immerzeel D. J., Verweij P. A., Van der Hilst F. e Faaij A. P. C., 2013, Biodiversity impacts of bioenergy crop production: a state-of-the-art review. In GCB Bioenergy (6): 183-209.

¹⁰¹ Cherubini F. e Hammer Strømman A., 2011, Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. In Bioresource Technology (102): 437-451.

Quando, invece, le colture bioenergetiche sono coltivate sui terreni incolti, marginali o degradati dove in precedenza non venivano coltivate colture convenzionali, non si verifica alcun LUC indiretto e il bilancio dei gas serra può aumentare positivamente¹⁰².

Tra i principali metodi per ovviare al problema della competizione nell'uso del suolo troviamo quello di sostituire le colture energetiche dedicate con colture di copertura energetiche per la produzione di biogas e quello di utilizzare i terreni marginali per la produzione di bioenergia.

4.4 LE COLTURE DI COPERTURA

Quando sempre più aree arabili vengono dedicate alla coltivazione di colture energetiche, la biodiversità deve essere preservata e, una delle soluzioni per evitare la monocoltura può essere la coltivazione di diversi tipi di colture come in un sistema di doppia coltivazione o lo sviluppo di un sistema di rotazione pluriennale diversificato¹⁰³.

Le colture di copertura energetiche possono generare biomassa consequenziale senza competere con le colture alimentari per l'uso del suolo.

Le colture di copertura energetica vengono seminate e raccolte tra due colture da reddito. Questa tipologia di coltura non è una coltura commerciale e, quindi, non compete con le colture alimentari in quanto si sviluppa in un periodo che solitamente è troppo breve per permettere la coltivazione di colture alimentari e la sua biomassa viene raccolta e digerita anaerobicamente per produrre biogas. Solitamente, vengono piantate nel periodo di maggese estivo (da giugno ad ottobre) o durante il periodo di maggese invernale (da settembre a maggio).

Per produrre una quantità sufficiente di biomassa per la produzione di biogas, è necessario prestare attenzione alle date di semina e di raccolta, il che potrebbe richiedere agli agricoltori di riprogettare le rotazioni delle colture¹⁰⁴.

L'utilizzo di colture di copertura energetica, oltre a consentire la produzione di biomassa utilizzabile negli impianti a biogas, fornisce anche alcuni vantaggi: quello di agire da filtri vegetali per il trattamento delle acque reflue, consentono di trattenere i nutrienti dall'acqua di deflusso e possono limitare l'erosione del suolo provocato dal vento o dall'acqua, quello di diminuire la compattazione del suolo e quello di aumentare le scorte di carbonio nel suolo¹⁰⁵.

¹⁰² Cherubini F. e Hammer Strømman A., 2011, Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. In *Bioresource Technology* (102): 437-451.

¹⁰³ Bo Holm Nielsen J., Oleskowicz-Popiel P., Al Seadi T., ACABS Research Group, Esbjerg Institute of Technology, Aalborg University, Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 2007, Energy crop potential for bioenergy in EU-27. In *Proceedings 15. European Biomass Conference & Exhibition*, 94-103. Berlin, Germany, 7-11 May.

¹⁰⁴ Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. e Constantin J., 2022, Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. In *Agronomic for Sustainable Development* (57).

¹⁰⁵ Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Annex 3: Biomass resources and potential. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 17-26.

4.4.1. Aumento del carbonio organico nel suolo

Gli aumenti di biomassa sotterranea (radici) possono essere particolarmente importanti per aumentare la concentrazione di carbonio nel suolo. L'aumento degli stock di carbonio nel suolo si ha principalmente nel lungo termine.

La misura in cui le colture di copertura aumentano il SOC varia da sito a sito e può dipendere dall'apporto di biomassa delle colture di copertura, dagli anni di utilizzo delle stesse (generalmente nel lungo termine le colture di copertura aumentano il SOC; i loro effetti non sono visibili nei primi anni dopo l'insediamento), dalla gestione e lavorazione del terreno, e dal clima (ad esempio, la quantità di precipitazioni influisce sulla produzione di biomassa, negli ambienti semiaridi il carbonio organico può aumentare con le colture di copertura ma, a causa delle minori precipitazioni la biomassa impiega più tempo ad accumularsi)¹⁰⁶.

4.4.2 Erosione del suolo

La diminuzione dell'erosione del suolo può essere diminuita sia tramite una minore riduzione dell'erosione idrica che tramite una minore riduzione dell'erosione dovuta al vento.

La diminuzione dell'erosione idrica è dovuta al fatto che la perdita di terreno per ruscellamento può diminuire fino all'80%, questo consente anche una minore perdita dei nutrienti disciolti nell'acqua che può portare ad un miglioramento della fertilità del suolo e della produttività delle colture.

Se stabilite e gestite in modo corretto nelle regioni semiaride le colture di copertura permettono, oltre alla riduzione dell'erosione del suolo, anche la cattura dell'acqua piovana di irrigazione.

Per quanto riguarda i rischi di erosione eolica le colture di copertura sono in grado di proteggere la superficie del suolo riducendone l'erosione, questo permette un aumento delle capacità strutturali del suolo e un aumento della concentrazione di carbonio nel suolo che è uno dei principali fattori che contribuiscono alla stabilità e alla riduzione della frazione erodibile dal vento¹⁰⁷.

4.4.3 Compattazione del suolo

La compattazione del suolo è un fenomeno sempre più frequente dovuto principalmente all'uso di macchinari pesanti per la gestione del suolo.

La compattazione del suolo riduce il flusso idrico, l'assorbimento di nutrienti e di acqua, la crescita delle radici e la resa delle colture.

I vantaggi della riduzione di compattazione del suolo dipendono dalla tipologia di coltura di copertura utilizzata e dalle caratteristiche dell'apporto di biomassa sotterranea (lunghezza e dimensione delle radici).

¹⁰⁶ Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. In *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.

¹⁰⁷ Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. In *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.

Un altro beneficio è che, riducendo la compattazione si ha anche un miglioramento delle capacità idrauliche del suolo dovuto ad un aumento dell'infiltrazione dell'acqua e ad un aumento della capacità di ritenzione idrica¹⁰⁸.

4.4.4 Assorbimento dei nutrienti

Le colture di copertura consentono di trattenere i nutrienti consentendo di gestire le aggiunte di nutrienti in eccesso derivanti dall'utilizzo di letame o fertilizzanti chimici e organici riducendo così il carico di nutrienti delle acque a valle e contribuendo a ridurre l'inquinamento delle acque¹⁰⁹.

In conclusione, l'utilizzo di colture di copertura energetiche offre una serie di vantaggi in quanto riducono l'erosione del suolo, permettono la cattura delle acque piovane e di irrigazione permettendo la riduzione del ruscellamento provocato da esse e un maggiore assorbimento dei nutrienti e infine consentono anche un aumento del contenuto di carbonio organico nel suolo.

Detto questo, però, l'introduzione delle colture energetiche nei cicli di coltivazione di colture alimentari può causare alcuni svantaggi come l'aumento dell'uso di mezzi pesanti per preparare il terreno con il rischio di una sua maggiore compattazione, il rischio di ridurre la resa delle colture successive per via della competizione per l'acqua (questo fenomeno è più accentuato nelle zone semiaride) e per i nutrienti e il rischio di ritardare la semina delle colture alimentari.

Tutte queste problematiche, pertanto, portano gli agricoltori a guardare l'introduzione delle colture energetiche nelle rotazioni per la produzione alimentare con scetticismo. Se queste problematiche venissero in parte risolte, gli agricoltori vedrebbero le colture di copertura energetiche non solo come una nuova fonte di reddito, ma anche come un metodo per migliorare la qualità del loro terreno a lungo termine, ad esempio attraverso l'aumento del SOC nel lungo periodo, una riduzione dell'erosione del suolo o tramite un aumento dell'assorbimento dei nutrienti che comporta una potenziale riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti¹¹⁰.

4.5 UTILIZZO DI TERRENI MARGINALI

Per la produzione di biomassa da colture energetiche si sta diffondendo sempre di più l'uso di terreni marginali, ma che cosa si intende con marginalizzazione?

Con il termine marginalizzazione viene indicato il processo per cui le attività produttive non riescono a garantire un reddito adeguato alle imprese, a causa degli elevati costi derivanti dalle limitazioni ambientali, sociali e logistiche.

La principale differenza tra il termine abbandono e il termine marginalizzazione è che per abbandono si intende la sospensione temporanea o definitiva delle attività produttive.

¹⁰⁸ Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. IN *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.

¹⁰⁹ Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. IN *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.

¹¹⁰ Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. e Constantin J., 2022, Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. In *Agronomic for Sustainable Development* (57).

Per terreni agricoli marginali si intende, invece, i terreni con limitazioni che, nel complesso, sono gravi per l'applicazione prolungata di un determinato uso e/o sono sensibili al degrado del suolo, a seguito di un intervento umano inappropriato, e/o hanno già perso parte o tutta la loro capacità produttiva a seguito di interventi umani inappropriati e comprendono anche siti contaminati e potenzialmente contaminati che costituiscono un potenziale rischio per la salute degli essere umani, per l'acqua e per gli ecosistemi¹¹¹.

Nel corso del tempo, tutti i fattori che caratterizzano un terreno marginale rischiano di portare all'abbandono di questi terreni. Il principale pericolo a cui vanno incontro tali aree è quello di entrare in un circolo vizioso caratterizzato dalla diminuzione e dall'invecchiamento della popolazione, dalla contrazione dei servizi offerti, dall'indebolimento del tessuto produttivo e dalla riduzione del reddito.

L'utilizzo in queste aree degli impianti a biogas e, di conseguenza, l'uso della digestione anaerobica attraverso pratiche a basso input potrebbe avere un'importanza molto elevata in quanto si potrebbero "rigenerare" questi terreni andando a creare una domanda locale per foraggi dove la tecnologia oggi è scomparsa e; consentirebbe anche, la possibilità di ripristinare la fertilizzazione organica diminuendo così i fenomeni erosivi, la desertificazione e il dissesto idrogeologico, che proprio l'abbandono di pratiche agricole spesso determina¹¹².

Bisogna ricordare però, che la conversione di foreste marginali e aree marginali ad alto valore naturalistico per la coltivazione di colture bioenergetiche non è auspicabile in quanto causerebbe impatti socio-ecologici negativi come la perdita di biodiversità, un aumento dell'inquinamento ambientale e una diminuzione del valore ricreativo del paesaggio.

Al contrario, l'utilizzo di terreni agricoli marginali per la produzione di bioenergia, tramite l'utilizzo di pratiche a basso input, potrebbe migliorare il valore complessivo del terreno e proteggerli da un ulteriore degrado del suolo¹¹³.

Le strategie agronomiche per l'applicazione di un sistema di gestione delle colture a basso input dovrebbero essere viste come un insieme di strategie che prendono in considerazione vari fattori come l'interazione tra le piante, il suolo e l'atmosfera e l'uso efficiente dei fattori di produzione per consentire la massima produzione con un'offerta minima di input.

Lo sviluppo di sistemi agricoli a basso input su aree marginali deve tenere conto non solo dei vincoli biofisici, ma anche delle esigenze socio-economiche ed ecologiche delle rispettive aree, per permettere ciò, la principale cosa da fare è la scelta della coltura o delle colture più idonee in un dato territorio, perché tutte le altre pratiche agricole (lavorazione del terreno, concimazione, irrigazione...) dipendono fortemente dal tipo e dalle prestazioni specifiche del sito della coltura¹¹⁴.

Come scritto in precedenza, le colture energetiche possono essere coltivate anche su terreni agricoli marginali contaminati da metalli pesanti.

¹¹¹ Von Cossel M. et al., 2019, Marginal Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production. In *Energies Journals* (16). Selected papers from 27th European Bionass Conference & Exhibition (EUBCE 2019).

¹¹² Bozzetto S., Pezzella M., Rossi L. e Pecorino B, 2016, Le biomasse di integrazione. In *Considerazioni sul potenziale del "biogas fatto bene" italiano ottenuto dalla digestione anaerobica di matrici agricole*, pp. 10 – 27.

¹¹³ Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In *Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects* (10).

¹¹⁴ Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In *Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects* (10).

Se queste colture vengono coltivate in questa tipologia di terreno il principale effetto positivo che possono dare è la fitodepurazione dell'area: la presenza di vegetazione può migliorare le proprietà del suolo, controllarne la sua erosione e aumentare la diversità biologica e paesaggistica e, dopo un certo periodo di tempo, l'area potrebbe tornare disponibile per la coltivazione di colture alimentari. Tuttavia, le rese possono essere influenzate dalla percentuale della quantità di materiale contaminato presente nel terreno che, se eccessivo, può causare effetti tossici per la pianta. Quando invece i livelli di contaminazione del suolo non sono abbastanza alti da indurre tossicità, o quando i contaminanti presenti non sono biodisponibili per essere accumulati dalle piante, i raccolti potrebbero non esserne influenzati.

Alcune piante che si prestano bene alla coltivazione per la produzione di biomassa per bioenergia sono indicate in figura 11¹¹⁵.

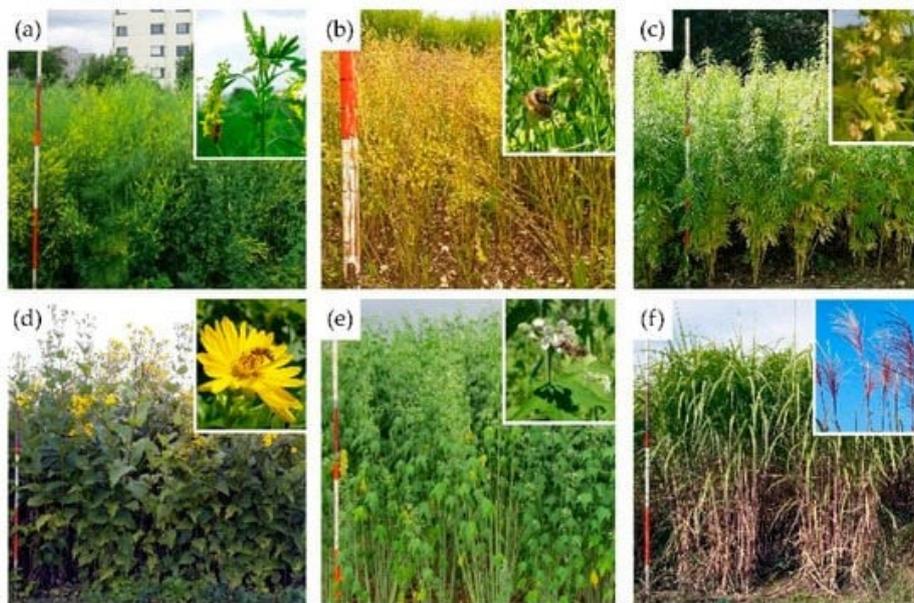


Figura 13: piante per la produzione di bioenergia in terreni marginali: **a)** mellito giallo come parte di una miscela di piante per la produzione di biogas, **b)** camelia, **c)** canapa, **d)** pianta a coppa, **e)** malva della Virginia e **f)** miscanto (Fonte: Von Cossel M. et al., 2019).

Si è evidenziato quindi, che la coltivazione di colture energetiche nei terreni agricoli marginali ha la capacità di “rigenerare” questi terreni, combattere i fenomeni di erosione del suolo, la desertificazione e il dissesto idrogeologico. Tuttavia, va tenuto presente che gli effetti della coltivazione delle colture bioenergetiche su terreni agricoli marginali non solo rappresenta un rischio per la biodiversità nel caso in cui vengano convertite foreste marginali e aree marginali ad alto valore naturalistico ma, può anche servire agli sforzi di conservazione del territorio. Gli effetti della coltivazione di queste colture dipendono principalmente dalla gestione agricola, sottolineando così l'importanza di utilizzare la coltura più adatta in funzione del sito di appartenenza ma anche della regione tenendo in considerazione il clima in quanto è uno dei fattori limitanti per la crescita di tutte le piante.

Alcune di queste colture, possono contribuire anche ad un'agricoltura più favorevole per gli impollinatori sui terreni agricoli marginali. Ciò vale per le colture bioenergetiche annuali come la

¹¹⁵ Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects (10).

camelia (figura 1B) in quanto non è molto esigente, si adatta a diversi tipi di terreni agricoli marginali e produce nettare e polline.

L'uso di colture bioenergetiche, se coltivate con l'utilizzo di fertilizzanti organici (come, ad esempio, il digestato) in grado di migliorare il suolo, potrebbero contribuire ad una produzione di biomassa più sostenibile e allo stoccaggio di carbonio nel suolo¹¹⁶.

In conclusione, l'utilizzo di questi terreni per la produzione di bioenergia può contribuire a ridurre la competizione di uso del suolo, ma il loro sfruttamento non può prescindere dalla soluzione dei problemi sociali ed ecologici che ne hanno determinato la marginalizzazione. Ad ogni modo, la loro produzione contribuirà ad aumentare il potenziale del biogas¹¹⁷.



Figura 14: esempio di terreno marginale

¹¹⁶ Von Cossel M. et al., 2019, prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In *Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects* (10).

¹¹⁷ Bozzetto S., Pezzella M., Rossi L. e Pecorino B, 2016, Le biomasse di integrazione. In *Considerazioni sul potenziale del "biogas fatto bene" italiano ottenuto dalla digestione anaerobica di matrici agricole*, pp. 10 – 27.

5. CONCLUSIONI

Sulla base degli studi presi in esame, possiamo dedurre che i sistemi agricoli a biogas sembrano essere uno dei modi per rallentare il cambiamento climatico e per aumentare l'autosufficienza energetica. La produzione di biogas agricolo può essere analizzata sotto tre profili principali: ecologico, economico e sociale.

Di questi tre profili quello su cui viene posta maggiore enfasi è quello ambientale in quanto contribuisce al raggiungimento di una parte degli obiettivi dell'Agenda per lo sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, come quello di "garantire l'accesso ad un'energia economica, affidabile, sostenibile e moderna per tutti (obiettivo n°7)". Questo impone sfide come l'aumento della quota di energia proveniente da fonti rinnovabili nel mix energetico globale e la promozione di investimenti nelle infrastrutture energetiche e nelle tecnologie energetiche pulite¹¹⁸.

Un altro degli obiettivi dell'Agenda, che lo sviluppo del biogas permette di raggiungere, è il numero 13: "Azione per il clima", in quanto mira a ridurre gli effetti del cambiamento climatico tramite una riduzione dei gas serra ed evitando la deforestazione, e infine, il 15, ovvero "Vita sulla terra", grazie al ricircolo dei nutrienti tramite l'utilizzo del digestato in sostituzione dei fertilizzanti fossili¹¹⁹.

In generale, la produzione di biogas tramite l'utilizzo della digestione anaerobica permette di convertire i rifiuti in una fonte di energia redditizia; questi rifiuti possono essere utilizzati per la produzione di calore, elettricità o biometano (carburante per i veicoli ottenuto dall'upgrading del biogas). Tutte queste potenzialità derivanti dalla produzione ed utilizzo del biogas consentono di abbassare le emissioni dei gas ad effetto serra e il miglioramento della qualità ambientale.

Un altro dei vantaggi è la possibilità di utilizzare il suo sottoprodotto (digestato) come alternativa ai fertilizzanti chimici, offrendo così la possibilità di riciclare i nutrienti nel sistema alimentare migliorando le prospettive del settore agricolo.

In generale la produzione di biogas tramite l'uso della tecnologia di digestione anaerobica permette:

1. La produzione di energia rinnovabile derivante da fonti alternative come i reflui zootecnici, i residui colturali, le colture energetiche dedicate, l'utilizzo degli scarti del settore dell'agroindustria (siero, sottoprodotti orto-frutticoli e scarti di macellazione), le acque reflue industriali e domestiche, i fanghi industriali e domestici e la frazione organica dei rifiuti solidi industriali.
2. La mitigazione del cambiamento climatico tramite la sostituzione dei combustibili fossili, la riduzione dell'emissione dei gas serra derivanti dai veicoli a benzina o diesel e la sostituzione dei fertilizzanti chimici e minerali con il digestato evitando il rilascio incontrollato di metano dalle discariche.
3. Contribuisce ad un'economia circolare migliorando l'autosufficienza delle aziende che utilizzano il biogas in quanto l'energia prodotta può essere utilizzata dalle aziende stesse per ricavarne elettricità e/o calore da utilizzare in loco e, inoltre, consente il ricircolo dei nutrienti nel terreno e della materia organica tramite l'utilizzo del digestato.

¹¹⁸ Was A. et Al., 2020, The potential of Agricultural Biogas Production in Ukraine – Impact on GHG Emission and Energy Production. In Energy Supply within Sustainable Agricultural Production: Challenges, Policies and Mechanisms (21).

¹¹⁹ Bartoli A., Hamelin L., Rozakis S., Borzęcka M. e Brandão M., 2019, Coupling economic and GHG emission accounting models to evaluate the sustainability of biogas policies. In Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 133-148.

4. Consente, tramite l'uso di colture di copertura energetiche, il ripristino dei terreni marginali riducendone l'erosione del suolo e diminuendone la compattazione, aumentandone la capacità di assorbimento dei nutrienti e consentendo, così, di aumentare il contenuto di carbonio organico nel suolo.

Nonostante la possibilità di ricavare il biogas utilizzando residui agricoli, residui industriali e reflui zootecnici, negli ultimi anni, l'utilizzo di colture energetiche negli impianti di digestione anaerobica sta prendendo sempre più piede in quanto consentono la stabilizzazione del processo produttivo e portano ad un aumento delle rese in biogas.

Questo aumento di utilizzo delle colture energetiche sta suscitando una serie di preoccupazioni sul potenziale impatto negativo sulla sicurezza alimentare e sulle ripercussioni ambientali che si potrebbero verificare da un cambiamento di uso del suolo (ad esempio l'aumento della perdita di biodiversità degli ecosistemi naturali), il quale, potrebbe causare impatti ambientali significativi sull'aumento del riscaldamento globale e sulle conseguenti emissioni indirette di anidride carbonica causate da uno spostamento della domanda alimentare.

L'espansione dell'agricoltura intensiva per la produzione di colture energetiche per alimentare gli impianti di biogas può avere un impatto sulla biodiversità attraverso il rilascio di nutrienti e sostanze chimiche che possono portare a cambiamenti nella composizione delle specie negli ecosistemi.

La perdita di biodiversità può verificarsi anche indirettamente, ad esempio, quando l'uso produttivo del territorio sostituito dalle colture energetiche viene ristabilito convertendo gli ecosistemi naturali in terre coltivate o pascoli.

È probabile che il cambiamento climatico modifichi i modelli delle precipitazioni, inoltre, l'aumento delle temperature potrebbe causare un aumento dell'evaporazione e traspirazione dell'acqua.

L'effetto di questo aumento delle temperature non è facile da prevedere. Molto probabilmente, le aree che attualmente sono soggette ad una ridotta disponibilità di acqua saranno soggette a siccità ma, in generale, si prevede che la disponibilità di acqua in molte regioni diminuisca e, quindi, si prevede che i problemi legati all'approvvigionamento di acqua dai bacini fluviali aumenterà.

In generale, i problemi legati al cambiamento climatico supereranno i benefici per i sistemi di acqua dolce, influenzando negativamente la disponibilità di acqua e quindi il potenziale di irrigazione disponibile per le colture.¹²⁰

Ne consegue che l'utilizzo delle colture energetiche tra la coltivazione di due colture alimentari sia svantaggiosa per via delle possibili problematiche che possono insorgere legate alla competizione per l'acqua o alla disponibilità di nutrienti per la coltura successiva¹²¹.

Per far fronte a queste problematiche che andrebbero a ridurre la resa delle colture, vengono utilizzati sempre più spesso input aggiuntivi come l'irrigazione o l'uso di fertilizzanti. L'uso di fertilizzanti però, comporta la necessità di bruciare petrolio per produrli; questo comporta un aumento delle emissioni di GHG e un maggiore sfruttamento delle risorse fossili della Terra¹²².

¹²⁰ Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Annex 3: Biomass resources and potential. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 17-26.

¹²¹ Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Making policy for bioenergy deployment. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 64 – 73.

¹²² Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. e Constantin J., 2022, Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. In *Agronomic for Sustainable Development* (57).

Un altro aspetto da prendere in considerazione durante la coltivazione di queste colture sono le emissioni legate all'uso del suolo. Queste possono verificarsi attraverso l'abbattimento della vegetazione presente per permettere la coltivazione delle colture energetiche, l'applicazione di fertilizzanti sintetici per aumentarne la produttività e l'uso di combustibili fossili durante la coltivazione e la raccolta.

Le emissioni legate all'abbattimento della vegetazione sono prevalentemente CO₂ derivanti dalla perdita di biomassa, ma possono includere emissioni di metano e ossido di azoto nel caso in cui la vegetazione venisse bruciata (pratica vietata ma che in molti paesi sottosviluppati viene ancora praticata). L'uso di fertilizzante produce ossido di azoto.

Le emissioni indirette invece provengono principalmente dalle emissioni causate dal consumo di combustibili fossili, fertilizzanti o altri additivi del terreno utilizzati durante la coltivazione e le emissioni derivanti dallo spostamento dell'attività del suolo¹²³.

Un'altra problematica legata allo sviluppo degli impianti di biogas, e quindi, della coltivazione delle colture bioenergetiche, riguarda i mangimi per gli animali e successivamente i prodotti che si possono ottenere da essi (ad esempio il Parmigiano Reggiano).

Le aziende agricole che prima dello sviluppo degli impianti di biogas utilizzavano il terreno per la produzione di mangimi per gli animali oggi sostituiscono le colture feed con quelle energetiche. Così facendo, i mangimi vengono comprati sul mercato e sono soggetti a rischio di instabilità.

In Italia, ad esempio, i terreni destinati all'insilato di mais coltivato per la produzione di biogas sono passati da meno dello 0,5% nel 2007 a oltre il 10% a fine 2012 della superficie agricola utilizzata; questo aumento è stato favorito dalla politica omnicomprensiva del 2008¹²⁴.

La tariffa del 2008 ha fatto sì che si diffondessero principalmente impianti da 999 kW di potenza che utilizzano come matrici sia effluenti zootecnici che insilati di sorgo o mais, aprendo così un dibattito sul rischio di proliferazioni di clostridi nelle catene alimentari.

Uno studio condotto nel 2012 da Carrosio G. e Osti G.¹²⁵ che ha preso in esame la questione dei clostridi avvenuta in Emilia Romagna ha fatto emergere che: « lo sviluppo degli impianti di biogas ha acceso un dibattito emerso in seno alla Delibera numero 51 del 26 luglio 2011 dell'Assemblea legislativa dell'Emilia-Romagna, che ha definito le disposizioni per la localizzazione degli impianti a biogas.

Il territorio adibito alla produzione di Parmigiano Reggiano non è considerato idoneo agli impianti che "utilizzano silomais o altre essenze vegetali insilate, fatto caso il residuo di processo di fermentazione (digestato), tal quale o trattato, avvenga in terreni ubicati all'esterno del medesimo comprensorio". Questa decisione è stata presa per evitare un incontrollabile incremento della contaminazione con spore di clostridi degli ambienti di produzione del latte, a seguito dell'utilizzo di insilati in associazione a effluenti zootecnici negli impianti a biogas e successivo spandimento dei digestati sui terreni a foraggiare destinate all'alimentazione delle bovine da latte. I clostridi si moltiplicano durante la digestione anaerobica ed entrando nelle catene alimentari interferiscono

¹²³ Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Making policy for bioenergy deployment. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 64 – 73.

¹²⁴ Bartoli A., Hamelin L., Rozakis S., Borzęcka M. e Brandão M., 2019, Coupling economic and GHG emission accounting models to evaluate the sustainability of biogas policies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp 133-148.

¹²⁵ Carrosio G., e Osti G., 2012, Conflitto cibo-energia ed oltre: il caso degli impianti a biogas del Nord Italia. In *Agricoltura Istituzioni Mercati*.

con il processo di fermentazione del Parmigiano Reggiano, generando anidride carbonica all'interno delle forme.

All'origine dell'intervento della Regione Emilia-Romagna vi era uno studio del Crpa (2011) teso a verificare gli effetti del processo di DA sulla presenza di spore di clostridi introdotte negli impianti a biogas tramite liquami e colture dedicate. La sperimentazione ha dimostrato come il digestato proveniente da DA di soli liquami abbia un contenuto di spore inferiore rispetto a quello ottenuto da liquami addizionati di insilati. Proprio per questo motivo la Regione ha cercato di evitare la produzione di biogas da insilati nelle aree soggette alla produzione del Parmigiano Reggiano¹²⁶>>. Dall'analisi di questo studio si può notare come la sostituzione delle colture feed con quelle bioenergetiche può provocare delle ripercussioni sulla produzione del Parmigiano Reggiano creando dei rigonfiamenti di anidride carbonica all'interno delle forme.

I rigonfiamenti di anidride carbonica che si possono verificare nelle forme del Parmigiano Reggiano sono dovuti al fatto che ci possa essere un incremento della contaminazione con spore di clostridi degli ambienti di produzione del latte, a seguito dell'utilizzo di insilati in associazione a effluenti zootecnici negli impianti a biogas con successivo spandimento dei digestati sui terreni a foraggiere destinati all'alimentazione delle bovine da latte.

Un'altra questione derivante dalla coltivazione delle colture bioenergetiche per la produzione di biogas tra due colture alimentari è la compattazione del suolo.

Questo fenomeno è un problema sempre più importante poiché il costante uso di attrezzature agricole (trattori, mietitrebbie e carrelli per i cereali) sempre più grandi e pesanti sta causando questo fenomeno. I principali impatti negativi sono la riduzione del deflusso di acqua, la riduzione dell'assorbimento di nutrienti e acqua, la riduzione della crescita delle radici e la riduzione della resa delle colture.

L'uso di questi macchinari pesanti, oltre a contribuire alla compattazione del suolo, comporta anche un maggiore utilizzo di combustibili fossili e sostanze chimiche che determinano una maggiore emissione di gas ad effetto serra derivanti dal funzionamento e dall'utilizzo di questi¹²⁷.

L'uso di colture di copertura tra la produzione di due colture alimentari può causare, anche, ritardi nella semina e la necessità di utilizzare cultivar precoci. Se la semina viene ritardata la resa può essere ridotta a causa di un accorciamento del periodo vegetativo e, se la semina viene ritardata fino ad un mese circa, il raccolto da reddito successivo non potrà raggiungere la maturità e di conseguenza non potrà più essere utilizzato per alimentare gli umani. Nel caso, invece, venissero usate colture precoci si potrebbe andare in contro ad una potenziale diminuzione della resa delle colture alimentari; perciò, l'uso diffuso di tali pratiche nelle zone adibite alla coltivazione di colture alimentari può portare alla riduzione della produzione alimentare complessiva.¹²⁸

Anche il digestato, che è il sottoprodotto ottenuto dalla digestione anaerobica, può costituire un problema causato principalmente dall'accumulo, dal metodo di stoccaggio e di utilizzo nei terreni.

¹²⁶ Carrosio G., e Osti G., 2012, Conflitto cibo-energia ed oltre: il caso degli impianti a biogas del Nord Italia. In *Agricoltura Istituzioni Mercati*.

¹²⁷ Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. In *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.

¹²⁸ Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. e Constantin J., 2022, Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. In *Agronomic for Sustainable Development* (57).

Uno stoccaggio errato del digestato derivante dal suo accumulo, come scritto in precedenza, può causare un aumento delle emissioni di gas ad effetto serra soprattutto se viene stoccato in vasche a cielo aperto (senza copertura).

L'accumulo del digestato, invece, avviene durante tutto l'anno in quanto può essere applicato solamente in determinati periodi dell'anno. Questo accumulo di digestato fa sì che vi sia uno squilibrio di nutrienti in determinate zone e, di conseguenza, il digestato deve essere trasportato su lunghe distanze in aree in cui sono necessari i nutrienti contenuti in esso. Ciò aumenta i costi di trasporto e le emissioni di gas ad effetto serra¹²⁹.

Infine, lo sviluppo del biogas comporta anche problemi di carattere sociale in quanto i sistemi di coltivazione bioenergetici sono incolpati dell'aumento dei prezzi derivanti dall'affitto dei terreni e dell'aumento dei prezzi dei prodotti alimentari. Questo aumento dei prezzi è dovuto alla competizione nell'uso del suolo.

L'uso di prodotti agricoli, utilizzati per alimentare il digestore, che consumano terreno utile per produrre prodotti alimentari è anche un problema etico, perché questo fa sì che si vada a reperire le materie prime necessarie per l'alimentazione umana su mercati esteri al posto di produrle direttamente sui nostri terreni mentre, in varie parti del pianeta vi sono difficoltà di approvvigionamento¹³⁰.

I principali impatti negativi, quindi, derivanti dai sistemi di produzione di biogas e dalla produzione di colture bioenergetiche su larga scala per la produzione di biogas si riferiscono principalmente a:

1. Impatti ambientali legati alla perdita di biodiversità legata all'abbattimento di ecosistemi naturali per permettere la coltivazione di colture energetiche.
2. Problematiche legate alla competizione per l'uso dell'acqua e per la disponibilità dei nutrienti.
3. Problematiche legate alle emissioni di gas ad effetto serra dovute all'uso del suolo per l'abbattimento della vegetazione presente, all'applicazione di fertilizzanti alle colture e all'uso di combustibili fossili durante la coltivazione e la raccolta.
4. Problematiche legate alla sostituzione dei terreni per la produzione di mangimi per gli animali e successivamente ai prodotti che si possono ottenere da essi (ad esempio il caso del Parmigiano Reggiano avvenuto in Emilia-Romagna).
5. Problematiche legate alla compattazione del suolo.
6. Problematiche legate ai ritardi nella semina e/o all'uso di cultivar precoci.
7. Problematiche legate all'accumulo di digestato nel periodo invernale e al successivo trasporto nelle aree in cui sono necessari i nutrienti contenuti in essi.
8. Problematiche di carattere sociale legato all'aumento dei prezzi degli affitti dei terreni e dei prodotti alimentari e problematiche etiche riguardanti l'approvvigionamento delle risorse alimentari dovute alla sostituzione delle colture alimentari con le colture bioenergetiche.

Tutto questo fa sì che, nonostante i benefici riguardanti la produzione di biogas come la produzione di energia rinnovabile derivante da fonti alternative, la mitigazione dei cambiamenti climatici tramite la riduzione dei combustibili fossili o la riduzione delle emissioni e il potenziale ripristino di territori marginali con l'introduzione di colture di copertura energetica, ci siano ancora molte sfide

¹²⁹ Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In *Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects* (10).

¹³⁰ Pinnavia G., 2023, Biogas/biometano: problemi ambientali per la salute umana.

sociali ed ecologiche per l'implementazione di questo potenziale teorico, soprattutto per quanto riguarda l'accesso ai terreni agricoli marginali e le preoccupazioni riguardanti la biodiversità.

Inoltre, l'uso inadeguato del suolo per la produzione di colture bioenergetiche comporta il rischio di aumentare piuttosto che diminuire le emissioni di gas serra e di alterare le condizioni climatiche, come è stato visto nella massiccia deforestazione a livello globale.

Pertanto, i potenziali impatti negativi sulla biodiversità e sulle condizioni sociali derivanti dalla coltivazione delle colture bioenergetiche per la produzione di biogas devono essere attentamente considerati. Ciò comporta numerose sfide per il futuro della coltivazione delle colture bioenergetiche, tra cui i conflitti nell'uso del suolo con la coltivazione di colture alimentari, i conflitti nell'uso del suolo con la conservazione della biodiversità, i conflitti riguardanti la competizione con le colture alimentari per l'acqua e le sostanze nutritive e le problematiche riguardanti le colture energetiche e l'uso di fertilizzanti e combustibili fossili¹³¹.

Rimangono quindi molti punti interrogativi riguardanti l'effettiva sostenibilità del biogas e delle coltivazioni delle colture bioenergetiche all'interno della filiera agroalimentare.

¹³¹ Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects (10).

6. BIBLIOGRAFIA

1. Aryal N., Mørck Ottosen L. D., Bentien A., Pantalone D. e Wegener Kofoed M. V., 2021, "Bioelectrochemical systems for biogas upgrading and biomethane production" in *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*, pp. 363 – 382.
2. Bartoli A., Hamelin L., Rozakis S., Borzęcka M. e Brandão M., 2019, Coupling economic and GHG emission accounting models to evaluate the sustainability of biogas policies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 133-148.
3. Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Biomass resources and potential. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 17-26.
4. Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Making policy for bioenergy deployment. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 64 – 73.
5. Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Annex 3: Bioenergy routes and conversion technologies. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 85-93.
6. Bauen A., Berndes G., Junginger M., Londo M., Vuille F., 2009, Annex 3: Biomass resources and potential. In *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source*. pp 17-26.
7. Benato A., Marcor A., 2019, Italian Biogas Plan: Trends, Subsidies, Cost; Biogas Composition and Engine Emissions.
8. Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A. e Hergert G.W, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: insights from Studies in Temperate Soils. In *Agronomy Journal*, Volume 107: 2449-2474.
9. Bo Holm Nielsen J., Oleskowicz-Popiel P., Al Seadi T., ACABS Research Group, Esbjerg Institute of Technology, Aalborg University, Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 2007, Energy crop potential for bioenergy in EU-27. In *Proceedings 15. European Biomass Conference & Exhibition*, 94-103. Berlin, Germany, 7-11 May.
10. Bozzetto S., Pezzella M., Rossi L. e Pecorino B, 2016, Le biomasse di integrazione. In *Considerazioni sul potenziale del "biogas fatto bene" italiano ottenuto dalla digestione anaerobica di matrici agricole*, pp. 10 – 27.
11. Cadiou J., Aubert Pierre-M., Meynard Jean-M., 2023, The importance of considering agricultural dynamics when discussing agro-environmental sustainability in futures studies of biogas. *Futures* 153 (103218): 1-16.
12. Carrosio G., 2012, La diffusione degli impianti per la produzione di energia da biogas agricolo in Italia: una storia di isomorfismo istituzionale, in *Studi Organizzativi*, n.2, pp. 9-26, 2012.
13. Carrosio G., e Osti G., 2012, Conflitto cibo-energia ed oltre: il caso degli impianti a biogas del Nord Italia. In *Agricoltura Istituzioni Mercati*.
14. Candolo G., 2006, Energia dalle biomasse vegetali: le opportunità per le aziende agricole.
15. Castelli S., Negri M., 2011, La digestione anaerobica: processo e parametri di controllo. In *Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione*, ed. Castelli S., pp. 163-181.
16. Cherubini F. e Hammer Strømman A., 2011, Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. In *Bioresource Technology* (102): 437-451.
17. Chinicci G., Selvaggi R., D'Amico M. e Biagio P., 2018, Assessment of the potential energy supply and biomethane from the anaerobic digestion of agro-food feedstock in Sicily in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 1, pp.: 6 – 13.

18. Colonna N., Alfano V., Gaeta T., 2009, stima del potenziale di biogas da scarti di macellazione. In *La stima del potenziale di biogas da biomasse di scarto del settore zootecnico in Italia*, pp 66-96.
19. Dahunsi S.O., Ogunwole O. J., 2021, Biofertilizer production systems: Industrial insights. In *Biofertilizer*, pp 21-30.
20. Dauber J., e Bolte A., 2014, Bioenergy: Challenge or support for the conservation of bioenergy? In *GCB Bioenergy*, pp 180-182.
21. Dinuccio E., Gioielli F. e Balsari P., 2011, Emissioni di metano ed ammoniaca legate alle fasi di stoccaggio e distribuzione del liquame digerito. In *Biomasse per la produzione di energia. Produzione, gestione e processi di trasformazione*, ed Castelli S., 245-282.
22. Dell'Orefice G., 2020, Biogas, Italia leader in Europa con 1600 impianti attivi in il Sole 24 ore.
23. Dr Jain S., 2019, Global Potential of Biogas. World Biogas Association (WBA).
24. Dr Jain S., 2019, Introduction. In *Global Potential of Biogas* pp. 4 – 14. World Biogas Association (WBA).
25. Dr Jain S., 2019, Results and Conclusions. In *Global Potential of Biogas* pp. 15 – 20. World Biogas Association (WBA).
26. Dr Jain S., 2019, Results and Conclusions. In *Global Potential of Biogas* pp. 42 – 47. World Biogas Association (WBA).
27. Dr Jain S., 2019, Livestock Manure. In *Global Potential of Biogas* pp. 15 – 20. World Biogas Association (WBA).
28. European Biogas Association (EBA), 2023, Fugitive methane emission sources. In *Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions*, pp 10 – 13.
29. European Biogas Association (EBA), 2023, Results from measurement campaigns. In *Design, build, and monitor biogas and biomethane plants to slash methane emissions*, pp 28 – 32.
30. Fiper, 2020, “La strategia a Biogas di EBA”, in *Report impianti biogas agricolo 2020*, pp 53.
31. Franz L., Giandon P., Rigoli F., 2014, Il processo di digestione anaerobica. In *Presenza di Clostridium Botulinum nei processi di digestione anaerobica*, pp 4-8.
32. Gadirli G., Pilarska A. A., Dach J., Pilarski K., Kolasa-Więcek A. e Borowiak C., 2023, *Biogas Plants: Fundamentals, Operation and Prospect*.
33. Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni E. C.E.T.A. – Centro di Ecologia Teorica ed Applicata di Gorizia, Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P. e Università degli Studi di Udine - Dipartimento di Energetica e Macchine, 2006, Identità della biomassa. In *Energia dalle biomasse: le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali*, ed. Progetto Novimpresa e Area Science Park, 1-44.
34. Immerzeel D. J., Verweij P. A., Van der Hilst F. e Faaij A. P. C., 2013, Biodiversity impacts of bioenergy crop production: a state-of-the-art review. In *GCB Bioenergy* (6): 183-209.
35. Launay C., Houot S., Frédéric S., Girault R., Levavasseur F., Marsac S. e Constantin J., 2022, Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: benefits and environmental impacts. A review. In *Agronomic for Sustainable Development* (57).
36. Massé D. I., Talbot G. e Gilbert Y., 2011, On farm biogas production: A method to reduce GHG emission and develop more sustainable livestock operation. In *Animal Feed Science and Technology* 166-167, pp 436 – 445.
37. Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L., Naja N. e Cecinato A., 2018, Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. In *Journal of*

- Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering (53), pp 899 – 906.
38. Piccini S., Soldano M., Fabbri C. e CRPA, 2011, La produzione di biogas del settore agricolo in Italia, *Agriregionieuropa* anno 7 n°24, Marzo 2011.
 39. Piccini S., Centro Ricerche Produzioni Animali – CRPA S.p.A., 2003, La digestione biologica dei rifiuti organici ed altre biomasse: la situazione e le prospettive in Italia.
 40. Pinnavia G., 2023, Biogas/biometano: problemi ambientali per la salute umana.
 41. Poudel R. C., Khatiwada D., Aryal P. e Sapkota M., 2021, Large-scale biogas upgrading plants: future prospective and technical challenges in *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*, pp. 467 – 491.
 42. Progetto ISACC, Commissione Europea Biogas in Italy: from a marginal option to a mainstream energy source in *Increasing Social Awareness and Acceptance of Biogas and Biomethano*, Horizon 2020.
 43. Ruol G., 2006, mappatura biomasse e organizzazione data-base, pp 9.
 44. Stinchcombe A., 1965, "Social Structure and Organizations", in March J.G. e McNally R. (a cura di), *Handbook of Organizations*, Chicago Ill, pp. 142-193.
 45. Tamosiunas A., Khiari B, Jeguirim M., 2022, Bioflues production: Biogas, biodiesel and bioethanol from tomato waste. In *tomato Processing by-Products*, pp. 333-370.
 46. Von Cossel M. et al., 2019, Margianl Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production. In *Energies Journals* (16). Selected papers from 27th European Bionass Conference & Exhibition (EUBCE 2019).
 47. Von Cossel M. et al., 2019, Prospects of Bioenergy Cropping Systems for A More Social-Ecologically Sound Bioeconomy. In *Bioenergy Crops: Current Status and Future Prospects* (10).
 48. Was A. et Al., 2020, The potential of Agricultural Biogas Production in Ukraine – Impact on GHG Emission and Energy Production. In *Energy Supply within Sustainable Agricultural Production: Challenges, Policies and Mechanisms* (21).
 49. WWF, 2023, Ricchezza del patrimonio naturalistico italiano. In *Biodiversità Fragile, maneggiare con cura: Status, tendenze, minacce e soluzioni per un futuro nature-positive* pp.: 12-13.
 50. Zampieri G., 2010, Il Biogas. In *Rapporto sulle bioenergie in Veneto* pp. 90 – 108. Veneto Agricoltura.
 51. - 2002. Regolamento (CE) n.1774/2002 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano. Parlamento europeo e Consiglio europeo, 3 ottobre.
 52. - 2006, Decreto legislativo 3.4.2006 n.152. Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* n.88, supplemento ordinario n.96, 29 aprile.
 53. - 2011. Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n.28. 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. *Gazzetta Ufficiale* n.71, supplemento ordinario, 29 marzo.

7. SITOGRAFIA

1. European Biogas Association (EBA), 2024, About Biogas and Biomethane, <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>
2. Parlamento Europeo, 2019, L'UE e l'accordo di Parigi: verso la neutralità climatica, <https://www.europarl.europa.eu/>
3. <https://www.europeanbiogas.eu/>
4. Parlamento Europeo, 2024, Le soluzioni dell'UE per contrastare i cambiamenti climatici. <https://www.europarl.europa.eu/>
5. Coperture vasche di stoccaggio - CMA (b-cma.it)