



Position Paper

**IL TRATTAMENTO DELLA FRAZIONE ORGANICA
DEI RIFIUTI URBANI (FORSU)**

A cura di Agostino Di Ciaula, Patrizia Gentilini, Ferdinando Laghi, Vincenzo Migaleddu.

Con la collaborazione e il contributo di Scuola Agraria del Parco di Monza,

Indice

| | |
|--|---------|
| Introduzione | Pag. 3 |
| Inquadramento Generale | Pag. 3 |
| 1.1 La produzione e trattamenti di FORSU in Italia | Pag. 3 |
| 1.2 Normativa di riferimento per la gestione della FORSU | Pag. 4 |
| Analisi e cicli di vita (LCA) dei trattamenti della FORSU | Pag. 5 |
| 2.1 FORSU in discarica | Pag. 6 |
| 2.1.2 Cenni sui processi di biodegradazione | Pag. 6 |
| 2.2 Compostaggio | Pag. 7 |
| 2.3 Digestione Anaerobica | Pag. 9 |
| 2.3.1 Valorizzazione agronomica del digestato | Pag. 10 |
| 2.3.2 Biogas e Biometano | Pag. 11 |
| 2.3.3 Bilanci di massa nel compostaggio e nella digestione anaerobica | Pag. 13 |
| 2.4 Criticità dei trattamenti biologici della FORSU | Pag. 15 |
| 2.4.1 Produzione di odori | Pag. 15 |
| 2.4.2 Acqua | Pag. 16 |
| 2.4.3 Contaminanti presenti nella FORSU e nelle frazioni solide e liquide dei loro trattamenti biologici | Pag. 16 |
| 2.4.3.1 Contaminanti organici | Pag. 16 |
| 2.4.3.2 Metalli | Pag. 17 |
| 2.4.3.3 Carica microbica nel compost e nel digestato | Pag. 18 |
| Emissioni in atmosfera di trattamenti aerobici ed anaerobici | Pag. 19 |
| 3.1 Bioaerosol | Pag. 20 |
| 3.2 Emissioni in atmosfera da combustione di biogas e biometano | Pag. 21 |
| Raccomandazioni conclusive nella gestione della Frazione Organica dei Rifiuti Urbani (FORSU) | Pag. 23 |
| Allegato – Compostaggio domestico | Pag. 26 |
| Bibliografia | Pag. 28 |

INTRODUZIONE

Questo documento riporta la posizione dell'Associazione dei Medici per l'Ambiente (ISDE Italia) circa la migliore gestione della Frazione Organica dei Rifiuti Urbani (FORSU).

Pertanto il documento **non** valuta la gestione di altre frazioni organiche classificate come rifiuti, quali ad esempio, rifiuti urbani indifferenziati, fanghi da depurazione delle acque fognarie, l'uso di biomasse finalizzate alla produzione di energia.

Questi argomenti saranno oggetto di altri specifici documenti.

Le indicazioni fornite da questo documento scaturiscono dai principi fondanti la missione dell'Associazione: Principio di Precauzione, ricerca di soluzioni che siano il più possibile in sintonia con i cicli naturali, coinvolgimento e partecipazione dei cittadini.

Il fine è la protezione della salute secondo i principi di "sostenibilità ambientale" [1] che dovrebbero essere alla base di ogni scelta e attività umana:

- le risorse non rinnovabili devono essere utilizzate il meno possibile e solo nella misura in cui il loro uso porta alla creazione di una risorsa rinnovabile di eguale livello funzionale;
- le risorse rinnovabili possono essere utilizzate solo nella misura in cui l'ecosistema è capace di rinnovarle;
- non possono essere immesse nell'ambiente sostanze (rifiuti) in maniera superiore alla sue capacità di assorbimento;
- è necessario evitare di immettere nell'ambiente sostanze di cui non si conoscono gli effetti e che potrebbero innescare processi irreversibili.

In definitiva vorremmo evitare ancora una volta di accorgerci che sono state operate scelte di cui poi ci dovremmo pentire, come ben ricordano i fondamentali trattati dell'UE "*Lezioni apprese in ritardo da pericoli conosciuti in anticipo*" [2].

INQUADRAMENTO GENERALE

1.1 La produzione e trattamenti di FORSU in Italia

La frazione organica dei rifiuti urbani è costituita dalla frazione umida (scarti di cucina domestici, ristoranti, mense etc.) e verde (sfalci d'erba, patate etc.).

Questa frazione rappresenta circa il 35% della produzione complessiva di rifiuti urbani [3].

Pertanto in Italia, a fronte di una produzione totale di rifiuti urbani, pari a 31,3 milioni di tonnellate nel 2011, la frazione organica rappresentava circa 11 milioni di tonnellate.

Attualmente la maggior parte della frazione organica dei rifiuti urbani (circa il 60%) è destinata alla discarica.

Nel 2012, circa 4,8 milioni di tonnellate di FORSU (81 kg/ab) sono state separate alla fonte con raccolta differenziata.

Dall'ultimo rapporto ISPRA 2013 [3] risulta che nel 2011 sono stati trattati complessivamente in impianti di compostaggio circa 4,4 milioni di tonnellate, di cui 3,5 milioni di tonnellate derivati da Frazione Organica di Rifiuti Solidi Urbani (FORSU), con un incremento del 4,6%, rispetto al 2010 e del 56% rispetto al 2006.

Anche se l'obiettivo di sottoporre a recupero l'intera frazione organica dei RSU è ancora lontano, l'attuale trend di crescita appare incoraggiante.

1.2 Normativa di riferimento per la gestione della FORSU

Al pari di tutte le altre frazioni merceologiche dei rifiuti, anche la frazione organica deve essere gestita secondo la gerarchia individuata dalla UE con la Direttiva quadro 2008/98/CE, recepita con il D.LGS 205/2010, in cui in particolare l'Articolo 179, al comma 1, stabilisce le priorità secondo cui deve essere gestita qualsiasi frazione merceologica dei rifiuti, quindi anche la Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani (FORSU):

La gestione dei rifiuti avviene nel rispetto della seguente gerarchia:

- a) *prevenzione;*
- b) *preparazione per il riutilizzo;*
- c) *riciclaggio;*
- d) *recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia;*
- e) *smaltimento*

L'Art. 183 così definisce i termini sopra citati:

a) prevenzione (art. 183 lettera m): *insieme delle misure adottate prima che una sostanza, un materiale o un prodotto diventi rifiuto che riducono:*

- 1) la quantità dei rifiuti, anche attraverso il riutilizzo dei prodotti o l'estensione del loro ciclo di vita;*
- 2) gli impatti negativi dei rifiuti prodotti sull'ambiente e la salute umana;*
- 3) il contenuto di sostanze pericolose in materiali e prodotti.*

Il compostaggio domestico (o autocompostaggio), ovvero la riduzione alla fonte di rifiuto organico e il compostaggio in giardino dello stesso, rientra nelle politiche di prevenzione. L'incentivazione al compostaggio su piccola scala (domestico/condominiale/di quartiere) è da considerarsi prioritaria al fine di ridurre la quantità totale della frazione organica da trattare in grandi impianti.

Informazioni sul compostaggio domestico sono fornite nell'ALLEGATO.

b) preparazione per il riutilizzo:

preparazione (art. 183, lettera q): *le operazioni di controllo, pulizia, smontaggio e riparazione attraverso cui prodotti o componenti di prodotti diventati rifiuti sono preparati in modo da poter essere reimpiegati senza altro pretrattamento;*

riutilizzo (art. 183, lettera r): *qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti.*

c) riciclaggio (art. 183, lettera u): *“qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trat-*

tamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento”.

La produzione di fertilizzante destinato all'agricoltura (cfr. dopo) a seguito della trasformazione biologica (compostaggio e digestione anaerobica più compostaggio) di rifiuti organici raccolti in modo differenziato è la tecnica mediante la quale si mette in atto il riciclaggio del rifiuto organico.

Il **riciclaggio** è la prima e prioritaria forma di **recupero**.

In termini generali, il **recupero** è così definito (art. 183, lettera t): *“qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale. L'allegato C della Parte IV del presente decreto riporta un elenco non esaustivo di operazioni di recupero”*.

Tra le forme di recupero diverse dal riciclaggio deve essere incluso:

d) recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia

Il recupero energetico a carico delle biomasse, compresa la FORSU, rientra dunque nel quarto punto della scala gerarchica, prima dello smaltimento ma dopo il recupero di materia, preferito come opzione di sostenibilità ambientale.

Il concetto è ben evidenziato al comma 6 dell'art. 179, dove si legge che

“nel rispetto della gerarchia del trattamento dei rifiuti le misure dirette al recupero dei rifiuti mediante la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio o ogni altra operazione di recupero di materia sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia”.

2.0 ANALISI E CICLI DI VITA (LCA) DEI TRATTAMENTI DELLA FORSU

Una recente metanalisi (2013) su 82 studi LCA (“Life Cycle Assessment”) aventi per oggetto il trattamento della frazione organica dei rifiuti, ha concluso che la digestione anaerobica ed il compostaggio del digestato (per un suo successivo utilizzo agronomico), sotto il profilo delle potenziali ricadute ambientali, in termini di produzione di gas clima-alteranti, sono preferibili sia all'incenerimento con recupero energetico che alle discariche che recuperino e utilizzino biogas per produrre energia [4].

Poiché **il compostaggio e, subordinatamente, la digestione anaerobica** (con compostaggio del digestato), permettono il recupero a scopo agronomico di gran parte del carbonio e dell'azoto organico presente nei FORSU, queste pratiche rientrano a pieno titolo in quello del recupero di materia, anche se nel secondo caso si tratta di una procedura che consegue ad una attività di recupero energetico.

2.1 FORSU in discarica

La crescente sottrazione di scarti organici alla discarica, oltre ad essere prevista in varie politiche e strategie ambientali a livello internazionale, è espressamente richiesta, come obbligo legalmente vincolante, dalla Direttiva UE sulle Discariche (Direttiva 99/31/CE).

La decomposizione dei rifiuti organici in discarica genera, oltre al percolato, biogas che è una miscela di vari composti, in prevalenza anidride carbonica e metano, prodotti della attività metabolica dei microorganismi anaerobi che, all'interno della discarica trovano le condizioni ideali per il loro sviluppo [5].

Il metano prodotto all'interno del corpo della discarica, liberato in atmosfera, ha un effetto clima alterante in quanto, come l'anidride carbonica, assorbe le radiazioni infrarosse emesse dalla superficie "calda" del Pianeta. Le emissioni di metano, da discariche di rifiuti urbani e dalle acque di scarico, ammontano a circa il 90% di tutte le emissioni prodotte dai vari sistemi di trattamento dei rifiuti; tuttavia, pur rappresentando circa il 18% delle emissioni antropogeniche di metano, in termini globali le emissioni di gas serra, attribuibili ai rifiuti, contribuiscono solo in piccola parte alle emissioni antropogeniche totali di gas serra (circa il 3%) [6].

Il percolato di discariche a cui si sono conferiti scarti biodegradabili, a sua volta, se non adeguatamente gestito, può essere fonte di pesante contaminazione di falde acquifere e dei corpi idrici ricettori.

È dunque prioritario favorire le pratiche che evitano il conferimento della frazione umida alle discariche, come richiamato dalla direttiva europea 1999/31/CE già citata.

2.1.2 Cenni sui processi di biodegradazione

In natura, il materiale organico che si genera dalla morte di organismi viventi e dal loro metabolismo è degradato attraverso processi di decomposizione aerobica ed anaerobica (in presenza e in assenza di ossigeno) ad opera di complesse comunità microbiche che utilizzano come fonte di energia la materia organica, nelle sue diverse composizioni chimiche.

Alla fine di entrambi i processi degradativi, resta una **frazione solida** in cui sono presenti i composti inorganici e le molecole organiche poco biodegradabili formatesi nel corso dei processi degradativi a cui è dato il nome di *Humus* ed una **frazione volatile**, prevalentemente composta da **anidride carbonica**, **vapore acqueo** e, nel caso di processi anaerobi, **metano**.

In natura, le **frazioni solide** contribuiscono alla formazione dei suoli e dei sedimenti marini e lacustri e le **frazioni volatili** rientrano nei grandi cicli dell'acqua e del carbonio, compreso il metano che, immesso in atmosfera, a seguito di reazioni foto ossidative, si trasforma in anidride carbonica, con un tempo di dimezzamento di circa cinque anni.

Il processo prevalentemente aerobio, quando accelerato e controllato dall'uomo, è definito **compostaggio** e porta alla formazione di una frazione solida denominata compost, ammendante organico capace di modificare e migliorare le proprietà e le caratteristiche chimiche, fisiche, biologiche e meccaniche del terreno con numerosi vantaggi dal punto di vista ambientale ed agronomico.

Il processo prevalentemente anaerobico, quando è accelerato e controllato dall'uomo è definito come **digestione anaerobica**. Da questo trattamento residua una frazione solida a cui si dà il nome di digestato

utilizzabile in agricoltura come ammendante, dopo una ulteriore fase rappresentata da un processo aerobico e gli opportuni controlli microbiologici.

Nella società rurale, prima che si realizzasse la separazione fra agricoltura intensiva e pratiche di allevamento su larga scala, il materiale organico sotto forma di deiezioni animali e scarti di lavorazioni agricole o agro-industriali, non ha mai costituito un problema ma una preziosa risorsa, tanto che i contadini facevano a gara per accaparrarsi anche l'appalto degli scarti vegetali dei mercati nelle città.

Nelle letamaie erano raccolte le deiezioni animali, le lettiere fatte di paglia e di foglie secche e scarti vegetali prodotti dalla attività agricola che maturavano per diversi mesi, durante i quali la materia organica biodegradava, ad opera della flora microbica, trasformandosi in letame utilizzato come fertilizzante per la produzione agricola.

Nelle letamaie, in base ai livelli di aereazione e di compattazione delle biomasse, i processi biodegradativi avvenivano sia ad opera di microorganismi aerobi che anaerobi.

Tale pratica, anche se utile per restituire fertilità ai suoli agricoli, aveva diversi inconvenienti: produzione di cattivi odori, percolati, insetti, perdita di azoto sotto forma di ammoniacca.

Il moderno controllo di questi processi, in idonee biocelle (compostaggio) e biodigestori (digestione anaerobica con compostaggio del digestato) ha risolto gran parte di questi problemi e permette un ottimale recupero della frazione organica ai fini agronomici.

Nel 2011, in Italia sono state trattate con compostaggio circa 3,5 milioni di tonnellate di frazione organica da FORSU e con digestione anaerobica circa 450.000 tonnellate [3].

2.2 Compostaggio

Il compostaggio è un processo di biodegradazione a carico di residui vegetali, sia verdi che legnosi, e animali, in presenza di ossigeno.

Il processo di compostaggio è realizzato, principalmente, da diverse popolazioni di microorganismi aerobi che decompongono il materiale organico al fine di accrescersi e riprodursi e in esso si distinguono due fasi principali:

a) bio-ossidazione: i microorganismi, in presenza di ossigeno e acqua, degradano la frazione organica immediatamente assimilabile (zuccheri, amminoacidi, etc.) in composti semplici quali CO₂, H₂O e sali minerali. Le temperature del cumulo di FORSU sottoposto a compostaggio si innalzano, a causa della attività metabolica della popolazione di micro-organismi che si sviluppa nel cumulo, fino a raggiungere i 60- 70° C. Raggiunta la temperatura massima, che peraltro permette l'inattivazione di micro organismi patogeni e dei semi di infestanti eventualmente presenti, e una volta che la frazione organica più biodegradabile è stata utilizzata ai fini energetici dalla comunità microbica, la temperatura inizia a scendere.

b) maturazione o umificazione: in questa seconda fase i processi biologici rallentano ed entrano in azione microorganismi attivi sulle frazioni organiche meno biodegradabili, come ad esempio la lignina. In questa fase si formano sostanze umiche derivanti dalla polimerizzazione ossidativa di acidi fenolici e fenoli (cataboliti della lignina), tannini e polifenoli.

L'attività metabolica dei microorganismi aerobi comporta la produzione di una **frazione gassosa**, composta in prevalenza da anidride carbonica, acqua e composti organici volatili, e di una **frazione solida**, costituita da una miscela di sostanze umificate, a cui è dato il nome di *compost*.

Il compost è un ammendante organico di qualità, in grado di restituire fertilità al terreno, con sostanziali benefici, sia dal punto di vista agronomico che ambientale.

La nozione di "*Compost di qualità*" è definita dal D.Lgs. 4 del 16/01/08 come "*prodotto ottenuto dal compostaggio di rifiuti organici raccolti separatamente, che rispetti i requisiti e le caratteristiche stabilite dall'allegato 2 del D.Lgs. n. 217 del 2006 e successive modifiche e integrazioni*".

L'utilizzo del compost nella produzione agricola riduce l'uso di concimi azotati, come ha dimostrato uno studio promosso dalla Regione Veneto [7].

L'aumento della sostanza organica nei suoli comporta una sottrazione di CO₂ dall'atmosfera con beneficio sul contenimento delle emissioni di gas clima alteranti e un risparmio energetico per evitato uso di fertilizzanti chimici: in uno studio della Regione Lombardia [8] è stato misurato un risparmio di CO₂ equivalente di 20 kg/tonnellata di rifiuto umido trattato ed un risparmio di energia di 298 kW equivalenti/tonnellata di rifiuto.

L'arricchimento in sostanza organica dei suoli presenta inoltre altri benefici ambientali quale una maggiore capacità di ritenzione idrica e una maggiore resistenza al dilavamento ed all'erosione per effetto degli eventi meteorici.

Da una stima effettuata dal Consorzio Italiano Compostatori (CIC), entro il 2020, al fine di raggiungere gli obiettivi di recupero fissati dalla normativa dalla Direttiva Rifiuti della Comunità Europea, dovranno essere destinati a trattamento (evitando la discarica) nel nostro Paese, in aggiunta a quanto già oggi separato e trattato, circa 2 milioni di t/anno di rifiuti organici, costituiti dalla frazione umida e verde esclusivamente provenienti dal settore dei rifiuti urbani [9].

Se si confermasse l'attuale trend di crescita, o anche solo un trend del 10% annuo di aumento, gli obiettivi comunitari sarebbero raggiunti molto prima della data prefissata.

Si tratta tuttavia di obiettivi minimi di recupero, pari al 50% dell'intera frazione biodegradabile, di cui solo 1/3 sarebbe quella effettivamente compostabile. Un obiettivo minimale, quindi, che pone grossi interrogativi sul destino della parte non destinata a trattamento biologico.

Il recupero della frazione organica dei rifiuti appare peraltro molto importante se si considera la capacità del compost di restituire fertilità al terreno.

Ciò è di particolare rilievo se si considera che in molti suoli agrari del nostro paese la concentrazione di sostanza organica è inferiore al 2%, con conseguente aumento del rischio di desertificazione, associato all'erosione e aggravato dai cambiamenti climatici. Potenziare il contenuto organico dei suoli è pertanto una priorità e già ora il Piano Agricolo Comunitario (PAC) finanzia buone pratiche agronomiche per ripristinare la sostanza organica nei suoli.

La costante immissione di sostanza organica nel suolo costituisce un importante fattore di abbassamento della concentrazione di CO₂ dell'atmosfera, contribuendo al contenimento delle emissioni climalteranti

[10]. Alcuni calcoli hanno stimato che un aumento dello 0.15% del carbonio organico in tutti i suoli arabili italiani, ottenuto con un costante apporto di frazioni organiche, potrebbe fissare nel terreno la stessa quantità di carbonio che attualmente, in Italia, è rilasciata in atmosfera ogni anno, dall'uso di combustibili fossili [11].

Pertanto, il compostaggio e, subordinatamente, la digestione anaerobica (con ulteriore compostaggio del digestato) del rifiuto organico (FORSU) con produzione di compost di qualità, appare la scelta prioritaria per il trattamento di questa frazione dei nostri scarti specialmente se gli impianti sono in prossimità dei luoghi di produzione della FORSU (per ridurre i consumi di energia connessi a movimentazione e trasporto del materiale).

2.3 Digestione Anaerobica

La digestione anaerobica (DA) è un processo biologico che riproduce quanto avviene in ambienti privi di ossigeno, in presenza di materiali organici.

Negli impianti di digestione anaerobica, inoculi di batteri anaerobi sono inseriti, insieme a FORSU, normalmente mescolata ad acqua, in grandi contenitori a tenuta d'aria, chiamati digestori. Nel digestore, la biomassa è mantenuta a temperatura costante e continuamente rimescolata per un tempo medio di permanenza della frazione organica all'interno del digestore di 20-30 giorni.

Esistono due differenti intervalli di temperatura cui viene condotta la digestione anaerobica: con batteri mesofili si lavora a temperature comprese tra 20-45 °C, con un intervallo ottimale di 37- 41 °C; con batteri termofili le condizioni di esercizio ottimali implicano un intervallo di temperatura compreso tra i 50-52 °C.

Durante il periodo di permanenza nel digestore della materia organica, l'attività microbica, comporta la progressiva degradazione e modificazione della sostanza organica introdotta.

Le fasi attraverso cui avviene il processo di digestione anaerobica sono:

- Idrolisi (molecole organiche decomposte in molecole più semplici),
- Acidogenesi (ulteriore scissione e semplificazione delle molecole in acidi grassi con produzione di ammoniaca, anidride carbonica e acido solfidrico),
- Acetogenesi (molecole derivanti dalla fase precedente elaborate ulteriormente con produzione di anidride carbonica, idrogeno e acido acetico),
- Metanogenesi (produzione di metano, anidride carbonica e acqua).

Alla fine del processo resta un residuo semifluido che va sotto il nome di *digestato* classificato, in base alla direttiva CEE 75/ 442, come rifiuto speciale (codici CER 190600- 190603-190 604- 190- 605).

Il digestato secco per il 40% circa è fatto di lignina, cellulosa, emicellulosa e per il 58% di materiale cellulare solubile e sono altresì presenti sali di azoto, fosforo e potassio. Della quota liquida del digestato si dirà nel successivo paragrafo.

La realizzazione d'impianti di digestione anaerobica per la gestione di FORSU è una pratica relativamente recente e, per certi versi (modalità del processo, potenziale rischio biologico), da adottare subordinatamente rispetto alla più consolidata e "semplice" tecnica del compostaggio.

2.3.1 Valorizzazione agronomica del digestato

L'utilizzo agronomico del digestato è consentito solo per quello ottenuto da sottoprodotti zootecnici e nel rispetto della Direttiva Nitrati 91/676 EEC che fissa a 170 e a 340 kg per ettaro e per anno, l'apporto massimo di azoto nelle zone rispettivamente identificate come "vulnerabili" e "non vulnerabili".

In concomitanza con l'entrata in funzione di numerosi impianti di DA, sono stati avviati studi per verificare l'idoneità del digestato a usi agricoli.

Uno di questi studi, pubblicato nel 2010 a cura del Dipartimento di Produzione Vegetale dell'Università di Milano, concludeva che le proprietà ammendanti del digestato sono simili a quelle del compost e che le proprietà fertilizzanti del digestato sono buone, a causa dell'alto contenuto di nutrienti (N, P, K) e della loro disponibilità. Pertanto gli autori di questo studio concludevano che il digestato possa essere un buon sostituto dei fertilizzanti inorganici [12].

Al contrario, uno studio sul possibile uso come fertilizzante del digestato di residui di attività agricola e agroindustriale, le cui caratteristiche sono diverse dal digestato da FORSU, ha concluso che il suo riciclo in agricoltura è da considerarsi limitato, principalmente a causa della elevata salinità, del contenuto in rame e zinco (probabili residui di trattamenti fitosanitari), della residua fermentescibilità, della conseguente potenziale fito-tossicità [13].

È da segnalare come la Regione Emilia Romagna, con la Delibera dell'Assemblea Legislativa DAL 51/2011, ha vietato lo spandimento di digestati proveniente da impianti a biogas nelle terre destinate al foraggio per la produzione del parmigiano. Tale delibera riguarda esclusivamente l'applicazione del digestato agricolo proveniente dalla fermentazione anaerobica di insilati agricoli.

Effettivamente il digestato liquido (contenuto in sostanza secca <5%) presenta alcune criticità, legate principalmente a un'elevata concentrazione di cloruri (salinità) e di azoto.

Nella digestione anaerobica, l'azoto presente si converte da una forma prevalentemente organica alla forma ammoniacale che, in presenza di un post-trattamento di separazione solido/liquido a carico del digestato tal quale, si concentra anch'essa nella frazione liquida [9].

Tale problema richiede specifici trattamenti meccanici di disidratazione del digestato, così da trasferire la salinità negli effluenti liquidi da sottoporre a depurazione.

Solo dopo questo trattamento la frazione solida del digestato ha un tenore salino più basso, compatibile con l'uso agronomico, in particolare dopo il suo compostaggio.

Questa scelta è possibile, in modo ottimale, quando l'impianto di trattamento anaerobico sorge nei pressi di un impianto per il trattamento delle acque.

Per questi motivi, nonostante siano diffuse pratiche di applicazione diretta di digestato su suolo (soprattutto in Europa centro-settentrionale, a fronte tuttavia di controlli e prescrizioni tecniche sull'applicazione) il digestato solido ottenuto dalla digestione anaerobica della Frazione Organica di Rifiuti Urbani (FORSU) può essere meglio utilizzato come ammendante agricolo solo dopo essere trasformato in ammendante compostato

("compost di qualità" codificato dalla normativa sui fertilizzanti come "ammendante compostato misto") mediante una fase di finissaggio aerobico realizzato in apposite biocelle o altri sistemi di compostaggio, mescolato a cippato di legno od altri materiali di strutturanti (paglia, scarti vegetali, etc.).

Tale pratica consegue ad un recupero energetico che rientra nel "recupero di altro tipo" e pertanto è subordinata alla pratica del compostaggio.

In questo caso il digestato, opportunamente trattato per ridurre l'eccesso d'acqua, è mescolato a cippato di legno, utilizzato come strutturante, e sottoposto a un successivo finissaggio aerobico (compostaggio) al fine di consentire l'organizzazione dell'azoto, l'abbattimento della fito-tossicità residua, l'umificazione della componente organica e una ulteriore riduzione della carica microbica potenzialmente patogena.

Il compost così ottenuto, idoneo per l'uso agricolo, acquisisce il nuovo status giuridico di **prodotto**, in base all'Art.184ter (cessazione della qualifica di rifiuto) del D.lgs.152/2006.

L'attività biodegradativa della digestione anaerobica produce anche una miscela di gas, prevalentemente composta d'anidride carbonica e metano, a cui è dato il nome di **biogas**.

2.3.2 Biogas e Biometano

La biodegradazione anaerobica, proprio perché avviene in ambienti carenti di ossigeno, ha come prodotto finale il metano (CH_4), composto che si trova ad un livello di ossidazione inferiore all'anidride carbonica (CO_2).

Nei processi naturali il metano è disperso in atmosfera e, successivamente, ossidato ad anidride carbonica, grazie a reazioni fotochimiche, entra a far parte dei grandi cicli del carbonio.

Nell'autunno del 1776 Alessandro Volta studiò un fenomeno noto anche a Lavoisier e Franklin: in un'ansa stagnante del fiume Lambro, avvicinando una fiamma alla superficie si accendevano delle fiammelle azzurrine. Volta diede al gas che produceva le fiamme, il nome di *aria infiammabile di palude* (gas di palude) e scoprì che poteva essere incendiato sia per mezzo di una candela accesa sia mediante una scarica elettrica; dedusse che il gas si formava nella decomposizione di sostanze animali e vegetali.

Il biogas, formato prevalentemente da una miscela di metano e anidride carbonica (Tabella 2), viene intercettato e utilizzato (considerato il suo elevato potere calorifico) mediante cogenerazione per la produzione di energia elettrica e termica.

TABELLA 2 Composizione del biogas in volumi prodotto da digestione anaerobica

| | |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| Metano (CH ₄) | 50 - 75% |
| Anidride carbonica (CO ₂) | 25 - 45% |
| Idrogeno (H ₂) | 1-10% |
| Azoto (N ₂) | 0,5 - 3% |
| Monossido di carbonio (CO) | 0,10% |
| Idrogeno solforato (H ₂ S) | 0,02 - 0,2% |
| Acqua (H ₂ O) | saturazione |
| Potere calorifico inferiore | 18,8 - 21,6 MJ/Nm ³ |

Fonte: Ministero Agricoltura

Il biogas grezzo, sviluppato a seguito della digestione anaerobica della FORSU, è parzialmente depurato per aumentarne il potere calorifico e renderlo utilizzabile come combustibile per alimentare motori a combustione interna. A questo scopo si riduce la quantità di vapore acqueo, di idrogeno solforato e di anidride carbonica e il gas così depurato è stoccato in un gasometro e normalmente utilizzato per alimentare motori endotermici finalizzati a produrre, in regime di cogenerazione, elettricità e calore.

Una parte dell'energia elettrica prodotta (circa l'11%) è utilizzata per usi interni; la quota rimanente è ceduta alla rete, ai prezzi incentivati dal decreto di incentivazione delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) e il calore può essere utilizzato per il teleriscaldamento (al netto della quota parte utilizzata internamente per il mantenimento delle temperature di processo dei fermentatori).

Da circa 20 anni, in Europa e in particolare in Svezia [14], si provvede a raffinare ulteriormente il biogas, in modo da ridurre drasticamente i componenti indesiderati (CO₂, H₂S, H₂O) ed ottenere metano ad alto grado di purezza, compatibile con l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale e con l'uso per auto-trazione.

Il biogas raffinato è denominato **biometano**.

La Tabella 3 mette a confronto la composizione chimica e i poteri calorifici del gas naturale e del biometano mostrando come il biometano abbia caratteristiche molto simili a quelle del gas naturale che utilizziamo normalmente negli impianti domestici ed industriali.

TABELLA 3. Composizione (% in volume) del gas naturale e del biometano

| Componente | Gas naturale | Biometano |
|---|-------------------------|-------------------------------|
| Metano (CH ₄) | > 81 % | > 96 % |
| Gas inerti (CO ₂ +N ₂) | 1,5 - 4,5 % | < 3% |
| Zolfo totale | <150 mg/m ³ | <10 mg/m ³ |
| Cloro | 0* | < 1 mg/m ³ |
| Potere calorifico inferiore | 33,9 MJ/Nm ³ | 30,2- 47,2 MJ/Nm ³ |

* gas naturale dal Mare del Nord

La tabella non riporta i metalli pesanti, il Radon -nel gas naturale- e altre sostanze inquinanti eventualmente presenti nel biogas/ biometano.

In Europa l'immissione in rete del biometano e il suo uso per l'autotrazione è una prassi consolidata in Francia, Germania, Svizzera, Svezia, Austria e Olanda.

Questi paesi hanno definito standard tecnici sulle caratteristiche chimiche e fisiche che il biometano deve rispettare per essere immesso in rete, in sicurezza per gli impianti e gli utenti.

Specifiche commissioni stanno lavorando per approvare uno standard per il biometano, comune a tutti i paesi europei e tale da permettere la libera circolazione di biometano europeo utilizzando la rete di distribuzione del gas naturale che già oggi interconnette gran parte dei paesi dell'Unione Europea [15].

Alla fine del 2013 anche l'Italia inizia a legiferare sul biometano e il Ministero dello Sviluppo Economico approva il Decreto 5/12/2013 "Modalità di incentivazione del biometano immesso nella rete del gas naturale (GU Serie Generale n.295 del 17-12.2013).

I meccanismi di incentivazione di produzione energetica spesso possono essere usate da lobbies finanziarie e speculative per creare distorsioni di mercato tese a centralizzare nelle mani pochi beneficiari privati utili elevati a scapito degli interessi della collettività.

2.3.3 Bilanci di massa nel compostaggio e nella digestione anaerobica

Un bilancio di massa fornisce utili informazioni sulla quantità e la tipologia dei diversi componenti che entrano (FORSU, strutturante vegetale, ossigeno atmosferico) e che escono, sotto forma di solido (compost e digestato) e di gas o vapore da un impianto di compostaggio e di digestione anaerobica.

La stima che segue è molto indicativa e fa riferimento rispettivamente a un impianto di digestione anaerobica ad umido seguito dal compostaggio del digestato e ad un impianto di compostaggio.

Si ipotizza che nei due impianti siano trattati 100 kg di FORSU, con l'aggiunta di strutturante (cippato di legno) per la produzione di compost.

I valori in Tabella 4 sono stati gentilmente forniti da Alberto Confalonieri e Francesco Boyer della Scuola di Agraria del Parco di Monza.

TABELLA 4. Bilancio di massa di compostaggio e DA e successivo compostaggio del digestato

| | DA + compostaggio | Compostaggio |
|--|-------------------|----------------|
| Ingresso | kg | kg |
| FORSU | 100 | 100 |
| Strutturante | 8-15 | 20-30 |
| Totale biomassa ingresso | 108-115 | 120-130 |
| Ossigeno & | 8 | 13-14 |
| massa in ingresso (biomassa + ossigeno) | 116-123 | 133-144 |
| Uscita | | |
| Compost prodotto | 15-20 | 25-30 |
| Acqua separata | 60-70 | 55-65 |
| CO ₂ * | 11 biogas | 18-19 [16] |
| CH ₄ | 5 biogas | |
| Scarti di lavorazione (materiali non compostabili) | 10-15 | 5-15 |
| Sub totale massa uscita | 101-121 | 103-129 |
| Massa restante COV, NH ₃ , H ₂ O, CO ₂ ... | 15-2 | 30-20 |

& per ossidazione a CO₂ del carbonio organico (nella DA è escluso il compostaggio).

* nel bilancio della DA non viene compresa la CO₂ emessa nelle fasi di raffinazione da biogas a biometano, di compostaggio del digestato e della depurazione dei liquidi.

La Tabella 4, al netto delle incertezze e delle approssimazione dei valori riportati, mostra come i due processi, compostaggio e digestione anaerobica più compostaggio del digestato, hanno bilanci di massa molto simili.

La digestione anaerobica richiede meno biomassa (-15% circa) utilizzata come strutturante ma produce meno compost (almeno il - 25 %).

La quantità di CO₂ liberata in atmosfera dal solo compostaggio è maggiore della quantità di CO₂ prodotta dalla sola digestione anaerobica, non considerando però la CO₂ risultante dalla combustione del biogas/biometano derivato da quest'ultimo processo nonché quello prodotto dai processi di raffinazione da biogas a biometano, dal compostaggio successivo del digestato e dalla depurazione dei liquidi.

In generale, comunque, la quantità di carbonio presente nella biomassa in ingresso, che i due processi biologici mineralizzano (che, in natura, si disperde in atmosfera, sotto forma di CO₂ e CH₄) – rendendolo non fruibile per i processi di rigenerazione del terreno- è, come ordine di grandezza, sensibilmente maggiore (di circa un terzo) nel caso della sola DA rispetto al semplice compostaggio.

Per ciò che concerne il metano, la differenza tra compostaggio e digestione anaerobica è rappresentata dal fatto che, nel primo caso, esso è disperso in atmosfera, mentre con la digestione anaerobica è recuperato a fini energetici (inserendo tale pratica nel livello gerarchico del recupero energetico).

In entrambi i processi, la massa "mancante" in uscita al bilancio riportato nella Tabella 4, al netto delle incertezze dei valori introdotti nel bilancio, è quella attribuibile ad altri composti organici volatili che si accompagnano ai due trattamenti (terpeni, aldeidi...), ai vapori di ammoniaca, all'anidride carbonica e all'acqua (vapore acqueo) che si formano a causa delle reazioni che avvengono durante la fase di compostaggio della FORSU e del digestato più compostaggio.

2.4 Criticità dei trattamenti biologici della FORSU

Sia il compostaggio che la digestione anaerobica possono presentare criticità ambientali e sanitarie, largamente legate alla qualità del materiale in ingresso [\[12\]](#) che, qualora non adeguata (in particolare per la presenza di elevate concentrazioni di metalli pesanti e composti organici tossici), può produrre contaminazione del suolo e della catena alimentare ed emissioni inquinanti in atmosfera.

Ovviamente, quanti più "sottoprodotti" e quindi quanti più "ingressi" si hanno, maggiori sono le criticità. Quindi la subordinazione della DA più compostaggio al solo compostaggio è legata anche alla maggiore complessità del processo anche da punto di vista tecnologico e alla necessità di maggiori controlli di qualità non solo del materiale in ingresso ma anche dei sottoprodotti solidi, liquidi e gassosi delle fasi, più numerose e complesse, dell'intero processo.

Altre problematiche ambientali e sanitarie dei processi biologici sono le emissioni in atmosfera di composti volatili, alcuni dei quali odorigeni, la generazione di bioaerosol, la presenza di microrganismi patogeni nell'aerosol prodotto durante la lavorazione, la presenza di patogeni nel compost e nel digestato.

Infine l'uso energetico del biogas e del biometano produce i tipici inquinanti associati alle combustioni.

A fronte di questi impatti ambientali è prioritario identificare le caratteristiche dei sistemi di gestione che permettano di considerare sostenibili ed accettabili, dal punto di vista ambientale e sanitario, impianti per il trattamento biologico della frazione organica dei rifiuti.

2.4.1 Produzione di odori

Una potenziale criticità ambientale, comune alla gestione della FORSU e agli impianti di bioconversione delle frazioni organiche, sia di tipo aerobico che anaerobico, è la produzione di sostanze osmogene, ovvero in grado di produrre odori sgradevoli.

Sostanze osmogene si producono nelle fasi di trasporto, stoccaggio e pre-trattamento delle FORSU conferite agli impianti e durante il trattamento aerobio (compostaggio) che si effettua creando importanti flussi d'aria (20- 40 Nm³/h per tonnellata trattata) all'interno della biomassa da compostare, con il conseguente arricchimento dell'aria con i composti più volatili che si formano durante la biodegradazione (grassi volatili, ammine, ammoniaca, terpeni, aldeidi, composti solforati...).

Pertanto l'aria estratta dai capannoni dove i rifiuti organici sono conferiti e pretrattati (rottura dei sacchi, frantumazione dei materiali più grossolani, separazione dei materiali inerti...) deve essere opportunamente

trattata per ridurre il carico di sostanze osmogene prima di essere reimmesse in atmosfera. Analogo trattamento è normalmente previsto per l'aria in uscita dai cumuli di FORSU sottoposti a compostaggio; gli stessi problemi sono riscontrabili nella fase di compostaggio del digestato.

2.4.2 Acqua

Altra criticità di entrambi i trattamenti, è la produzione di percolato durante le fasi iniziali di raccolta e stoccaggio e di acque di rilascio o di condensa. Questi effluenti liquidi possono essere riciclati nei processi di bioconversione, allo scopo di ristabilire i livelli igrometrici intaccati dalla evaporazione e/o avviate a trattamento di depurazione.

Nella digestione anaerobica a umido, la FORSU è mescolata con una frazione liquida che, alla fine del trattamento è in parte riciclata, mentre la restante parte, con elevata domanda chimica di ossigeno (COD), è inviata ad impianti di depurazione per renderla idonea all'immissione nei corpi idrici recettori.

2.4.3 Contaminanti presenti nella forsu e nelle frazioni solide e liquide dei loro trattamenti biologici

La FORSU in ingresso agli impianti di compostaggio e di digestione anaerobica può contenere composti organici clorurati (diossine e PCB [17, 18]), pesticidi, ftalati e altre sostanze organiche tossiche e metalli pesanti [18, 19].

Queste contaminazioni sono già presenti in origine nelle frazioni organiche o provengono da commistioni con altri rifiuti, durante la fase di raccolta.

Pertanto questo specifico problema si riduce drasticamente con la raccolta differenziata [20] ed in particolare con sistemi di raccolta Porta a Porta che tengono ben separate le frazioni organiche prodotte da mercati, ristoranti, mense, attività agro alimentari, da rifiuti pericolosi e tossici e da altri rifiuti potenzialmente contaminati.

Inevitabilmente, a causa della riduzione di massa solida durante i processi di biodegradazione, i metalli si concentrano nel compost e nel digestato.

2.4.3.1 Contaminanti organici

I composti organici poco biodegradabili tendono a concentrarsi nelle fasi liquide e solide che si producono durante il compostaggio e la digestione anaerobica. Tuttavia questo effetto può essere controbilanciato dalla loro biodegradazione durante i suddetti trattamenti.

Numerosi composti organici tossici, anche quelli definiti recalcitranti alla biodegradazione, immessi in complessi ecosistemi, come possono essere considerati gli impianti di compostaggio e di digestione anaerobica, sono degradati a composti meno tossici.

Ad esempio, nei processi aerobici la degradazione dei fenoli avviene durante la fase di umificazione tramite polimerizzazione ossidativa; nei processi anaerobici è stato segnalato come alle temperature più alte sia ostacolata la degradazione dei fenoli, che avviene con maggiore efficienza a temperature mesofile [21].

La degradazione di pesticidi clorurati e PCB, presenti negli scarti organici domestici differenziati e sottoposti a compostaggio e/o digestione anaerobica dipende dal tipo di molecola più o meno resistente alla biodegradazione di trattamento e può differire a seconda del trattamento: comprendere tali meccanismi sarebbe importante al fine di valutare il successivo utilizzo del compost o del digestato [19].

Per le diossine, già dal 1995 [22] era stato evidenziato come esse potessero essere almeno parzialmente degradate sia durante i processi di compostaggio che di digestione anaerobica. In particolare, diossine e furani (PCDD/F) risultarono quasi completamente degradati durante il trattamento aerobico.

Una più recente rassegna [23] sulla biodegradazione di composti organici persistenti mostra come, in base a numerosi studi, il compostaggio, la digestione anaerobica e la combinazione di queste due tecnologie provochino significative biodegradazioni di PCDD/F, PCB, IPA, triazine, ftalati. E' evidente come il compostaggio sia la pratica più efficiente nella biodegradazione di tali composti e la subordinata DA non possa fare a meno del trattamento aerobico del digestato.

2.4.3.2 Metalli

Il destino dei metalli presenti nella FORSU sottoposta a trattamenti aerobici e anaerobici è molto complesso e dipende dal tipo di metalli, dalla loro speciazione iniziale (sali, ossidi) e dal trattamento adottato.

Ovviamente la quantità di metalli presente nella frazione organica, rimane immutata alla fine del processo biologico, anche se ripartita tra le diverse fasi: solida (compost e frazione solida del digestato), liquida (percolati di processo e frazione liquida del digestato) e gassosa.

Vi è consenso generale nella letteratura scientifica che i processi di compostaggio aerobico, anche se contribuiscono alla concentrazione dei metalli, quali rame, zinco, piombo, presenti nella frazione solida (compost) [24], aumentano la complessazione di metalli pesanti, riducono la loro solubilità e quindi la loro biodisponibilità nel suolo e nelle piante [25].

Anche nella digestione anaerobica i metalli pesanti si legano selettivamente alla biomassa organica [26]. Tuttavia nei digestori termofili la presenza di metalli pesanti può inibire la digestione, mentre altri metalli quali ferro, rame, selenio, manganese, nichel e zinco stimolano l'attività metanogenica. Questo studio, eseguito su un impianto pilota di digestione termofila per il trattamento di pollina ha verificato come i metalli si ripartiscano tra l'effluente solido (digestato) e l'effluente liquido in cui la pollina è dispersa, quando è immessa nei digestori. Questo meccanismo dovrebbe comportare una riduzione della concentrazione (peso secco) dei metalli più idrosolubili presenti nel digestato, rispetto alla loro concentrazione (peso secco) nel rifiuto organico.

L'effluente liquido dei digestori, caratterizzato da un'elevata domanda chimica di ossigeno (COD) è normalmente inviato a un impianto di depurazione delle acque per ridurre il suo carico di composti organici e inorganici, prima dell'immissione in un corpo idrico recettore.

Uno studio recente su fanghi industriali, con concentrazioni dei metalli presumibilmente maggiori di quelle riscontrabili nella FORSU, trattati con digestione anaerobica ha dimostrato come per 5 metalli (zinco, piombo, rame, nichel e cromo) vi fosse un aumento della concentrazione di circa il 50% , con incremento della

biodisponibilità per tutti questi metalli tranne che per il piombo [27]. Pur trattandosi di fanghi di diversa natura, ciò che conta e preoccupa è l'aumento di biodisponibilità di alcuni metalli in seguito al trattamento anaerobico, al contrario di quanto avviene nel processo aerobico del compostaggio, in cui si riduce notevolmente la biodisponibilità degli stessi metalli.

Ovviamente il problema della contaminazione della frazione organica è particolarmente marcato nel caso di una sua selezione meccanica a partire da rifiuti indifferenziati, mentre viene sensibilmente ridotto nel caso di separazione alla fonte [20, 24].

Nota:

LA FRAZIONE ORGANICA DERIVANTE DAL TRATTAMENTO MECCANICO DI RIFIUTI INDIFFERENZIATI NON E' FORSU; PRENDE IL NOME DI FOS (FRAZIONE ORGANICA STABILIZZATA) E NON PUO' ESSERE VALORIZZATA AGRONOMICAMENTE IN AGRICOLTURA MA SOLAMENTE PER RECUPERI AMBIENTALI.

Un'adeguata selezione del materiale in ingresso agli impianti di trattamento della frazione organica (compostaggio e digestione anaerobica più compostaggio) è dunque indispensabile per garantire la sicurezza e la sostenibilità dei trattamenti successivi, al fine di ottenere, in ogni caso, ammendanti agricoli di qualità.

2.4.3.3 Carica microbica nel compost e nel digestato

Nella FORSU in ingresso agli impianti possono essere presenti parassiti e microrganismi patogeni (principalmente salmonelle, escherichia coli, listeria, clostridi), anche sotto forma di spore (es. clostridium botulinum [28]) e, di conseguenza, la presenza di batteri patogeni per l'uomo (compresi i clostridi) è possibile sia nel caso del compost [28-30] che del digestato [31, 32].

Questo ha posto il problema della bio-sicurezza degli impianti di trattamento biologico, utilizzati per il compostaggio [33] e per la produzione di digestato [28, 34]. In questi ultimi, a causa della possibile presenza di clostridi patogeni, si impone l'individuazione di batteri indicatori dell'efficacia dei trattamenti igienici adottati [35] e sono consigliabili ulteriori trattamenti finalizzati ad una più efficiente distruzione dei batteri patogeni [31]. Anche per l'ISS "desta preoccupazione la capacità di alcune specie microbiche -in particolare il *Clostridium botulinum*- di sopravvivere in condizioni di anaerobiosi e alle temperature utilizzate nel processo di digestione" [36].

Durante il processo di compostaggio, la fase termofila ad opera di specifici batteri, porta la temperatura della biomassa in fase di compostaggio a valori prossimi a 70°C. Se la fase termofila è protratta per alcuni giorni, il compost prodotto risulta privo di agenti patogeni di origine umana e di parassiti.

È stato segnalato come la sopravvivenza di microrganismi patogeni in rifiuti organici di origine animale risulti minimizzata da un processo di pastorizzazione a 70°C prima dell'avvio della frazione organica al trattamento in impianti di digestione anaerobica [37] e tale pratica è resa obbligatoria dalla normativa tedesca.

Tuttavia la pastorizzazione non è efficace per ridurre i batteri sporigeni come i Clostridi. Studi condotti in Svezia [33] hanno verificato che nel corso della digestione anaerobica il numero di specie e la quantità di Clostridi diminuiscono. È stato verificato che il rischio di contaminazione da batteri sporigeni aumenta quando il digestato è trasportato negli stessi veicoli che trasportano le frazioni organiche da trattare.

In Svezia, per evitare la diffusione di Clostridi patogeni è in vigore la raccomandazione che il digestato sia applicato solo a terreni arabili e non a pascoli utilizzati per la produzione di fieno per gli allevamenti animali. Studi condotti sulle complesse comunità microbiche che si sviluppano durante processi di trasformazione anaerobica di effluenti di allevamenti di suini e bovini hanno documentato l'assenza d'incremento della popolazione di clostridi patogeni [38].

In uno studio condotto in Norvegia, in impianti di digestione anaerobica alimentati con la sola frazione umida separata a monte, nonostante sia dimostrabile la presenza di inquinanti organici (principalmente pesticidi) e inorganici, già presenti nella stessa frazione organica di partenza, il rischio di contaminazione ambientale chimica e batterica da digestato impiegato in agricoltura è considerato basso dagli Autori [39].

In conclusione, le problematiche microbiologiche legate segnatamente alla DA suggeriscono l'adozione del Principio di precauzione.

EMISSIONI IN ATMOSFERA DI TRATTAMENTI AEROBICI ED ANAEROBICI

Le emissioni gassose tipiche degli impianti di trattamento della frazione umida sono costituite da composti azotati (ammoniaca), composti solforati e un ampio gruppo di composti volatili organici (COV) [40, 41] che sono prodotti sia durante il compostaggio che durante il processo di digestione anaerobica, sebbene con diversa composizione e con diversi fattori di emissione.

Tolvanen et al hanno rilevato che le concentrazioni di Composti Organici Volatili misurate all'interno di un impianto di compostaggio aerobico erano inferiori ai limiti consentiti, sebbene molti composti superassero in maniera significativa la soglia odorigena, rendendo possibili per i lavoratori sintomi come nausea e reazioni da ipersensibilità [42].

Una interessante sintesi dei COV prodotti da impianti di compostaggio e di digestione anaerobica è riportata da Font et al [41], che descrive anche le tecniche di rilevazione e le possibilità di abbattimento delle emissioni di COV con sistemi di biofiltrazione.

“Komilis et al, hanno riscontrato la presenza di COV xenobiotici nelle emissioni gassose prodotte dal compostaggio di diverse componenti organiche provenienti dalla selezione meccanica dei rifiuti urbani o frazione organica stabilizzata (FOS) [43], che, per altro, diversamente dalla FORSU, non può essere destinata alla produzione di compost destinato ad usi agronomici ma per altri scopi (ad es. ripristino ambientale, copertura di discariche etc.), specie se in sostituzione di fertilizzanti sintetici.

Le emissioni di COV, inoltre, partecipano alle reazioni fotochimiche in atmosfera, con capacità ossidante. Se necessario, tecniche di ossidazione catalitica possono essere utilizzate per riduzioni più spinte delle concentrazioni di COV presenti nelle emissioni di questi impianti.

Riguardo alle emissioni di gas serra da parte degli impianti di digestione anaerobica con utilizzo del biogas (da sottoporre a trattamento per la trasformazione in biometano) finalizzato alla produzione di energia, una analisi LCA ha evidenziato come questa dipenda da numerosi fattori e quanto sia pesantemente influenzata dalla forma di energia non rinnovabile che andrebbe sostituita [44].

3.1 Bioaerosol

Tutte le tecniche di trattamento biologico sono caratterizzate da emissioni di bioaerosol potenzialmente pericoloso per la salute umana a causa della possibile presenza di micro organismi patogeni.

Il bioaerosol è ovviamente più elevato all'interno degli impianti e nelle sue immediate vicinanze, sottovento agli impianti.

Poiché il compostaggio richiede una costante insufflazione di aria e rimescolamenti della biomassa, la produzione di bioaerosol e la sua dispersione nell'ambiente è un problema specifico di questo trattamento anche nella fase di compostaggio del digestato.

Per tenere sotto controllo questo problema sono state sviluppate procedure per quantificare in modo specifico la carica microbica associata al compostaggio [45]. Le analisi delle cariche microbiche effettuate con questi metodi, intorno ad impianti di compostaggio, hanno verificato che ad un centinaio di metri di distanza dagli impianti queste sono indistinguibili dalla carica microbica di fondo [45].

Altri studi hanno stimato che la distanza di sicurezza possa essere di 250 metri dall'impianto di compostaggio [46].

Pertanto il rischio biologico ha rilevanza per le sole maestranze che operano negli impianti di compostaggio [47] che potrebbero essere esposti ad *aspergillus fumigatus*, causa di immuno-deficienza, per le quali vanno applicate (come peraltro in qualunque impianto di trattamento rifiuti) misure di prevenzione come l'uso dei Dispositivi di Protezione Individuale, quali maschere con filtri di grado P3 e guanti.

Negli impianti di digestione anaerobica la produzione di bioaerosol e la sua immissione negli ambienti di lavoro e nell'ambiente esterno, avviene nella fase di conferimento e pretrattamento della frazione umida e nella fase di compostaggio del digestato.

Negli impianti di digestione anaerobica l'attenzione si è spostata a verificare la presenza di bioaerosol nel biogas. Si è verificato che solo una parte della comunità microbica presente nei fanghi del digestore, con l'occasionale presenza di specie patogene, si ritrova in forma di aerosol nel biogas [48], mentre la restante parte della comunità microbica rimane nel digestato o nei fanghi residui.

Più recentemente l'attenzione su possibili rischi biologici e chimici si è spostata sul biometano.

Un'ampia rassegna bibliografica [49] ha valutato la composizione microbiologica e chimica del biogas prodotto da diverse fonti, con l'obiettivo di stimare qualitativamente e quantitativamente i rischi sanitari associati all'uso domestico del biogas. Le conclusioni di questo studio sono che per gli utilizzatori, l'immissione nella rete di distribuzione del gas di biometano prodotto dalla digestione anaerobica di FORSU, non presenta nessun rischio aggiuntivo rispetto a quello prodotto dal normale uso energetico del gas naturale.

3.2 Emissioni in atmosfera da combustione di biogas e biometano

La combustione in loco del biogas in impianti di co-generazione finalizzati alla produzione di energia elettrica e termica, dotati di sistemi di abbattimento per gli ossidi di azoto e composti organici volatili, causa l'emissione in atmosfera di numerosi composti chimici (tra cui sostanze nocive alla salute umana, alcune delle quali cancerogeni certi per l'uomo - come la formaldeide, Gruppo 1 IARC): monossido di carbonio, NO_x, HCl, VOC, formaldeide, acetaldeide, metano incombusto, anidride carbonica. In particolare i fattori di emissione di polveri sottili di un impianto di cogenerazione alimentato a biogas sono maggiori di quelli di un simile impianto alimentato con gas naturale [44].

La Tabella 5 riporta i fattori di emissione (quantità di inquinanti emessi per unità di energia prodotta) di impianti di cogenerazione alimentati a biogas con una potenza elettrica installata compresa tra 0,5 e 1 MW, in base agli attuali dati di letteratura, ripresi da una recente pubblicazione [50]

TABELLA 5. Fattori di emissione medi, minimi e massimi in impianti di cogenerazione alimentati con biogas con potenza elettrica uguale o inferiore a 1 MW

| | grammi/GJ | | | |
|------------------|----------------|-----|-----|---------------|
| | media e dev.st | Min | Max | Limiti legge* |
| CO | 199 ± 134 | 64 | 434 | 233 |
| NO ₂ | 197 ± 113 | 31 | 362 | 210 |
| PM ₁₀ | 4,6 ± 4,4 | 1,3 | 9,5 | 5 |
| Formaldeide | 15 ± 8 | 9 | 28 | |
| SO ₂ | 28 ± 23 | 4 | 64 | 163 |

*DM 2 aprile 2002, n. 60, D.lgs 152/06

La Tabella 5 mostra un'ampia variabilità dei fattori di emissione con valori medi simili alle concentrazioni previste dagli attuali limiti di legge.

Comunque i limiti di emissione per gli inquinanti gassosi concessi dalla normativa vigente agli impianti di combustione di biogas, sono notevolmente superiori rispetto a quelli concessi alle centrali termoelettriche alimentate a gas naturale che, pur rispettando i limiti di emissione, possono avere effetti misurabili sulla salute umana [51]. Inoltre gli evidenti possibili sforamenti dei limiti di legge per la maggiore parte delle emissioni e la presenza della Formaldeide devono spingere il legislatore al divieto, attraverso una normativa adeguata, della combustione del biogas, essendo prevedibili nella salute umana gli impatti negativi degli impianti di co-generazione alimentati a biogas.

Per questi motivi dovrebbe essere vietata la combustione in loco del biogas, specie in zone già soggette a inquinamento da altre fonti, nelle quali ulteriore fattore critico sarebbe la formazione di particolato secondario originato dagli inquinanti gassosi emessi dagli impianti di combustione del biogas [52].

Anche se l'assetto cogenerativo di questi impianti potrebbe consentire lo spegnimento di altri impianti a combustione più inquinanti e/o meno efficienti è utile rilevare che gli stessi motori utilizzati per produrre elettricità e calore, alimentati da gas naturale hanno fattori di emissione significativamente inferiori di quelli prodotti dall'alimentazione con biogas. Il miglioramento delle prestazioni deriva dal maggiore potere calorifico e da una maggiore purezza del gas naturale.

Al momento non sono disponibili fattori di emissioni d'impianti alimentati a biometano ma, in considerazione della composizione molto simile (Tabella 3) si può ragionevolmente ritenere che le emissioni con motori alimentati a biometano sarebbero significativamente inferiori.

Ulteriori miglioramenti si potrebbero avere se il biometano immesso in rete fosse utilizzato da impianti turbogas che, grazie alla loro maggiore efficienza e ad un più efficace trattamento fumi, avrebbero fattori di emissione ancora inferiori.

A titolo di esempio, se il fattore di emissione di NO₂ di un impianto da 1 MW alimentato a biogas è di 199 g/GJ, quello di un impianto turbogas da oltre 700 MW alimentato con gas naturale è di 14 g/GJ. E i fattori di emissione di PM10 passano da 5 g/GJ di un impianto a biogas ai 2 g/GJ di una centrale turbogas [50].

Una recente analisi LCA ha suggerito che il trattamento del biogas per consentirne l'utilizzo come carburante per autotrazione (bus, auto) appare la scelta più sostenibile in termini di ecotossicità [53].

Un recente studio LCA condotto in Finlandia ha dimostrato che il modo più economico di utilizzo del biogas è proprio quello di impiegarlo come carburante in autoveicoli. Questa modalità è anche la più vantaggiosa in termini di risparmio di produzione di CO₂ [54]. Lo studio non ha comunque valutato gli aspetti sanitari legati alle emissioni.

Si deve comunque rilevare che non tutti gli Autori concordano su tali conclusioni: altri studi, anch'essi basati su metodiche LCA, porterebbero a considerare come economicamente più conveniente e con minori effetti clima-alteranti l'utilizzo del biogas in impianti di cogenerazione (elettricità e calore) [55].

Lo stato dell'arte appare insomma ancora non ben definito e ciò sollecita un uso responsabile del Principio di Precauzione.

In particolare, l'uso energetico del biogas in motori a combustione interna richiederebbe la sua trasformazione in biometano, mediante trattamenti per la riduzione della concentrazione di anidride carbonica e di vapore acqueo (per aumentare il potere calorifico), la riduzione della concentrazione di composti organici solforati (incompatibili con il corretto funzionamento dei motori) e di altre sostanze come silossani (nel caso di biogas da discarica o da digestione di rifiuti organici da selezione meccanica), idrocarburi, ammonio, monossido di carbonio, azoto [56].

La trasformazione del biogas in biometano dovrebbe essere privilegiata anche per la sua immissione nella rete di distribuzione del gas, che deve essere preceduta da trattamenti di purificazione e di adeguamento alle caratteristiche richieste dai gestori della rete.

RACCOMANDAZIONI CONCLUSIVE NELLA GESTIONE DELLA FRAZIONE ORGANICA DEI RIFIUTI URBANI (FORSU).

- Ridurre prioritariamente alla fonte la produzione di FORSU con politiche nazionali che evitino gli sprechi alimentari, diffondendo esperienze quali *Last minute market*, *Banco alimentare*, *Doggy Bag* (servizio dei ristoranti per portare a casa il cibo non consumato) che permettono il recupero, con scopi alimentari, di cibo che per motivi commerciali o per comodità sarebbe destinato allo smaltimento.
- In seconda istanza, è importante promuovere (anche per il portato educativo della pratica) il compostaggio domestico, anche in ambito urbano e sub-urbano, con un programma nazionale rivolto alle famiglie che già ora praticano in modo stabile orticoltura e giardinaggio. Questo programma dovrebbe favorire l'offerta di corsi di compostaggio finalizzati a garantire la buona qualità del compost prodotto.
- Il trattamento di frazioni organiche da selezione meccanica è finalizzato solo alla "stabilizzazione" delle componenti fermentescibili (anche nei sistemi domiciliari più performanti, si trova tipicamente circa il 10 % di organico nel rifiuto residuo, oltre alla componente dei "tessili sanitari") allo scopo di ridurre gli impatti legati al loro smaltimento finale e di rispondere all'obbligo di pretrattamento stabilito dalla Direttiva Discariche. Tale frazione (FOS) quindi non va confusa e tanto meno va assimilata alla FORSU.
- Le frazioni organiche da avviare a trattamenti biologici devono provenire da raccolte differenziate di qualità, dunque preferibilmente del tipo Porta a Porta secondo le declinazioni ed adattamenti specifici alle varie situazioni abitative locali.
- I trattamenti biologici (compostaggio e, subordinatamente, digestione anaerobica più compostaggio) devono essere comunque finalizzati alla produzione e alla commercializzazione di compost di qualità da utilizzare nella produzione agricola e nel giardinaggio.
- La politica degli incentivi deve eliminare l'attuale distorsione che favorisce il recupero di energia (incenerimento e produzione di energia elettrica attraverso la combustione di biomasse e biogas) a danno del recupero di materia. Sono urgenti scelte più corrette, che tengano conto, prioritariamente dell'importanza dell'uso agricolo del compost e, subordinatamente, di tecnologie a minor impatto ambientale quali, ad esempio, la produzione di biometano da immettere in rete in sostituzione di analoghi volumi di gas naturale e la trigenerazione (elettricità+calore+frigorie) che permette l'utilizzo completo del biometano quale fonte di energia rinnovabile, a prescindere dalle condizioni climatiche. Va tenuto conto che la maturità tecnologia raggiunta dalle fonti di energia rinnovabile senza emissioni (eolico, fotovoltaico e idroelettrico) le porta ad essere già da oggi fonti di prima opzione per la produzione energetica.
- Ovunque le condizioni operative relative a quantità trattate, tipologia dei materiali, e contiguità ad insediamenti abitativi lo renda opportuno, compostaggio e digestione anaerobica più compostaggio della FORSU devono avvenire in impianti confinati e adeguatamente controllati. In particolare, deve essere garantito l'abbattimento delle emissioni odorigene in tutte le fasi del ciclo di lavoro-

ne. Eccezioni rispetto a tale valutazione di carattere generale si possono dare per il compostaggio di soli scarti di giardino, impianti di piccola dimensione (impianti comprensoriali) e siti remoti rispetto agli insediamenti abitativi.

- Ove la condizione di cui al punto precedente è resa necessaria, nella progettazione degli impianti di trattamento della frazione organica al chiuso devono essere previste tecniche di aspirazione delle arie esauste e di abbattimento delle emissioni odorigene, almeno con sistemi di biofiltrazione (eventualmente coadiuvati da tecnologie accessorie, quali ad esempio lo scrubbing per il pre-abbattimento del carico odorigeno e della concentrazione di ammoniaca).
- La localizzazione degli impianti di compostaggio e di digestione anaerobica più compostaggio deve garantire l'assenza di civili abitazioni entro un raggio di 250 metri, per escludere i rischi dovuti all'inalazione di bio aerosol.
- Se sono disponibili gli spazi necessari, e i quantitativi di scarto "verde" necessari a garantire strutturazione ai cumuli, il compostaggio dovrebbe essere favorito rispetto alla digestione anaerobica. Tali condizione devono comunque essere favorite in fase di programmazione.
- Gli impianti di digestione anaerobica devono obbligatoriamente compostare il digestato prodotto allo scopo di massimizzare i benefici agro ambientali ed evitare le criticità della applicazione diretta a suolo (perdite di composti azotati, rilascio di ammoniaca, ecc.) e devono favorire la produzione di biometano da utilizzare per l'autotrazione e l'immissione nella rete di distribuzione del gas naturale. La combustione in loco del biogas prodotto deve essere evitata, così come qualsiasi altro tipo di combustione del biogas tal quale.
- Nel caso che l'applicazione diretta del digestato sia prevista e ammessa dalle disposizioni regolamentari (quale è tipicamente il caso di impianti rurali per la digestione di effluenti zootecnici) il digestato non deve essere utilizzato per le fertilizzazione di terreni adibiti a pascolo e alla produzione di fieno come mangime per animali.
- Il Governo Italiano, nel definire le specifiche del biometano da immettere nella rete, deve adottare i valori più restrittivi in questo momento in vigore in Europa rispetto alla concentrazione di contaminanti potenzialmente pericolosi, in particolare mercurio e composti alogenati.
- Al fine di minimizzare l'impatto locale, gli impianti per la digestione anaerobica devono essere integrati con impianti di raffinazione a biometano del biogas, con impianti di deputazione e compostaggio per i residui liquidi e solidi; devono essere dimensionati in modo tale che il biometano prodotto sia impiegato per fornire il calore e l'elettricità necessari al funzionamento dell'impianto e per i fabbisogni energetici di edifici e aziende limitrofe, possibilmente in configurazione tri-generativa (elettricità, calore, frigoriferie). Se la produzione di biometano fosse superiore agli autoconsumi e al tele-riscaldamento-tele raffreddamento, tale quota dovrebbe essere immessa in rete e/o usata come combustibile per il parco autoveicolare adibito alla raccolta dei rifiuti e al trasporto pubblico.



- La depurazione del digestato liquido dovrebbe essere prevista nello stesso sito di produzione del digestato, preferibilmente in abbinamento a un impianto di trattamento delle acque fognarie, dove inviare le acque reflue della digestione. Il digestore anaerobico a sua volta, in una linea dedicata, tratterà i fanghi prodotti dall'impianto di depurazione, fornendo a quest'ultimo l'elettricità e il calore necessari per il suo funzionamento.

ALLEGATO

Compostaggio domestico

L'incentivazione al compostaggio su piccola scala (domestico/condominiale/di quartiere) è da considerarsi l'azione prioritaria al fine di ridurre la quantità totale della frazione organica da trattare in grandi impianti. La ricaduta economica e ambientale di tale attività dipende peraltro molto dal contesto dell'organizzazione locale di raccolta dei rifiuti e dalla incidenza locale della diffusione del compostaggio domestico.

Sul primo aspetto il discrimine più rilevante è costituito dall'effettuazione o meno della raccolta differenziata dell'umido e/o della frazione verde (e della presenza/localizzazione dei relativi impianti di recupero), nel secondo caso dalla possibilità di modificare e riprogettare i servizi di raccolta per effetto di una massiccia adesione al compostaggio domestico.

La fissazione degli obiettivi, nell'ambito territoriale individuato, dipende dalle caratteristiche degli edifici (presenza case con verde, condomini, centri storici etc.), dalle strategie globali di gestione dei rifiuti organici, dalla capacità di supportare programmi con grado variabile di complessità.

Tenendo conto che al di fuori di ambiti urbani, il 10-15% delle famiglie dotate di orto e giardino è facilmente coinvolta in un programma di promozione del compostaggio domestico, in questi casi, come pure in ambienti, dove la pratica degli orti urbani si sta diffondendo, può adottare una strategia più "spinta" con l'obiettivo di coinvolgere anche coloro che, pur svolgendo regolarmente una attività di giardinaggio (circa il 20% delle famiglie italiane) non aderirebbero spontaneamente a questa pratica.

In territori idonei si può pensare di raggiungere, attraverso operazioni che consentano di coinvolgere anche target di secondo livello (ossia utenze domestiche "collettive"), un grado di adesione al compostaggio domestico pressoché totale.

Poiché alla dimensione comunale corrisponde una determinata configurazione urbanistica, indicativamente si possono individuare obiettivi teorici di coinvolgimento delle famiglie in funzione della popolazione comunale, secondo lo schema seguente:

| POPOLAZIONE COMUNALE | % DI UTENZE DOMESTICHE E NON DOMESTICHE CHE POTENZIALMENTE POSSONO ADERIRE AL PROGRAMMA DI PROMOZIONE |
|----------------------|---|
| 30.000-50.000 | 5-10 |
| 15.000-30.000 | 10-15 |
| 10.000-15.000 | 15-20 |
| 5.000-10.000 | 25-30 |
| 1000-5000 | 40-60 |
| < 1000 | 70-90 |

Tabella 1: obiettivi teorici di coinvolgimento in base alle dimensioni del centro abitato



A titolo di riferimento, si segnala come la Regione Lombardia abbia individuato un target complessivo, su scala regionale, di circa il 5% delle famiglie lombarde. L'ADEME (Agenzia francese per l'ambiente) stima, su scala regionale, che il 10-15% delle famiglie abbia una compostiera e che su scala intercomunale (EPCI, Comunità di Comuni) si possa raggiungere il 50%.

Affinché la pratica del compostaggio domestico possa diffondersi senza problemi (cattivi odori, sviluppo d'insetti) è utile che la promozione di questa pratica si accompagni a corsi di formazione rivolti ai potenziali compostatori domestici, utili a far comprendere i principi biologici alla base della degradazione aerobia e a conoscere gli accorgimenti da adottare per evitare disagi per se e per i propri vicini.

Un manuale di compostaggio che illustra in dettaglio le modalità per ottenere un ottimo compost sia che si disponga di un ampio giardino come pure di un balconcino di città è stato pubblicato a cura di Italia Nostra (<http://www.federico-valerio.it/wp-content/uploads/2013/12/LIBRO-ITALIA-N.-2012.pdf>)

Bibliografia

- 1 Sachs WM, M.; *Futuro sostenibile. Le risposte eco-sociali alle crisi in Europa.*: Edizioni Ambiente; 2011.
- 2 European Environment A. *EEA Report No 1/2013: Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation.*: European Environment Agency (EEA); 2013.
- 3 ISPRA. *Rapporto Rifiuti Urbani - Edizione 2013.* Roma: ISPRA; 2013.
- 4 Morris J, Scott Matthews H and Morawski C. *Review and meta-analysis of 82 studies on end-of-life management methods for source separated organics.* *Waste management* 2013;33:545-51.
- 5 Assmuth T and Kalevi K. *Concentrations and toxicological significance of trace organic compounds in municipal solid waste landfill gas.* *Chemosphere* 1992;24:1207-16.
- 6 Bogner J, Pipatti R, Hashimoto S, Diaz C, Mareckova K, Diaz L et al. *Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation).* *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 2008;26:11-32.
- 7 Regione Veneto - *DCR 24 del 04/05/2004 Dd. Utilizzo del compost di qualità in agricoltura e sperimentazione tecnica ed economica finalizzata alla riduzione dei concimi azotati tradizionali.*; 2005.
- 8 Lombardia R. *La stima degli impatti ambientali della riduzione dei rifiuti mediante l'analisi del ciclo di vita (LCA - Life Cycle Assessment).* 2009.
- 9 Giacetti W, Confalonieri A, Mainero D, Rossi L and Centemero M. *Biogas e Compost da rifiuti organici selezionati.* Roma: Consorzio Italiano Compostatori (CIC) - gruppo di lavoro sulla gestione anaerobica (GdLDA). 2011.
- 10 (ECCP) ECCP. *Working Group Sinks Related to Agricultural Soils - Final Report.* 2012.
- 11 Sequi P. *Outlook on perspective for compost in Italy.* *EU Symposium Compost - Quality Approach in European Union.* Wien: Federal Ministry for the Environment, youth and Family Affairs; 1998pp. 161-7.
- 12 Tambone F, Scaglia B, D'Imporzano G, Schievano A, Orzi V, Salati S et al. *Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost.* *Chemosphere* 2010;81:577-83.
- 13 Albuquerque JA, de la Fuente C, Ferrer-Costa A, Carrasco L, Cegarra J, Abad M et al. *Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues.* *Biomass and Bioenergy* 2012;40:181-9.
- 14 Jonsson O, Polman E, Jensen JK, Eklund R, Schyl H and Ivarsson S. *Sustainable gas enters the european gas distribution system.*: Danish Gas Technology Centre; 2013.
- 15 Huguen P and Le SAux G. *Perspectives for a european standard on biomethane: a Biogasmax proposal.*; 2010.
- 16 Valzano F, Jackson M and Campbell A. *Greenhouse Gas Emissions from Composting Facilities.* Sydney, Australia: Recycled Organics Unit - The University of New South Wales, Sydney; 2001.
- 17 Umlauf G, Christoph EH, Lanzini L, Savolainen R, Skejo H, Bidoglio G et al. *PCDD/F and dioxin-like PCB profiles in soils amended with sewage sludge, compost, farmyard manure, and mineral fertilizer since 1962.* *Environmental science and pollution research international* 2011;18:461-70.
- 18 Brandli RC, Kupper T, Bucheli TD, Zennegg M, Huber S, Ortelli D et al. *Organic pollutants in compost and digestate. Part 2. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and -furans, dioxin-like polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, perfluorinated alkyl substances, pesticides, and other compounds.* *Journal of environmental monitoring : JEM* 2007;9:465-72.

- 19 Hellstrom A, Nilsson ML and Kylin H. Current-use and organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the biodegradable fraction of source separated household waste, compost, and anaerobic digest. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 2011;86:60-4.
- 20 Amlinger FP, M.; Favoino, E. Heavy metals and organic compounds from wastes used as fertilisers. Bruxelles; 2004.
- 21 Leven L, Nyberg K and Schnurer A. Conversion of phenols during anaerobic digestion of organic solid waste--a review of important microorganisms and impact of temperature. *Journal of environmental management* 2012;95 Suppl:S99-103.
- 22 Disse G, Weber H, Hamann R and Haupt HJ. Comparison of PCDD and PCDF concentrations after aerobic and anaerobic digestion of sewage sludge. *Chemosphere* 1995;31:3617-25.
- 23 Valerio F. Environmental impacts of post-consumer material managements: recycling, biological treatments, incineration. *Waste management* 2010;30:2354-61.
- 24 Musumeci L and Gucci PMB. Aspetti igienico-sanitari per la produzione di compost di elevata qualità. *Annali dell'Istituto superiore di sanita* 1997;33:595-603.
- 25 Smith SR. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment international* 2009;35:142-56.
- 26 Wetzel S, Stafford DA, Crabtree DD and Bryant JA. Heavy Metal Profiles and reduction during the treatment of poultry waste using thermophilic anaerobic digestion.; 1996.
- 27 Dong B, Liu X, Dai L and Dai X. Changes of heavy metal speciation during high-solid anaerobic digestion of sewage sludge. *Bioresource Technology* 2013;131:152-8.
- 28 Bohnel H and Lube K. Clostridium botulinum and bio-compost. A contribution to the analysis of potential health hazards caused by bio-waste recycling. *Journal of veterinary medicine. B, Infectious diseases and veterinary public health* 2000;47:785-95.
- 29 Brinton WF, Jr., Storms P and Blewett TC. Occurrence and levels of fecal indicators and pathogenic bacteria in market-ready recycled organic matter composts. *Journal of food protection* 2009;72:332-9.
- 30 Gessler F and Bohnel H. Persistence and mobility of a Clostridium botulinum spore population introduced to soil with spiked compost. *FEMS microbiology ecology* 2006;58:384-93.
- 31 Owamah HI, Dahunsi SO, Oranusi US and Alfa MI. Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste management* 2014;34:747-52.
- 32 Rounsefell BD, O'Sullivan CA, Chinivasagam N, Batstone D and Clarke WP. Fate of pathogen indicators in a domestic blend of food waste and wastewater through a two-stage anaerobic digestion system. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 2013;67:366-73.
- 33 Bagge E. Hygiene aspects of the biogas process with emphasis on spore-forming bacteria. Dept. of Bacteriology, National Veterinary Institute. Uppsala: Swedish University of agricultural sciences; 2009.
- 34 Vecchia P and Piccinini S. Biogas e Parmigiano Reggiano: una coesistenza possibile? *Agricoltura*. Vol. 48; 2011pp. 22-6.
- 35 Sahlstrom L. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresour Technol* 2003;87:161-6.
- 36 Auricchio B, Anniballi F, Fiore A, Bonadonna L and De Medici D. Il biogas: spunti per una serena riflessione. In: ISS, editor. *Notiziario ISS*. Vol. 27; 2014.
- 37 Bagge E, Sahlstrom L and Albihn A. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. *Water research* 2005;39:4879-86.

- 38 Dohrmann AB, Baumert S, Klingebiel L, Weiland P and Tebbe CC. Bacterial community structure in experimental methanogenic bioreactors and search for pathogenic clostridia as community members. *Applied microbiology and biotechnology* 2011;89:1991-2004.
- 39 Govasmark E, Ståb J, Holen B, Hoornstra D, Nesbakk T and Salkinoja-Salonen M. Chemical and microbiological hazards associated with recycling of anaerobic digested residue intended for agricultural use. *Waste management* 2011;31:2577-83.
- 40 Eitzer BD. Emissions of volatile organic chemicals from municipal solid waste composting facilities. *Environmental science & technology* 1995;29:896-902.
- 41 Font X, Artola A and Sanchez A. Detection, composition and treatment of volatile organic compounds from waste treatment plants. *Sensors* 2011;11:4043-59.
- 42 Tolvanen O, Nykanen J, Nivukoski U, Himanen M, Veijanen A and Hanninen K. Occupational hygiene in a Finnish drum composting plant. *Waste management* 2005;25:427-33.
- 43 Komilis DP, Ham RK and Park JK. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes. *Water research* 2004;38:1707-14.
- 44 Blengini GA, Brizio E, Cibrario M and Genon G. LCA of bioenergy chains in Piedmont (Italy): A case study to support public decision makers towards sustainability. *Resources, Conservation and Recycling* 2011;57:36-47.
- 45 Le Goff O, Godon J-J, Milferstedt K, Bacheley H, Steyer J-P and Wéry N. A new combination of microbial indicators for monitoring composting bioaerosols. *Atmospheric Environment* 2012;61:428-33.
- 46 Taha MPM, Drew GH, Tamer A, Hewings G, Jordinson GM, Longhurst PJ et al. Improving bioaerosols exposure assessment of composting facilities - comparative modelling of emissions from different compost ages and processing activities. *Atmospheric Environment* 2007;41:4504-19.
- 47 Nadal M, Inza I, Schuhmacher M, Figueras MJ and Domingo JL. Health risks of the occupational exposure to microbiological and chemical pollutants in a municipal waste organic fraction treatment plant. *International journal of hygiene and environmental health* 2009;212:661-9.
- 48 Moletta M, Delgenes JP and Godon JJ. Differences in the aerosolization behavior of microorganisms as revealed through their transport by biogas. *The Science of the total environment* 2007;379:75-88.
- 49 Naja GM, Alary R, Bajeat P, Bellenfant G, Godon JJ, Jaeg P et al. Assessment of biogas potential hazards. *Renewable Energy* 2011;36:3445-51.
- 50 Schievano A, Adani F and Terruzzi L. Emissioni da cogeneratori installati in impianti di biogas. *revisione critica di dati da letteratura scientifica*. Milano: Dipartimento di scienze agrarie e ambientali, Università di Milano.
- 51 Di Ciaula A. Emergency visits and hospital admissions in aged people living close to a gas-fired power plant. *European journal of internal medicine* 2012;23:e53-8.
- 52 Grosjean D and Seinfeld JH. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols. *Atmospheric Environment* 1989;23:1733-47.
- 53 Beylot A, Villeneuve J and Bellenfant G. Life Cycle Assessment of landfill biogas management: sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste management* 2013;33:401-11.
- 54 Uusitalo V, Soukka R, Horttanainen M, Niskanen A and Havukainen J. Economics and greenhouse gas balance of biogas use systems in the Finnish transportation sector. *Renewable Energy* 2013;51:132-40.
- 55 Rehl T and Muller J. CO₂ abatement costs of greenhouse gas (GHG) mitigation by different biogas conversion pathways. *Journal of environmental management* 2013;114:13-25.
- 56 Ryckebosch E, Drouillon M and Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* 2011;35:1633-45.



Ringraziamenti

ISDE Italia ringrazia Alberto Confalonieri, Francesco Boyer ed Enzo Favoino, della Scuola Agraria del Parco di Monza, per la preziosa collaborazione offerta.



Associazione Medici per l'Ambiente - ISDE Italia

Via della Fioraia, 17/19

52100 Arezzo

Tel: 0575-22256 - Fax: 0575-28676

e-mail: isde@ats.it www.isde.it