



Il recupero di sostanza organica dai rifiuti per la produzione di ammendanti di qualità

Informazioni legali

L'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma
Unità Normativa Tecnica
www.anpa.it

Osservatorio Nazionale sui Rifiuti

Via Cristoforo Colombo, 44 - 00147 Roma

@ ANPA, Manuali e linee guida 7/2002

ISBN 88-448-0052-7

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Coordinamento ed elaborazione grafica

ANPA, Immagine
Grafica di copertina: Franco Iozzoli
Foto di copertina: Paolo Orlandi

Coordinamento tipografico

ANPA, Dipartimento Strategie Integrate Promozione e Comunicazione

Impaginazione e stampa

I.G.E.R. srl - Via C.T. Odascalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TCF

Finito di stampare nel mese di maggio 2002

Il presente Rapporto, è stato elaborato dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente - Unità Normativa Tecnica nell'ambito delle attività previste dalla convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, ONR ed ANPA.

L'impostazione e la stesura finale sono a cura di **Rosanna LARAIA**, Responsabile dell'Unità Normativa Tecnica - ANPA.

La Redazione è stata a cura del Gruppo di lavoro coordinato dal **Prof. Giovanni VALLINI** (Università degli Studi di Verona), composto da:
Valentina CAIMI, Massimo CENTEMERO, Enzo FAVOINO (Scuola Agraria del Parco di Monza);
Andrea Massimiliano LANZ (consulente ANPA);
Liliana CORTELLINI (esperto ambientale).

Ha collaborato Chiara GHINI (Università degli Studi di Verona)

Premessa

L'Agenzia ha intrapreso uno studio relativo al recupero di sostanza organica da rifiuti per la produzione di ammendanti di qualità per conto dell'Osservatorio Nazionale sui Rifiuti (ONR), nell'ambito delle attività previste dalla convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, ONR ed ANPA.

Il compostaggio, in effetti, costituisce un valido strumento per stornare una notevole quantità di rifiuti che altrimenti sarebbero destinati alle discariche ed agli inceneritori, rappresentando, pertanto, un efficace complemento alle tradizionali forme di riciclaggio. Esso consente di recuperare sostanza organica per reintegrarla nei terreni, prevenendo, in tal modo, fenomeni di erosione, incrementando la fertilità biologica dei suoli e contribuendo in maniera determinante al ripristino dei siti contaminati. Pur con queste premesse, è possibile constatare come il compostaggio abbia annoverato, presso impianti distribuiti in tutto il mondo, un considerevole numero di fallimenti imputabili soprattutto alla scarsa qualità del prodotto ottenuto, alla inefficiente fase di preselezione del flusso di rifiuti ed alla scarsa conoscenza del processo. Pertanto, al fine di rendere il compostaggio un valido strumento di recupero dei rifiuti, complementare ad altre forme di gestione, devono essere adottate appropriate metodologie. In questo contesto, scopo dell'ANPA è stato quello di individuare i criteri da seguire per un efficace recupero di diverse tipologie di rifiuto, mediante la produzione di un compost di qualità.

Sono stati pertanto analizzati i principali temi inerenti il compostaggio visto nel contesto di un sistema integrato di gestione dei rifiuti, affrontando i diversi aspetti, chimico – fisici, biochimici, microbiologici e cinetici che caratterizzano le diverse fasi del processo.

Nell'ambito della gestione del processo è risultata, altresì, inevitabile una attenta analisi delle operazioni da intraprendere presso l'impianto di compostaggio, dallo stoccaggio del rifiuto iniziale alla fase di confezionamento del prodotto finito, nonché una valutazione delle misure e dei criteri da seguire per il controllo degli odori e per una corretta localizzazione dell'impianto (distanze di sicurezza, preparazione del sito, ecc.).

Uno dei parametri che maggiormente influenza le caratteristiche del compost è senz'altro la qualità del rifiuto in ingresso al trattamento. I sistemi di selezione meccanica sono solitamente caratterizzati da un rendimento specifico che, pur aspirando alla completa separazione delle singole componenti del rifiuto, denuncia, in realtà delle rese molto più basse. Alcuni sistemi per l'incremento del processo di separazione pur migliorando la qualità dell'organico recuperato, non riescono tuttavia ad assicurare una separazione assoluta delle altre frazioni. Il risultato complessivo è l'ottenimento, da un lato, di un organico ancora piuttosto contaminato da materiali indesiderati, e dall'altro, un flusso di frazioni non compostabili, commiste a quantitativi non trascurabili di organico putrescibile.

La raccolta differenziata fornisce, invece, un rifiuto in ingresso di qualità superiore e non può, pertanto, essere trascurata da chi deve pianificare la gestione dei rifiuti finalizzata al recupero di materia, di cui il compostaggio è un aspetto. È stata, conseguentemente, analizzata la raccolta differenziata come strumento di ottimizzazione del recupero di matrici organiche destinate al compostaggio. Lo studio si completa con l'analisi dei costi economici, delle caratteristiche tecniche, dei settori di impiego, della situazione attuale del settore e delle prospettive del mercato del compost.

Il Direttore dell'ANPA
Ing. Giorgio Cesari

Il Presidente dell'ONR
Dott. Massimo Ferlini

Indice

1	IL COMPOSTAGGIO COME SCELTA TECNOLOGICA, COME OPPORTUNITÀ ECONOMICA, COME NECESSITÀ AMBIENTALE	1
1.1	Il contesto normativo	1
1.2	Il compostaggio come componente di un sistema integrato di gestione dei rifiuti	10
1.3	Perché il compostaggio è importante?	11
2	IL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO	15
2.1	Definizione di compostaggio	15
2.2	Dinamica del processo	16
2.3	L'ecosistema microbico alla base del processo	17
2.3.1	I batteri	18
2.3.2	Gli attinomiceti	18
2.3.3	I funghi	18
2.3.4	I protozoi e la macrofauna	19
2.4	Fattori che influenzano il processo e controllo delle reazioni	19
2.4.1	La concentrazione di ossigeno e l'aerazione	20
2.4.2	La temperatura	20
2.4.3	L'umidità	21
2.4.4	La concentrazione ed il rapporto dei nutrienti	21
2.4.5	Le proprietà fisico-meccaniche del substrato (porosità, struttura, tessitura e dimensione delle particelle)	22
2.4.6	Il pH	23
2.5	Aspetti metabolici delle reazioni microbiche a carico dei substrati sottoposti a compostaggio	24
2.5.1	Le possibili vie di trasformazione biochimica dei composti organici	24
2.5.2	Le trasformazioni a carico dei composti azotati	25
3	SCELTA E PREPARAZIONE DELLE MATRICI ORGANICHE DA SOTTOPORRE A COMPOSTAGGIO	29
3.1	Requisiti generali del substrato di partenza	29
3.2	Gli ingredienti della miscela iniziale	30
3.2.1	Preparazione della miscela iniziale con contenuto di umidità voluto	31
3.2.2	Preparazione della miscela iniziale con rapporto C/N voluto	31
3.2.3	Calcolo simultaneo delle quantità appropriate dei diversi ingredienti di una miscela di umidità e rapporto C/N voluti	33
3.3	Caratterizzazione preliminare delle matrici da trattare	35
3.3.1	Analisi di campo sulle matrici destinate al compostaggio	35
4	I METODI DI COMPOSTAGGIO	39
4.1	Quale metodo di compostaggio adottare?	39
4.2	I sistemi tecnologici di compostaggio	40
4.2.1	Il compostaggio in cumuli con rivoltamento della biomassa substrato	40
4.2.2	Il compostaggio in cumuli statici aerati	42
4.2.3	Il compostaggio in bireattori	46

5	LE PRINCIPALI OPERAZIONI PRESSO LA STAZIONE DI COMPOSTAGGIO	51
5.1	Gestione delle materie prime oggetto di trattamento	52
5.1.1	Stoccaggio	52
5.1.2	Condizionamento fisico-meccanico (triturazione e dilacerazione)	52
5.2	Formazione della miscela iniziale: allestimento dei cumuli o alimentazione del bioreattore	53
5.3	Raffinazione, stoccaggio e nobilitazione del compost	54
5.3.1	Il finissaggio	54
5.3.2	Lo stoccaggio del prodotto finito	55
5.3.3	La vagliatura	55
5.3.4	Aggiunta di additivi e confezionamento	57
6	GESTIONE DEL CICLO DI PRODUZIONE DEL COMPOST: CONTROLLO DEL PROCESSO E CONTENIMENTO DEI POTENZIALI FATTORI NEGATIVI	59
6.1	Generazione e controllo degli odori	59
6.1.1	Ricorrenza e caratteristiche del problema	59
6.1.2	Misure di prevenzione ed abbattimento delle emissioni maleodoranti	61
6.2	Attenzione per i fattori di rischio sanitario e di sicurezza sul lavoro	66
6.2.1	Bioparticolato e bioaerosol	66
6.2.2	Presenza di sostanze chimiche tossiche	68
6.2.3	L'inquinamento acustico	68
6.2.4	Altri aspetti riguardanti la sicurezza e la prevenzione degli infortuni	69
7	LOCALIZZAZIONE DELLA STAZIONE DI COMPOSTAGGIO, RISPETTO DELLE DISTANZE DI SICUREZZA ED ORGANIZZAZIONE DEGLI SPAZI INTERNI	71
7.1	Scelta del sito	71
7.2	Requisiti per l'insediamento	71
7.2.1	Valutazione delle distanze di sicurezza e di rispetto	71
7.2.2	Ottimizzazione del drenaggio	72
7.2.3	Considerazioni ambientali	72
7.3	Organizzazione degli spazi e delle attrezzature funzionali alla stazione di compostaggio	73
8	I COSTI ECONOMICI DEL COMPOSTAGGIO	81
8.1	L'analisi costi/benefici	81
8.2	Le voci di costo	82
8.2.1	I costi di investimento	82
8.2.2	I costi di gestione e di manutenzione	84
8.3	I vantaggi	86
8.3.1	I costi mancati	86
8.3.2	I proventi	86
8.4	Analisi di casi esemplificativi	87

9	LA RACCOLTA DIFFERENZIATA ALLA FONTE COME STRUMENTO DI OTTIMIZZAZIONE DEL RECUPERO DI MATRICI ORGANICHE DESTINATE AL COMPOSTAGGIO	89
9.1	Sviluppo e prospettive della raccolta delle frazioni compostabili in Italia	91
9.1.1	Il contributo delle frazioni compostabili agli obiettivi complessivi di raccolta differenziata	98
9.2	I sistemi italiani di raccolta differenziata: specificità e risultati	103
9.2.1	La definizione degli obiettivi della raccolta	103
9.2.2	La raccolta dello "scarto verde" e la via del compostaggio domestico	104
9.2.3	La raccolta dello "scarto umido"	106
9.2.4	La scelta tra raccolta a domicilio e accentramento dei punti di prelievo	106
9.3	La qualità del materiale raccolto e l'influenza delle variabili urbanistiche e demografiche	108
9.4	L'ottimizzazione operativa dei circuiti ed il contenimento dei costi	110
9.4.1	Una premessa metodologica: come valutare i costi di raccolta	110
9.4.2	Il paradosso della competitività economica dei sistemi domiciliarizzati	111
9.4.3	Tendenze emergenti per la ottimizzazione dei servizi di raccolta differenziata	113
9.5	Considerazioni finali su integrazione del sistema di asporto dei rifiuti e riduzione dei costi	116
10	CARATTERISTICHE TECNICHE E SETTORI DI IMPIEGO DEL COMPOST: IMPORTANZA PER L'AGRICOLTURA ITALIANA	119
10.1	La progressiva diminuzione della sostanza organica nei suoli italiani: significato e conseguenze	119
10.1.1	Salinizzazione	119
10.1.2	Erosione	119
10.1.3	Diminuzione del contenuto di sostanza organica	119
10.1.4	Pratiche per la conservazione ed il miglioramento della dotazione di sostanza organica nei suoli	121
10.2	Individuazione delle caratteristiche agro-ambientali del compost	122
10.2.1	Gli indici di stabilità per definire la fermentescibilità residua	122
10.2.2	Parametri ambientali	124
10.2.3	Purezza merceologica delle biomasse di origine urbana	125
10.2.4	Il contenuto in metalli pesanti	125
10.2.5	Caratteristiche agronomiche dei materiali compostati	128
10.3	Caratteristiche specifiche del compost per i diversi ambiti d'impiego	131
10.3.1	Impieghi in ambito agricolo	131
10.3.2	Impieghi in ambito florovivaistico	132
10.4	Impieghi in ambito paesaggistico e di gestione del territorio	134
10.4.1	Ruolo del compost nel risanamento di siti degradati	135
11	IL MERCATO DEL COMPOST: SITUAZIONE ATTUALE, PROSPETTIVE ED ELEMENTI PER LA PROMOZIONE TECNICA E COMMERCIALE	139
11.1	Lo scenario europeo	139
11.2	Potenzialità di collocazione del compost	139
11.3	Il compost di qualità in Italia: impieghi e destinazioni commerciali	140
11.4	Recettività potenziale del mercato e collocazione attuale del compost	141
11.4.1	L'agricoltura di pieno campo	141

11.4.2	Altri segmenti di mercato	142
11.5	Le tendenze in atto	144
11.6	I prezzi di vendita	145
11.7	Elementi per il consolidamento del mercato	145
11.7.1	Importanza del controllo della filiera di compostaggio	145
11.7.2	Il Sistema di Assicurazione della Qualità (SAQ)	146
11.8	Qualità e mercato del compost in Italia: alcuni punti fermi e qualche considerazione sulle prospettive	147
Appendice 1	Caratteristiche tipiche di rifiuti, scarti e residui organici utilizzabili nella produzione di compost	151
Appendice 2	Modelli per il dimensionamento e la stima dei costi del compostaggio	155
Appendice 3	Glossario dei termini più ricorrenti in materia di compostaggio	197

1. Il compostaggio come scelta tecnologica, come opportunità economica, come necessità ambientale

1.1 Il contesto normativo

Normativa Comunitaria

La normativa in materia di produzione ed impiego del compost è affidata, allo stato attuale, ai diversi Stati membri non essendo stata emanata alcuna direttiva in materia di qualità di compost atta ad armonizzare le normative nazionali.

Diversi Paesi hanno evidenziato il problema della mancanza di una disposizione in materia, soprattutto nel caso del compost di qualità, che può essere considerato prodotto e quindi incluso tra i fertilizzanti ammessi alla commercializzazione. In tal caso un Paese che preveda limiti meno restrittivi di un altro Paese può esportare verso quest'ultimo un compost che non rispetti i limiti di commercializzazione se prodotto in loco; tale problema è ben evidente in sede di Commissione Europea.

Attualmente, a livello comunitario sono in vigore strumenti normativi specifici in merito al marchio di qualità ecologica (Ecolabel) per i diversi prodotti, il cui sistema di assegnazione è individuato dal Regolamento 1980/2000/CE che ha sostituito il Regolamento del Consiglio 880/92/CEE istitutivo del sistema volontario di certificazione di qualità ecologica dei prodotti. Il Regolamento 1980/2000/CE stabilisce che il marchio di qualità può essere assegnato a prodotti che contribuiscono in maniera significativa a risolvere problemi ambientali di primaria importanza (articolo 3) e prevede che i criteri per la sua assegnazione siano individuati per gruppi di prodotti (articolo 4). Ai sensi delle procedure per la definizione dei criteri relativi a ciascun gruppo di prodotti, previste dall'articolo 6 del suddetto regolamento, sono state elaborate ed adottate, per gli ammendanti del suolo ed i substrati di coltivazione, una serie di misure individuate dalla Decisione della Commissione 2001/688/CE. Con questa decisione vengono rispettivamente definiti come ammendanti del suolo e substrati di coltivazione i *materiali da aggiungere al suolo in situ principalmente per conservarne o migliorarne le caratteristiche fisiche e che possono migliorarne le caratteristiche o le attività chimiche e/o biologiche* ed i *materiali diversi dai suoli in situ, dove vengono coltivati vegetali* (articolo 1). Tale decisione individua, inoltre, all'allegato 1 i criteri a cui deve conformarsi un prodotto, ricadente nel gruppo di prodotti definiti all'articolo 1, per ottenere il marchio di qualità ecologica. L'etichetta ecologica europea certifica che il prodotto a cui è applicata garantisce un ridotto impatto ambientale e consente al consumatore di verificare immediatamente se il prodotto è conforme o meno ai requisiti prestabiliti. Va comunque ribadito che l'adesione al sistema Ecolabel è del tutto volontaria e che i prodotti privi di etichetta ecologica non sono soggetti ad alcuna penalizzazione nell'ambito del mercato comunitario.

Il piano di lavoro relativo al marchio di qualità ecologica per il periodo compreso tra il 1° gennaio 2002 ed il 31 dicembre 2004 è stato fissato dalla Commissione con la Decisione 2002/18/CE del 21 dicembre 2001.

Normativa italiana

La trasformazione in compost delle frazioni organiche dei rifiuti e il loro successivo impiego, in relazione alle caratteristiche dei rifiuti avviati al trattamento, come ammendante o per impieghi paesistici, per il ripristino ambientale delle aree degradate o per altre forme di utilizzo, rappresentano, per l'Italia, un elemento nodale nella strategia di gestione integrata dei rifiuti, costituendo la forma più adeguata per il recupero di materia. La produzione di compost, in particolare di compost di qualità derivante da matrici selezionate alla raccolta, ha l'importante valenza di rendere disponibili ammendanti utilizzabili per il ripristino e/o il mantenimento di un adeguato tenore di sostanza organica dei suoli ai fini della conservazione della fertilità e la limitazione dei fenomeni di erosione e desertificazione, assai accentuati in alcune aree del Paese.

Attualmente sono individuate, dalla normativa italiana, due tipologie di compost:

- compost di qualità elevata, ottenuto esclusivamente da matrici organiche selezionate alla raccolta ed incluso nella categoria degli ammendanti commerciali in base alla Legge 748/84, con la denominazione di "ammendante compostato verde" o di "ammendante compostato misto". Questa tipologia di compost si configura come prodotto ed è pertanto utilizzabile senza altri vincoli che non siano quelli di una buona pratica agricola
- compost di qualità inferiore, destinabile all'attività agricola, ma vincolato al rispetto di diversi standard qualitativi, di quantità massime utilizzabili e all'analisi preliminare dei terreni destinati all'utilizzo.

I dati relativi al mercato del compost di qualità dimostrano che esso viene interamente assorbito dal mercato e che la disponibilità risponde solo marginalmente alla domanda che si esprime nel nostro Paese. Infatti, anche in caso di intercettazione massima di scarto organico compostabile (100 kg/ab/anno) e valorizzazione dello stesso mediante compostaggio, non si porrebbero problemi di eccesso di offerta rispetto alla domanda: la produzione potenziale di compost a livello nazionale risponderebbe ai fabbisogni di non oltre l'1,2% della superficie agricola utilizzabile dell'intero Paese.

Anche nel caso delle frazioni organiche presenti nel rifiuto indifferenziato, a valle del circuito della raccolta differenziata, il sistema di gestione integrata tracciato dal D.lgs 22/97, impone la ricerca di ulteriori possibilità di valorizzazione finalizzate al recupero di materia. In questo contesto si inserisce il trattamento biologico, mediante compostaggio di frazioni organiche derivanti da impianti di selezione meccanica a valle della raccolta, che dà luogo a materiali che potranno ancora essere avviati a circuiti di valorizzazione che prevedano specifiche prescrizioni e limitazioni in base alla tipologia di utilizzo. In relazione all'orientamento sempre più accentuato degli operatori agricoli verso produzioni di qualità, è prevedibile che vi siano scarse prospettive di impiego per tale tipologia di materiali nel settore agricolo, che risulta interessato, piuttosto, ai compost ottenuti da frazioni organiche da raccolta differenziata. Per il materiale biostabilizzato da rifiuti indifferenziati un impiego di elezione potrà essere rappresentato dalla destinazione ad attività di recupero ambientale e paesistiche, che possono richiedere anche impieghi massivi, per i quali viene richiesta la disponibilità di sostanza organica stabilizzata al fine di migliorare le caratteristiche dei materiali inerti impiegati. Lo strumento normativo può giocare un ruolo molto importante riguardo alla necessità di valorizzare la frazione organica dei rifiuti urbani soprattutto per quanto attiene ai materiali di non elevata qualità; si tratta di completare ed integrare il quadro legislativo già vigente per quanto attiene ai prodotti di qualità (Legge 748/84 e D.M. 27 marzo 1998), introducendo regole certe ed adeguate all'esigenza di garantire opportunità di utilizzo di tali materiali, fermo restando il rispetto di elevati livelli di tutela ambientale.

Realizzazione e gestione di impianti di compostaggio.

Il D.lgs. 22/97, che costituisce la norma nazionale di riferimento per la gestione dei rifiuti, in attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio, definisce, all'art. 6, comma 1, lett. q) il **compost da rifiuti**, come "*prodotto ottenuto dal compostaggio della frazione organica dei rifiuti urbani nel rispetto di apposite norme tecniche finalizzate a definire contenuti e usi compatibili con la tutela ambientale e sanitaria, e in particolare a definirne i gradi di qualità*".

Il compostaggio rientra tra le operazioni di recupero previste dall'allegato C del citato decreto legislativo e, in particolare, tra quelle contraddistinte dal codice **R3** "*Riciclo/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi (comprese le operazioni di compostaggio e altre trasformazioni biologiche)*". Tale operazione e la realizzazione degli impianti di recupero sono sottoposte ad autorizzazione.

Il sistema autorizzativo

L'articolo 27, comma 1 del D.lgs. 22/97 prevede che "i soggetti che intendono realizzare nuovi impianti di smaltimento o di recupero di rifiuti, anche pericolosi, devono presentare apposita domanda alla Regione competente per territorio allegando il progetto definitivo dell'impianto e la documentazione tecnica prevista per la realizzazione del progetto stesso, dalle disposizioni in materia di urbanistica, di tutela ambientale, di salute e sicurezza sul lavoro e di igiene pubblica". Tali disposizioni, secondo quanto stabilito al comma 8 del citato articolo 27, si applicano anche per la realizzazione di varianti sostanziali in corso di esercizio, che comportano modifiche a seguito delle quali gli impianti non sono più conformi all'autorizzazione rilasciata.

L'autorizzazione all'esercizio delle operazioni di smaltimento e recupero è disciplinata dalle disposizioni dell'articolo 28 che stabilisce, al comma 1, che "l'esercizio delle operazioni di smaltimento e recupero dei rifiuti è autorizzato dalla Regione competente per territorio entro novanta giorni dalla presentazione della relativa istanza da parte dell'interessato".

L'autorizzazione individua, inoltre, le condizioni operative e le prescrizioni tecniche necessarie per garantire l'attuazione dei principi di cui all'articolo 2 del medesimo decreto, ed in particolare:

- i tipi ed i quantitativi di rifiuti da smaltire o da recuperare;
- i requisiti tecnici, con particolare riferimento alla compatibilità del sito, alle attrezzature utilizzate, ai tipi ed ai quantitativi massimi di rifiuti, ed alla conformità dell'impianto al progetto approvato;
- le precauzioni da prendere in materia di sicurezza ed igiene ambientale;
- il luogo di smaltimento;
- il metodo di trattamento e di recupero;
- i limiti di emissione in atmosfera per i processi termici di trattamento dei rifiuti;
- le garanzie finanziarie;
- l'idoneità del soggetto richiedente l'autorizzazione.

L'autorizzazione ha una validità di cinque anni ed è rinnovabile, previa presentazione, entro 180 giorni dalla scadenza della stessa, di un'apposita domanda alla Regione competente.

I soggetti sottoposti al regime autorizzativo ordinario ai sensi degli artt. 27 e 28 sono, altresì tenuti ai seguenti adempimenti:

I soggetti sottoposti alle autorizzazioni ordinarie ai sensi degli artt. 27 e 28 del D.lgs. 22/97 sono altresì tenuti ai seguenti adempimenti:

- ai sensi dell'art. 15, la copia di propria pertinenza del formulario di identificazione dei rifiuti, deve essere datata e controfirmata, anche ai fini dello scarico delle responsabilità a carico del produttore;
- tenuta del registro di carico e scarico dei rifiuti, ai sensi dell'art. 12, con le modalità previste dal D.M. 1° aprile 1998, n. 148 e dalla Circolare ministeriale 4 agosto 1998, n. 812. Al registro deve essere allegata la copia del formulario;
- entro il 30 aprile di ogni anno, il gestore dell'impianto di recupero è tenuto alla presentazione del MUD (modello unico di dichiarazione) presso la CCIAA del capoluogo di Regione dove ha sede l'unità operativa, secondo quanto previsto dal DPCM 31 marzo 1999.

La procedura semplificata

In attuazione dell'art. 11, paragrafo 1, lett. b) della direttiva 91/156/CEE, l'articolo 31 del D.lgs. 22/97 stabilisce, entro 180 giorni dall'emanazione dello stesso, l'adozione di norme tecniche che fissino, per ciascun tipo di attività, i tipi e le quantità di rifiuti e le condizioni in base alle quali le attività di recupero di cui all'allegato C, sono sottoposte alle procedure semplificate ai sensi dell'art. 33. Le procedure semplificate devono comunque garantire un elevato livello di protezione del-

l'ambiente; a tal fine, le norme tecniche fissate in base a tali disposizioni, devono garantire che i tipi, le quantità e i metodi di recupero siano tali da non costituire un pericolo per l'uomo e per l'ambiente.

L'articolo 33 prevede procedure amministrative semplificate per l'esercizio delle operazioni di recupero e di messa in riserva, nel caso siano rispettate le norme tecniche e le prescrizioni adottate ai sensi del citato art. 33, commi 1, 2 e 3. In base a quanto detto, le operazioni di recupero possono essere intraprese, decorsi novanta giorni dalla comunicazione di inizio attività, alla Provincia territorialmente competente. Alla comunicazione deve essere allegata una relazione dalla quale devono risultare:

- il rispetto delle norme tecniche e delle condizioni di cui al comma 1;
- il possesso dei requisiti soggettivi richiesti;
- le attività di recupero che si intendono svolgere;
- lo stabilimento, la capacità di recupero e il ciclo di trattamento o di combustione;
- le caratteristiche dei prodotti derivanti dai cicli di recupero.

La Provincia, decorsi novanta giorni dalla presentazione della domanda, iscrive l'impresa in un apposito registro. Per la tenuta di tale registro e per l'effettuazione dei controlli periodici, l'interessato è tenuto a versare alla Provincia un diritto di iscrizione annuale, determinato in base alle modalità previste dal D.M. 21 luglio 1998, n. 350. Il gestore dell'impianto è, inoltre, tenuto ai seguenti obblighi:

- ai sensi dell'art. 15, la copia di propria pertinenza del formulario di identificazione dei rifiuti, deve essere datata e controfirmata, anche ai fini dello scarico delle responsabilità a carico del produttore;
- tenuta del registro di carico e scarico dei rifiuti, ai sensi dell'art. 12, con le modalità previste dal D.M. 1° aprile 1998, n. 148 e dalla Circolare ministeriale 4 agosto 1998, n. 812. Al registro deve essere allegata la copia del formulario;
- entro il 30 aprile di ogni anno, il gestore dell'impianto di recupero è tenuto alla presentazione del MUD (modello unico di dichiarazione) presso la CCIAA del capoluogo di Regione dove ha sede l'unità operativa, secondo quanto previsto dal DPCM 31 marzo 1999.

Le norme tecniche per il recupero e la messa in riserva dei rifiuti non pericolosi

Il **decreto ministeriale 5 febbraio 1998** individua i rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero, ai sensi degli artt. 31 e 33 del D.lgs. 22/97 e successive modifiche e integrazioni.

Il decreto, che prevede, fra i principi generali di cui all'art. 1, che *"le attività, i procedimenti e i metodi di recupero di ogni singola tipologia di rifiuto, devono rispettare le norme vigenti in materia di tutela della salute dell'uomo e dell'ambiente"*, stabilisce che le procedure semplificate si applicano esclusivamente alle operazioni di recupero specificate e ai rifiuti individuati dai rispettivi codici CER e descritti negli allegati.

Nelle prescrizioni generali sono previste norme specifiche per la **messa in riserva** dei rifiuti individuati negli allegati che, secondo quanto previsto all'art. 6, deve essere condotta in modo che i rifiuti siano stoccati separatamente dalle materie prime eventualmente presenti nell'impianto e, qualora avvenga in cumuli, questi devono essere posti su basamenti pavimentati o, se richiesto dalle caratteristiche del rifiuto, su basamenti impermeabili tali da evitare che i rifiuti vengano a contatto col suolo sottostante. La quantità di rifiuti messi in riserva, per un periodo non superiore ad un anno, non deve eccedere le quantità di rifiuti recuperabili nello stesso periodo; i rifiuti infiammabili o putrescibili, messi in riserva in impianti che effettuano esclusivamente le operazioni identificate dal codice R13, sono sottoposti alle procedure semplificate a condizione che il deposito non superi la quantità di 600 m³ e non si protragga per un periodo superiore ad un anno.

Le **quantità** massime annue di rifiuti impiegabili nelle attività di recupero, che devono essere indicate nella comunicazione di inizio attività, sono determinate dalla potenzialità annua dell'impianto in cui si effettua l'attività, al netto della materia prima eventualmente impiegata. La quantità massima annua dei rifiuti da impiegare nel recupero energetico è determinata in funzione del potere calorifico del rifiuto, della potenza termica dell'impianto, e del tempo di funzionamento stimato per ogni singolo impianto.

Sono inoltre previste disposizioni relative al **campionamento ed analisi**, ai fini della caratterizzazione dei rifiuti, che devono essere effettuati, secondo le modalità definite dall'art. 8, almeno ad ogni inizio di attività, successivamente ogni due anni e, comunque, ogni volta che intervengano delle modifiche sostanziali nel processo di recupero.

Il **test di cessione**, ove previsto, deve essere effettuato secondo la metodica riportata in allegato 3; i valori limite dei parametri dell'eluato devono essere conformi a quelli previsti nella tabella del citato allegato. Secondo quanto disposto dall'art. 9, il test di cessione, deve essere effettuato su un campione ottenuto nella stessa forma fisica prevista nelle condizioni d'uso finali, almeno ad ogni inizio di attività, successivamente, ogni 2 anni e, comunque, ogni volta che intervengono delle modifiche sostanziali nel processo di recupero.

Ai sensi dell'art. 33 del D.lgs. 22/97, l'applicazione delle procedure semplificate è altresì subordinata al possesso dei requisiti soggettivi, che sono puntualmente specificati all'art. 10 del D.M. 5/2/98.

Al capitolo 16 dell'allegato 1, suballegato 1 sono individuati i rifiuti non pericolosi che possono essere sottoposti alle operazioni di compostaggio in procedura semplificata, nel rispetto delle condizioni stabilite dal decreto e, in particolare:

- frazione organica dei rifiuti solidi urbani raccolta separatamente;
- rifiuti vegetali di coltivazioni agricole;
- segatura, trucioli, frammenti di legno, di sughero;
- rifiuti vegetali derivanti da attività agro-industriali;
- rifiuti tessili di origine vegetale;
- rifiuti tessili di origine animale;
- deiezioni animali da sole o in miscela con materiale di lettiera o frazioni della stessa ottenute attraverso processi di separazione;
- scarti di legno non impregnato;
- carta e cartone nelle forme usualmente commercializzate;
- fibra e fanghi di carta;
- contenuto dei prestomaci;
- rifiuti ligneo cellulósici derivanti dalla manutenzione del verde ornamentale; fanghi di depurazione, fanghi di depurazione delle industrie alimentari;
- ceneri di combustione di sanse esauste e di scarti vegetali.

Il processo di compostaggio avviene attraverso un processo di trasformazione biologica aerobica delle matrici che evolve per mezzo di uno stadio termofilo e porta alla stabilizzazione ed umificazione della sostanza organica. Il processo, che deve avere una durata non inferiore a 90 giorni, prevede, tra l'altro, che la fase di stoccaggio delle matrici e la fase di bio-stabilizzazione accelerata avvengano in ambiente confinato, ottenibile anche con coperture o paratie mobili, per il contenimento delle polveri e degli odori il cui controllo deve essere garantito mediante idonee misure e sistemi di abbattimento. Tali disposizioni non sono, tuttavia, obbligatorie per gli impianti che trattano unicamente i rifiuti provenienti dalla coltivazione e raccolta di prodotti agricoli, dalle attività forestali e di lavorazione del legno vergine, dalla fabbricazione di manufatti in legno non impregnato, imballaggi e legno non impregnato (cassette, pallets) e dalla manutenzione del verde ornamentale, che devono, comunque, assicurare il contenimento delle polveri durante l'eventuale fase di triturazione. Il compost ottenuto deve avere le caratteristiche indicate negli allegati alla legge 19 ottobre 1984, n. 748.

La nuova classificazione dei rifiuti: Decisione della Commissione 2000/532/CE e successive modifiche e integrazioni

Ai fini della corretta gestione ed identificazione dei rifiuti, occorre tener presente il nuovo "Elenco dei rifiuti" adottato con la decisione 2000/532/CE. La direttiva 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi, prevede, all'art. 1, paragrafo 4, che siano considerati *pericolosi* anche eventuali altri rifiuti che, a giudizio di uno Stato membro, presentino una o più delle caratteristiche elencate in allegato III alla medesima direttiva. Gli Stati membri notificano tali casi alla Commissione che li esamina conformemente alle procedure di cui all'art. 18 della direttiva 75/442/CEE e successive modifiche, ai fini dell'adeguamento dell'elenco. In attuazione a quanto sopra, gli Stati membri hanno presentato alla Commissione 540 notifiche relative ai rifiuti disciplinati dalle rispettive legislazioni nazionali che non figurano nella decisione 94/904/CE.

L'esame di 282 notifiche ha condotto alla decisione 2000/532/CE che è stata concepita allo scopo di unificare il catalogo europeo dei rifiuti (CER Decisione 94/3/CE) e l'elenco dei rifiuti pericolosi, con l'introduzione di alcune modifiche sostanziali.

La **classificazione dei rifiuti** si basa:

- per alcune tipologie di rifiuto, sulla provenienza (es. rifiuti provenienti dall'industria delle pelli)
- per altre tipologie di rifiuto, sulla funzione che rivestiva il prodotto (es. rifiuti di sostanze organiche utilizzate come solventi).

La **classificazione dei rifiuti pericolosi** si basa:

- sull'origine dei rifiuti
- sul contenuto di sostanze pericolose.

Il principio adottato è che qualsiasi sostanza pericolosa ai sensi della Direttiva 67/548/CEE e successive modifiche relative alla classificazione, all'imballaggio e all'etichettatura delle sostanze pericolose, debba essere considerata rifiuto pericoloso nel momento in cui diviene rifiuto. Lo stesso principio si applica anche ai preparati come definiti dalla Direttiva 88/379/CEE.

Ai fini della decisione 2000/532/CE, si intende, per:

- *sostanza pericolosa* – qualsiasi sostanza che è o sarà classificata come pericolosa ai sensi della direttiva 67/548/CEE e successive modifiche;
- *metallo pesante* – qualunque composto di antimonio, arsenico, cadmio, cromo^(VI), rame, piombo, mercurio, nichel, selenio, tellurio, tallio e stagno anche quando tali metalli siano in forme metalliche classificate come pericolose.

Relativamente alla classificazione, viene specificato che, se un rifiuto è identificato come pericoloso mediante riferimento, specifico o generico, a sostanze pericolose, esso è classificato come pericoloso, solo se le sostanze raggiungono determinate concentrazioni (ad esempio percentuale rispetto al peso), tali da conferire al rifiuto una o più delle proprietà di cui all'allegato III della Direttiva 91/689/CEE. Il criterio della concentrazione limite si applica *esclusivamente* nei casi in cui i rifiuti sono classificati in voci "speculari", una riferita al rifiuto pericoloso e una al rifiuto non pericoloso, in funzione del contenuto di sostanze pericolose.

La Decisione 2000/532/CE è stata successivamente modificata dalle decisioni 2001/118/CE, e 2001/119/CE della Commissione e, infine, dalla decisione 2001/573/CE del Consiglio, a seguito dell'approvazione delle restanti 258 notifiche esaminate dalla Commissione a partire dal gennaio 2000, tenendo anche conto dell'evoluzione nelle tecniche di gestione dei rifiuti. Nel nuovo elenco, che si applica dal 1° gennaio 2002, sono state ampliate le tipologie di rifiuti qualificabili

come pericolose, in relazione a quanto previsto dall'allegato III della Direttiva 91/689/CEE. Ai sensi dell'art. 2 della Decisione 2000/532/CE e successive modifiche e integrazioni, i rifiuti classificati come pericolosi, devono presentare una o più caratteristiche indicate in allegato III alla Direttiva 91/689/CEE e, in riferimento ai codici da H3 a H8 e ai codici H10 e H11 del medesimo allegato, una o più delle seguenti caratteristiche:

- punto di infiammabilità $\leq 55^{\circ}\text{C}$,
- una o più sostanze classificate come molto tossiche in concentrazione totale $\geq 0,1\%$,
- una o più sostanze classificate come tossiche in concentrazione totale $\geq 3\%$,
- una o più sostanze classificate come nocive in concentrazione totale $\geq 25\%$,
- una o più sostanze corrosive classificate come R35 in concentrazione totale $\geq 1\%$,
- una o più sostanze corrosive classificate come R34 in concentrazione totale $\geq 5\%$,
- una o più sostanze irritanti classificate come R41 in concentrazione totale $\geq 10\%$,
- una o più sostanze irritanti classificate come R36, R37, R38 in concentrazione totale $\geq 20\%$,
- una sostanza riconosciuta come cancerogena (categorie 1 e 2) in concentrazione totale $\geq 0,1\%$,
- una sostanza riconosciuta come cancerogena (categoria 3) in concentrazione totale $\geq 1\%$,
- una sostanza riconosciuta come tossica per il ciclo riproduttivo (categorie 1 o 2) classificata come R60 o R61 in concentrazione totale $\geq 0,5\%$,
- una sostanza riconosciuta come tossica per il ciclo riproduttivo (categoria 3) classificate come R62 o R63 in concentrazione totale $\geq 5\%$,
- una sostanza mutagena della categoria 1 o 2 classificate come R46 in concentrazione totale $\geq 0,1\%$,
- una sostanza mutagena della categoria 3 classificata come R40 in concentrazione totale $\geq 1\%$.

Relativamente alle caratteristiche H1, H2, H9, H12, H13 e H14, la decisione non prevede, al momento, alcuna specifica.

Per la classificazione dei rifiuti, la decisione fa esplicito riferimento alla classificazione delle sostanze pericolose, pertanto, al fine di non dover modificare ripetutamente l'elenco dei rifiuti pericolosi, si è previsto un meccanismo automatico, secondo il quale, ogni volta che verrà classificata una nuova sostanza pericolosa ai sensi della direttiva 67/548/CEE, se la stessa è presente in un rifiuto caratterizzato da una voce "speculare", questo, sarà classificato pericoloso, qualora la concentrazione della sostanza stessa raggiunga i limiti previsti dall'art. 2 della decisione 2000/532/CE e successive modifiche.

Occorre, inoltre, evidenziare, che l'articolo 3 della citata decisione 2000/532/CE, prevede, che gli Stati membri, **in casi eccezionali**, possano stabilire, sulla base di specifici riscontri documentati dai detentori dei rifiuti, che un determinato rifiuto classificato come "pericoloso" non presenta nessuna delle caratteristiche di pericolosità di cui all'allegato III della direttiva 91/689/CEE. Allo stesso modo, sempre in casi eccezionali, uno Stato membro può decidere che un rifiuto classificato come "non pericoloso", presenta almeno una delle caratteristiche di pericolosità di cui all'allegato III della citata direttiva 91/689/CEE. Tali casi, vengono notificati alla Commissione che li esamina e valuta l'opportunità di effettuare una modifica dell'elenco dei rifiuti.

Per quanto riguarda la caratterizzazione dei rifiuti, la Decisione 2001/118/CE e le successive integrazioni, introduce nuove categorie (capitoli), che consentono di codificare più dettagliatamente i rifiuti che, precedentemente, non era possibile classificare se non con i codici generici "aa bb 99".

La decisione identifica i singoli rifiuti inclusi nell'elenco, mediante un codice a sei cifre ed i rispettivi capitoli, mediante codici a quattro e due cifre, e fornisce, specifiche indicazioni che il detentore dei rifiuti deve seguire per l'attribuzione dei codici a sei cifre:

- identificare la fonte che genera il rifiuto consultando i capitoli da 01 a 12 o da 17 a 20 per risalire al codice a sei cifre, ad eccezione dei codici che terminano con le cifre 99. Al riguardo, è opportuno evidenziare che un determinato impianto o stabilimento deve classificare i propri rifiuti riferendosi a capitoli diversi in funzione delle varie fasi di produzione. Nel caso specifico dei *rifiuti di imballaggio oggetto di raccolta differenziata* (comprese le combinazioni di diversi materiali di imballaggio), la decisione stabilisce che gli stessi vanno classificati alla voce **15 01** – “imballaggi” (compresi i rifiuti urbani di imballaggio oggetto di raccolta differenziata), e non alla voce 20 01 – “frazioni oggetto di raccolta differenziata”;
- nel caso in cui nessuno dei codici dei capitoli da 01 a 12 o da 17 a 20 si presti per la classificazione di un determinato rifiuto, occorre esaminare i capitoli 13, 14 e 15;
- nel caso in cui nessuno di questi codici risulti adeguato, occorre definire il rifiuto utilizzando i codici di cui al capitolo 16;
- se un determinato rifiuto non è classificabile neppure mediante i codici del capitolo 16, occorre utilizzare il codice “99” (rifiuti non specificati altrimenti), preceduto dalle cifre del capitolo che corrisponde all'attività identificata con le modalità sopra specificate.

Tale procedura si pone l'obiettivo di ridurre l'utilizzo di codici generici dei rifiuti del tipo “aa bb 99” al fine di migliorarne l'individuazione e classificazione. In *Tabella 1.1* è riportato l'elenco dei rifiuti compostabili per la produzione di compost di qualità con i corrispondenti codici CER previsti dal DM 5 febbraio 1998 ed i nuovi codici dell'Elenco rifiuti individuati dalla Decisione 2000/532/CE e successive modifiche.

Tabella 1.1 - Rifiuti comportabili per la produzione di compost di qualità.

Tipologia	Codice CER	Codice Elenco rifiuti Decisione 2000/532/CE e successive modifiche
a) Frazione organica dei rifiuti solidi urbani raccolta separatamente	[200108]	[200108]
	[200302]	[200302]
b) Rifiuti vegetali di coltivazioni agricole	[020103]	[020103]
c) Segatura, trucioli, frammenti di legno, di sughero	[030102]	[030105]
	[030101]	[030101]
	[030103]	[030105]
	[030301]	[030301]
d) Rifiuti vegetali derivanti da attività agro-industriali	[020304]	[020304]
	[020501]	[020501]
	[020701]	[020701]
	[020702]	[020702]
	[020704]	[020704]
e) Rifiuti tessili di origine vegetale: cascami e scarti di cotone, cascami e scarti di lino, cascami e scarti di iuta, cascami e scarti di canapa	[040201]	[040221]
	[040202]	[040221]
f) Rifiuti tessili di origine animale cascami e scarti di lana, cascami e scarti di seta	[040202]	[040221]

segue Tabella 1.1

Tipologia	Codice CER	Codice Elenco rifiuti Decisione 2000/532/CE e successive modifiche
g) Deiezioni animali da sole o in miscela con materiale di lettiera o frazioni della stessa ottenute attraverso processi di separazione	[020106]	[020106]
h) Scarti di legno non impregnato	[150103] [200107] [030101] [030199]	[150103] [200138] [030101] [030199]
i) Carta e cartone nelle forme usualmente commercializzate	[200101] [150101]	[200101] [150101]
j) Fibra e fanghi di carta	[030306] [030310]	[030309] [030311]
k) Contenuto dei prestomaci	[020102]	[020102]
l) Rifiuti ligneo cellulosici derivanti dalla manutenzione del verde ornamentale	[200201]	[200101]
m) Fanghi di depurazione, fanghi di depurazione delle industrie alimentari	[190804] [190814] [190805] [020201] [020204] [020301] [020305] [020403] [020502] [020603] [020705] [030302] [040107] [190605]	[190812] [190805] [020201] [020204] [020301] [020305] [020403] [020502] [020603] [020705] [030302] [040107] [190602] [190606]
n) Ceneri di combustione di sanse esauste e di scarti vegetali con le caratteristiche di cui al punto 18.11	[100101] [100115] [100103] [100102] [100103]	[100101] [100102] [100117] [100103] [100117]

In merito alla normativa specifica in materia di compostaggio possono essere, altresì, citate alcune norme regionali quali la deliberazione della Giunta Regionale del Veneto del 10 marzo 2000, n. 766, relativa alle "Norme tecniche per la realizzazione e la conduzione degli impianti di recupero e di trattamento delle frazioni organiche dei rifiuti urbani ed altre matrici organiche mediante compostaggio, biostabilizzazione e digestione anaerobica" e le linee guida della Regione Lombardia relative alla costruzione ed all'esercizio degli impianti di compostaggio (DGR del 17 luglio 1999, n. 44263)

La normativa in materia di emissioni maleodoranti

Il rilascio di emissioni maleodoranti costituisce, senz'altro, uno dei punti più critici per una stazione di compostaggio e rappresenta uno degli elementi di maggior rilevanza nelle fasi di realizzazione e gestione della stessa.

La normativa italiana, pur stabilendo alcuni principi fondamentali finalizzati alla prevenzione delle molestie olfattive (localizzazione di determinate tipologie di impianti, indicazioni inerenti all'utilizzo delle migliori tecniche disponibili), non prevede limiti alle emissioni di sostanze osmogene, né metodi e parametri di misurazione.

Per quanto riguarda la localizzazione degli impianti, alcuni criteri per la limitazione, fra le altre cose, dell'impatto degli odori sulla popolazione, sono previsti dal RD 27 luglio 1934, n.1265, al Capo III, articoli 216 e 217, e successivi decreti attuativi tra cui, in particolar modo, il DM 5 settembre 1994 recante *"Elenco delle industrie insalubri di cui all'articolo 216 del Testo Unico delle leggi sanitarie"*.

In materia di qualità dell'aria, la normativa di riferimento è rappresentata, principalmente, dal DPR 24 maggio 1988, n.203 che disciplina:

- "a) tutti gli impianti che possono dar luogo ad emissione nell'atmosfera;*
- b) le caratteristiche merceologiche dei combustibili ed il loro impiego;*
- c) i valori limite ed i valori guida per gli inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno ed i relativi metodi di campionamento, analisi e valutazione;*
- d) i limiti delle emissioni inquinanti ed i relativi metodi di campionamento, analisi e valutazione."*

Il DPR 203/88 prevede l'ottenimento di una autorizzazione da parte degli impianti responsabili di emissioni in atmosfera e attribuisce alle Regioni la competenza di formulare, tra le altre cose, i piani di rilevamento, prevenzione, conservazione e risanamento del proprio territorio e di fissare i valori limite di qualità dell'aria e delle emissioni di impianti (sulla base della migliore tecnologia disponibile) tenendo conto, ove disponibili, dei valori limite, e dei valori e linee guida fissati dallo Stato. Successivi decreti di attuazione, tra i quali si cita in particolar modo il DM 12 luglio 1990 hanno fissato, per alcune tipologie di impianti, linee guida per il contenimento delle emissioni, per la determinazione dei valori limite, e per i metodi di campionamento, analisi e valutazione delle emissioni di alcune sostanze. Essi, tuttavia, non hanno affrontato lo specifico problema delle emissioni degli odori.

Anche il D.lgs 4 agosto 1999, n.372 di attuazione della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento pone quale condizione per l'ottenimento dell'autorizzazione da parte delle installazioni che rientrano nel campo di applicazione della norma il ricorso alle migliori tecnologie disponibili finalizzate alla prevenzione dell'inquinamento.

Alcuni riferimenti relativi alle emissioni sono individuabili tra le finalità del D.lgs 22/97, riportate all'articolo 2, in cui è previsto che i rifiuti vengano *recuperati o smaltiti senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente e, in particolare:*

- a) senza determinare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo e per la fauna e la flora;*
- b) senza causare inconvenienti da rumori o odori;*
- c) senza danneggiare il paesaggio e i siti di particolare interesse, tutelati in base alla normativa vigente.*

A livello regionale prescrizioni volte ad identificare i sistemi di trattamento dell'aria sono contenute nella deliberazione della Giunta Regionale del Veneto del 10 marzo 2000, n. 766 e nelle linee guida della Regione Lombardia relative alla costruzione ed all'esercizio degli impianti di compostaggio (DGR del 17 luglio 1999, n. 44263), già precedentemente menzionate e nei criteri generali per la prevenzione dell'inquinamento atmosferico della Regione Emilia Romagna.

1.2 Il compostaggio come componente di un sistema integrato di gestione dei rifiuti

Agency/EPA), di fronte al problema della gestione di oltre 200 milioni di tonnellate di rifiuti urbani prodotti annualmente sul territorio federale, da anni promuove con convinzione il ricorso a soluzioni tecnologiche integrate, dal momento che ormai l'approccio unico di trattamento non consente di risolvere, in molte comunità, i problemi connessi con lo smaltimento dei rifiuti.

L'EPA, ai responsabili ai vari livelli dell'amministrazione coinvolti nello sviluppo dei piani di gestione dei rifiuti, propone una gerarchia di interventi (US-EPA, 1991). In prima battuta, devono essere messe in atto tutte le azioni possibili per la riduzione del flusso di rifiuti all'origine e della loro potenziale tossicità o problematicità di trattamento. Il raggiungimento di questo obiettivo è direttamente legato alle filiere di progettazione, fabbricazione, imballaggio e vendita dei prodotti. Può perciò essere perseguito con interventi combinati sia rivolti al settore produttivo, sia mirati all'educazione verso nuovi comportamenti da parte dei consumatori. Subito dopo, viene preso in considerazione il riciclaggio, di cui il compostaggio costituisce uno degli argomenti. L'incenerimento con recupero d'energia e la discarica compaiono, rispettivamente al penultimo ed all'ultimo livello della scala gerarchica. Entrambi questi metodi vengono ritenuti opzioni di trattamento perseguibili auspicabilmente soltanto per lo smaltimento di quei materiali che non possono né essere ridotti in quantità, né essere riusati direttamente o riciclati sotto altre spoglie (es. compostati).

Un sistema territoriale di gestione dei rifiuti basato sull'integrazione dei trattamenti diversificati dei differenti flussi di materiali, non solo consente di ottimizzare i singoli processi abbattendone i costi, ma permette soprattutto di risparmiare sugli oneri aggiuntivi altrimenti derivanti, nel medio-lungo termine, dagli interventi di contenimento dei danni ambientali (es. bonifica dei siti di discarica).

Il compostaggio, che consiste nel processo controllato di trasformazione microbica di matrici organiche putrescibili in un materiale finale, ricco di humus, utilizzabile come ammendante, rientra, a pieno titolo, tra gli strumenti disponibili in sede di pianificazione della gestione dei rifiuti di una determinata comunità. Non certo, si badi bene, per sostituirsi in termini esclusivi ad altre forme di trattamento, ma con la finalità di implementarne sinergicamente l'efficienza.

1.3 Perché il compostaggio è importante?

Come accennato, con il compostaggio è possibile stornare una cospicua quantità di rifiuti altrimenti destinati alle discariche ed agli inceneritori. Questo sistema è un indispensabile complemento alle tradizionali forme di riciclaggio. Tuttavia, il compostaggio non consiste in una mera riduzione di volume ovvero in un semplice schema di diversione di una parte dei rifiuti; esso rappresenta piuttosto una via per chiudere il cerchio del riciclaggio dei residui organici, con ricadute ambientali di notevole rilievo. Il compostaggio infatti consente di recuperare sostanza organica per reintegrarla nei terreni, prevenendo i fenomeni di erosione, incrementando la fertilità biologica dei suoli e contribuendo al ripristino dei siti contaminati da composti tossici. Se ai piani di riciclaggio differenziato di materiali da rifiuti urbani, oltre ai tradizionali flussi della carta, del vetro, dei metalli e delle plastiche, viene aggiunto il riciclaggio della frazione putrescibile non è irrealistico arrivare a livelli di recupero del 60-70% sull'intero quantitativo di partenza.

Tornando al contesto statunitense, in un recente studio condotto dall'EPA (US-EPA, 1999), nel quale vengono prese in considerazione diverse strategie di recupero dei rifiuti organici, è stato evidenziato come, sfruttando al meglio gli esistenti flussi di riciclaggio dei residui compostabili in quel Paese, ben 62 milioni di tonnellate di organico (oltre il 30% dell'intero quantità di rifiuti urbani prodotti) potrebbero essere stabilizzate mediante compostaggio, con un risparmio medio sui costi tradizionali di smaltimento in discarica dell'ordine di 9-37 dollari/t. È importante notare che questo tipo di valutazione viene condotto in un contesto nel quale, nonostante tutto, la mancanza di spazi

non costituisce di per sé il fattore limitante all'insediamento di nuove discariche. Se ci spostiamo, invece, in Italia, la riduzione del flusso di rifiuti destinato all'interramento rappresenta una necessità cogente proprio a causa di un territorio ristretto, dove sempre più problematica diventa la localizzazione di una nuova discarica.

Una volta individuato il ruolo chiave che al compostaggio viene attribuito, è necessario affrontare una contraddizione che, se non chiarita, rischia di gravare pesantemente sulla possibilità di sviluppo ed applicazione di questa filiera.

Se diamo uno sguardo a quanto accaduto, negli ultimi venti anni, sul fronte del compostaggio come metodo di gestione dei rifiuti, è possibile accorgersi che questo sistema ha annoverato, presso impianti distribuiti in tutto il mondo, il maggior numero di fallimenti rispetto ad altre tecnologie di trattamento (UNEP-IETC, 1996).

I principali problemi chiamati in causa per la fallimentare riuscita del compostaggio vanno dagli alti costi di funzionamento e gestione degli impianti agli elevati oneri di trasporto, dalla cattiva qualità del prodotto ottenuto imputabile, soprattutto, all'inefficiente fase di preselezione del flusso di rifiuti alla scarsa conoscenza del processo, alla difficoltà, infine, di un mercato certo per il compost.

Queste motivazioni tra loro diverse e, in alcuni casi, contrastanti rischiano di far perdere di vista le ragioni centrali che, di volta in volta, possono determinare il fallimento ovvero la buona riuscita del compostaggio.

Se è vero che molte iniziative riguardanti il compostaggio sono fallite per motivi economici e tecnici, è altrettanto evidente che questi insuccessi hanno avuto tutti in comune l'incapacità di ben interpretare il ruolo del compostaggio come parte in un sistema più generale di gestione dei rifiuti. Ciò è valso, in generale, sia per le iniziative messe in essere nei Paesi dell'occidente industrializzato, sia nei Paesi in via di sviluppo.

Nella maggior parte dei Paesi dell'Europa, il dualismo "ideologico" tra incenerimento e riciclaggio ha fatto perdere di vista, per molti anni, la necessità di concepire un nuovo modello di gestione dei rifiuti basato sull'integrazione dei sistemi di smaltimento. Così, sono sorti grandi impianti di compostaggio pianificati per ricevere il rifiuto indifferenziato, con la convinzione che la complicata e costosa fase preliminare di selezione meccanica, potesse garantire il recupero di sostanza organica compatibile con il processo e l'ottenimento di un compost con caratteristiche tali da renderlo utilizzabile. Come è noto, le discariche hanno continuato per anni a ricevere un compost di pessima qualità, contaminato da un'alta frazione di inerti e da livelli preoccupanti di metalli pesanti, per il quale non poteva crearsi, oggettivamente, alcun mercato. D'altra parte, nei Paesi in via di sviluppo, la realizzazione di strutture impiantistiche a tecnologia complessa per il compostaggio dei rifiuti non sempre ha reso compatibili quei cicli tecnologici con le reali possibilità dei Paesi destinatari degli interventi. Terminata la fase di avviamento degli impianti, il fallimento si è, immancabilmente, verificato sia per i limiti intrinseci al modello di trattamento massivo del rifiuto, allo stesso modo di quanto avvenuto nei Paesi industrializzati, sia per carenza di preparazione specifica da parte dei gestori locali.

Alla luce di quanto sopra riportato, l'insuccesso di numerose iniziative riguardanti il compostaggio è stato quindi chiaramente determinato dalla errata interpretazione della filiera come metodo esclusivo di gestione dei rifiuti, in contrapposizione netta ad altre opzioni. È da questo fraintendimento che sono sorte le difficoltà tecniche alle quali è da imputare, fino ad un recente passato, il naufragio di molti progetti di compostaggio.

A questo punto, è facile comprendere come l'insuccesso tecnologico del compostaggio è stato, in primo luogo, causato dal fallimento dei tentativi di separare le diverse frazioni del rifiuto, a valle della raccolta, mediante sistemi di selezione meccanica e non tanto dall'insufficiente controllo del processo biologico, che pure ha avuto una sua parte. È ancora una questione aperta se esista un sistema meccanico che possa adeguatamente discernere e separare tutte le tipologie di materiali che concorrono alla formazione del rifiuto urbano, tuttavia nessun sistema di questo tipo è in grado oggi di assicurare elevate caratteristiche qualitative al compost prodotto.

A fronte del fallimento degli impianti di compostaggio alimentati con il rifiuto indifferenziato, sempre più lunga è invece la lista dei successi ottenuti dall'applicazione di filiere di compostaggio basate sul trattamento dei residui organici separati alla fonte. Più semplice risulta, in questi casi, la gestione del processo ed il prodotto ottenuto presenta caratteristiche che lo rendono appetibile dal mercato. In questo nuovo contesto, al compostaggio vengono avviati soltanto quei materiali compatibili con il trattamento biologico, lasciando aperte altre filiere per la corretta gestione delle frazioni non compostabili dei rifiuti urbani.

Riassumendo, dalle esperienze fin qui guadagnate a livello internazionale, possiamo trarre le indicazioni di seguito riportate.

a) La matrice destinata al compostaggio deve essere costituita da materiali compostabili per consentire la produzione di un compost che abbia un mercato.

- Sistemi sia di piccola che di larga scala possono funzionare bene soltanto con flussi di rifiuti a netta prevalenza di materiali organici compostabili.
- In tutti i casi in cui il compostaggio rientra nella strategia complessiva di gestione dei rifiuti, è necessario che si parta da un'accurata analisi del flusso di rifiuti, predisponendo, laddove richiesto, sistemi di separazione e raccolta differenziata alla fonte.

b) I sistemi di preselezione meccanica dei rifiuti indifferenziati non funzionano e, comunque, non consentono di ottenere compost di elevata qualità.

- Una leggera fase di preselezione può ancora risultare compatibile con flussi omogenei che possiedano già un elevato contenuto di materiali compostabili.

c) La sostenibilità economica del compostaggio dipende da tre fattori; il fallimento di uno soltanto dei tre può determinare l'insuccesso del sistema:

- Il costo del compostaggio deve essere, nelle diverse situazioni locali, se non competitivo, quantomeno comparabile rispetto ai costi di smaltimento di incenerimento e discarica.
- Il flusso di rifiuti in entrata all'impianto di compostaggio deve avere caratteristiche qualitative che non impediscano l'impiego del compost ottenuto.
- Deve esistere un potenziale bacino di utenza del prodotto finito, ai livelli di qualità ottenibili con la filiera tecnologica adottata.

d) La affidabilità tecnica di un sistema di compostaggio dipende, anch'essa, da tre fattori:

- L'impianto deve presentare uno schema di trattamento quanto più semplice possibile in relazione alle caratteristiche del flusso di rifiuti in entrata.
- La dimensione dell'impianto deve essere non eccessivamente grande. In generale, più complesso è il flusso di rifiuti in entrata, più piccola dovrebbe essere la taglia della stazione di compostaggio per garantire un migliore gestione del processo.
- L'intera filiera, dalla raccolta e separazione dei rifiuti, dal condizionamento alla preparazione della matrice da avviare alla biostabilizzazione fino al controllo del processo, deve essere disegnata per rendere ottimale le reazioni di trasformazione biologica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

UNEP-IECT (1996). *International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Municipal Solid Waste Management.* United Nations Environment Programme (UNEP) - International Environmental Technology Centre (IETC), Geneva.

US-EPA (1991). *EPA's Challenge for the 90s.* Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.

US-EPA (1999). *Organic Materials Management Strategies.* Office of Solid Waste and Emergency Response, Document EPA530-R-99-016, Washington, DC.

2. Il processo di compostaggio

2.1 Definizione di compostaggio

Il *compostaggio* consiste nella stabilizzazione biologica in fase solida di scarti, residui e rifiuti organici fermentescibili, in condizioni aerobiche (presenza di ossigeno molecolare) tali da garantire alla matrice in trasformazione il passaggio spontaneo attraverso una fase di autoriscaldamento, dovuto alle reazioni microbiche. Il processo trasforma il substrato di partenza in un prodotto stabile, simile all'*humus*, chiamato *compost*. Si tratta, essenzialmente, dello stesso processo di trasformazione che in natura ricorre spesso in diversi contesti quali, per esempio, la lettiera dei terreni forestali ovvero i cumuli di letame in maturazione, con la differenza che, nelle applicazioni tecnologiche, esso viene opportunamente incrementato ed accelerato.

Nell'ambito delle biotecnologie ambientali, il compostaggio, senza aggettivazione alcuna, sta quindi ad indicare il processo bioossidativo aerobico, esotermico (basato su reazioni che generano calore), promosso dai microorganismi (*biomassa attiva*) di norma naturalmente

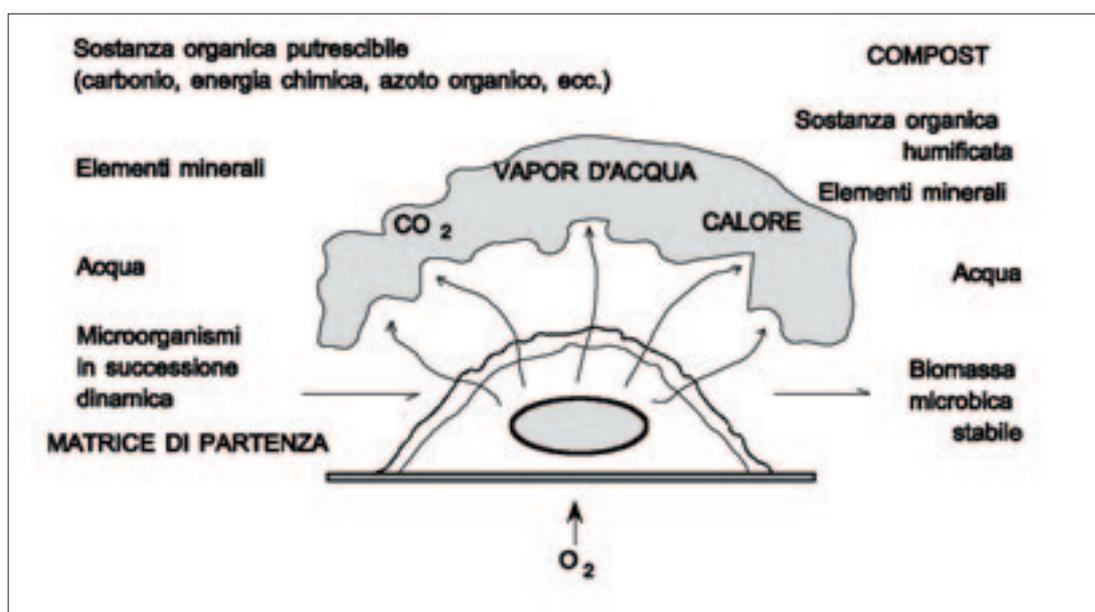


Figura 2.1 - Rappresentazione schematica del processo di compostaggio.

associati alle matrici sottoposte al trattamento, in conseguenza del quale il substrato organico eterogeneo di partenza (*biomassa substrato*) subisce, in tempi ragionevolmente brevi (alcune settimane), profonde trasformazioni nelle caratteristiche fisico-chimiche e biologiche (maturazione), con perdita della putrescibilità (stabilizzazione), parallelamente ad una parziale mineralizzazione e humificazione (VALLINI, 1995a) (Figura 2.1).

Il termine *compostaggio anaerobico*, quantunque usato talvolta nel lessico tecnico per indicare la stabilizzazione di matrici organiche in condizioni metanogeniche, è in realtà da ritenersi un inesatto e fuorviante sinonimo di digestione anaerobica.

2.2 Dinamica del processo

Durante il processo di compostaggio, i microorganismi degradano, in maniera più o meno spinta, il substrato organico di partenza, producendo anidride carbonica, acqua, calore e sostanza organica humificata, vale a dire una matrice finale *metastabile*, non suscettibile cioè di ulteriori repentine trasformazioni biologiche. In condizioni ottimali, il compostaggio si svolge attraverso tre stadi principali: (1) la *fase mesofila di latenza* - che può protrarsi da poche ore ad alcuni giorni - durante la quale, la matrice iniziale viene invasa dai microorganismi, il cui metabolismo finisce per causare il progressivo riscaldamento del substrato; (2) la *fase termofila o di stabilizzazione* - di durata variabile da alcuni giorni a diverse settimane - nel corso della quale si ha un'intensa attività bioossidativa; (3) la *fase di raffreddamento o maturazione* - di durata da poche settimane ad alcuni mesi - nella quale intervengono le reazioni di humificazione.

Da un punto di vista gestionale, l'intero processo di biostabilizzazione viene però, di solito, suddiviso in due archi temporali distinti: il periodo di attiva trasformazione (*active composting*), comprendente, sostanzialmente la fase mesofila di latenza (1) e la fase termofila di stabilizzazione (2); ed il periodo di finissaggio (*curing*), corrispondente alla fase di raffreddamento e di maturazione mesofila (3) (USDA-NRCS, 2000).

In coincidenza con i vari stadi del compostaggio, si affermano e predominano differenti popolazioni di microorganismi. L'iniziale decomposizione del substrato è dovuta all'intervento di specie microbiche mesofile che utilizzano rapidamente i composti solubili e facilmente degradabili. Il calore prodotto dalle reazioni esoergoniche di questi microorganismi rimane intrappolato nella matrice in trasformazione a causa della scarsa conducibilità di quest'ultima. A seguito del progressivo accumulo di calore, la temperatura del substrato comincia a salire, superando ben presto la soglia della termofilia. Come la temperatura si porta sopra i 40 °C, i microorganismi mesofili divengono meno competitivi e sono perciò progressivamente sostituiti da specie termofile, alcune delle quali risultano capaci non solo di resistere ma anche di svolgere le normali attività metaboliche a temperature > 70 °C (es. batteri del genere *Thermus*). Raggiunta o superata la soglia dei 55 °C, un gran numero di microorganismi, ivi comprese le specie patogene per l'uomo e per le piante, è disattivato (DE BERTOLDI *et al.*, 1983).

Dal momento che temperature al di sopra dei 65 °C uccidono la maggior parte dei microbi, riducendo così il tasso di decomposizione del substrato, nelle applicazioni biotecnologiche del compostaggio è opportuno governare il processo affinché non venga superata questa soglia ovvero la deriva termica sia ristretta ad un lasso di tempo il più limitato possibile (FINSTEIN *et al.*, 1983).

Durante lo stadio termofilo, le alte temperature accelerano la degradazione di proteine, grassi e carboidrati complessi quali cellulosa ed emicellulosa, che rappresentano due tra i più importanti polimeri strutturali delle piante. Man mano che la disponibilità dei composti ricchi di energia comincia ad esaurirsi, la temperatura della matrice in trasformazione gradualmente decresce, consentendo alle popolazioni microbiche mesofile responsabili dei processi di humificazione di colonizzare il substrato per quella che è stata precedentemente definita la fase di maturazione o finissaggio (DE BERTOLDI *et al.*, 1985).

Quando lo stadio di affinamento giunge a compimento, il prodotto ormai maturo può essere definito compost.

2.3 L'ecosistema microbico alla base del processo

Un'ampia rassegna di popolazioni microbiche partecipa al compostaggio. I diversi gruppi di microorganismi si sviluppano di volta in volta in risposta ai differenti livelli di umidità, temperatura, ossigeno e pH all'interno della matrice in trasformazione. È proprio grazie a questa diversità microbica che il processo di compostaggio può procedere nonostante il mutare continuo delle condizioni ambientali e trofiche del substrato. I microorganismi responsabili del compostaggio degradano una vasta gamma di composti, da sostanze semplici come zuccheri e aminoacidi a polimeri complessi come proteine, polisaccaridi e lignina. Ciò porta ad una profonda disgregazione e trasformazione della matrice di partenza. Gli intervalli di temperatura e la disponibilità di sostanze nutritive giocano il ruolo principale nel determinare il gruppo o, addirittura, le specie di microorganismi che caratterizzano la popolazione microbica in ogni particolare momento del processo.

Come già accennato, le reazioni degradative procedono rapidamente durante le battute iniziali del compostaggio a causa della larga disponibilità di composti facilmente assimilabili. Questi composti sono caratterizzati da basso peso molecolare e semplice struttura chimica; sono solubili in acqua e sono in grado quindi di passare senza difficoltà attraverso le pareti e le membrane microbiche. Ciò comporta il fatto che tali sostanze possono essere utilizzate da un ampio spettro di microorganismi non specializzati (DE BERTOLDI *et al.*, 1982).

Man mano che i composti facilmente metabolizzabili vanno incontro a progressivo esaurimento, divenendo meno disponibili, altre sostanze più complesse, meno degradabili cominciano ad essere oggetto di attacco da parte dei microorganismi. Queste sostanze presentano un elevato peso molecolare, hanno struttura polimerica (es. cellulosa) o polidispersa (es. lignina) e non possono essere traslocate direttamente all'interno delle cellule microbiche. Tali sostanze devono perciò essere scomposte nei costituenti monomerici ovvero in strutture comunque più piccole delle molecole iniziali, attraverso l'azione di enzimi esocellulari. Non tutti i microorganismi associati alle matrici in compostaggio sono però dotati di adeguato bagaglio enzimatico per la degradazione delle sostanze polimeriche complesse. Di solito, questa capacità è più diffusa nell'ambito delle specie fungine rispetto alle specie batteriche. Dopo che, ad opera dei microorganismi specializzati, i polimeri sono stati idrolizzati nei costituenti più piccoli, questi stessi frammenti si rendono disponibili anche per specie microbiche non specializzate.

I microorganismi che colonizzano le matrici sottoposte a compostaggio sono riconducibili, in termini tipologici e non sistematici, a tre principali gruppi: *batteri*, *attinomiceti* e *funghi*. Batteri ed attinomiceti sono organismi procarioti. In realtà, gli attinomiceti rappresentano una particolare suddivisione di batteri, seppure caratterizzati spesso da crescita di tipo filamentoso dovuta alla formazione di pseudo-micelio. I funghi sono invece microorganismi eucarioti e comprendono, oltre alle cosiddette muffe (eumiceti filamentosi) anche i lieviti.

Con l'eccezione dei funghi filamentosi che sono sostanzialmente aerobi, i microorganismi che intervengono nel compostaggio, nonostante il prevalente carattere ossidativo del processo, possono essere aerobi, anaerobi facoltativi o anaerobi stretti. Questi ultimi crescono solo in totale assenza di ossigeno molecolare, il quale risulta per essi estremamente tossico. I microorganismi aerobi, per vivere, necessitano invece di una adeguata tensione di ossigeno. Gli anaerobi facoltativi, infine, usano l'ossigeno se disponibile ma possono vivere anche in assenza di questo gas.

I microorganismi che ricorrono nei substrati in corso di compostaggio possono essere poi distinti in *psicrotrofi* o *psicrofili facoltativi*, *mesofili* e *termofili* a seconda dell'intervallo di temperatura entro il quale possono svilupparsi ovvero trovare le condizioni ottimali di crescita. In particolare, le specie psicrotrofe sono in grado di crescere con una certa efficienza anche al di sotto dei 10 °C. L'intervallo di crescita dei mesofili è invece compreso tra 15 e 45 °C, mentre i termofili prosperano intorno ai 55-65 °C, con alcune specie capaci di vivere oltre i 70 °C.

2.3.1 I batteri

Con dimensioni mediamente comprese tra 2-3 mm in lunghezza e 0,5-1,5 mm in larghezza, i batteri rappresentano i più piccoli organismi degradatori e costituiscono la comunità microbica più numerosa di una matrice in compostaggio. Essi rappresentano, in numero, l'80-90 % dei miliardi di cellule microbiche associate ad un grammo di substrato in trasformazione o di compost maturo.

I batteri sono i principali responsabili della generazione di calore durante il compostaggio. Presentano inoltre il più ampio spettro di profili nutrizionali rispetto a qualsiasi altro gruppo microbico coinvolto nel processo di stabilizzazione aerobica della sostanza organica, disponendo di una variegata dotazione di enzimi necessari per la degradazione di numerosi composti.

I batteri sono, di norma, decompositori veloci, in grado di utilizzare rapidamente le sostanze più facilmente degradabili nonché i prodotti intermedi del metabolismo fungino. Alcune specie batteriche riescono a degradare la cellulosa (es. batteri striscianti appartenenti all'ordine delle *Cytophagales*). È possibile riscontrare la crescita di gruppi specializzati di batteri a qualsiasi valore di pH, anche se l'intervallo di pH ottimale per la maggior parte di questi microorganismi si colloca tra 6,5 e 8. I batteri sono, di contro, estremamente poco tolleranti, rispetto ad attinomiceti e funghi, nei confronti di condizioni di scarsa umidità.

Dopo una massiva colonizzazione del substrato da parte di specie batteriche mesofile, in concomitanza degli stadi iniziali del processo, con l'avvento della fase termofila, la popolazione batterica tende ad essere dominata da rappresentanti del genere *Bacillus*. La diversità dei bacilli è piuttosto ampia fino a temperature intorno ai 50-55 °C, ma crolla drasticamente come vengono superati i 60 °C. In queste condizioni ormai sfavorevoli, i bacilli sopravvivono formando endospore, le quali, oltre che resistere al calore, sono in grado di superare lunghi periodi di mancanza di nutrienti e di disidratazione del substrato. Una volta ripristinate le condizioni compatibili con la crescita, questi batteri riprendono a svilupparsi. La capacità a formare strutture di resistenza, propria di un certo numero di specie batteriche, consente a queste ultime di partecipare, senza evidente soluzione di continuità, alla prosecuzione del processo di compostaggio una volta che la fase di raffreddamento della matrice segua lo stadio di termofilia.

2.3.2 Gli attinomiceti

Sono i microorganismi responsabili del caratteristico "profumo di terra" che si sprigiona dal compost maturo. Come accennato in precedenza, ad una prima osservazione possono somigliare ai funghi a causa della formazione di pseudo-ife, di lunghezza fino a 10-15 mm e larghezza compresa tra 0,5 e 2 mm. Ciò nonostante, sia per la tipologia delle strutture cellulari esterne (parete) sia per l'organizzazione intracellulare (mancanza di un nucleo definito) sono da considerarsi, a tutti gli effetti, batteri.

Gli attinomiceti giocano nell'ambito del compostaggio un ruolo importante nella degradazione di sostanze organiche complesse come proteine, emicellulose, cellulosa, chitina e lignina. Alcune specie compaiono durante la fase termofila, mentre altre si sviluppano massivamente nello stadio di progressivo raffreddamento, contribuendo alla formazione di sostanze umiche ed alla completa maturazione del substrato. Spesso gli attinomiceti formano una inconfondibile trama di filamenti che si diffonde come ragnatela di colore grigio pallido attraverso il substrato in compostaggio.

2.3.3 I funghi

semplici) e, perciò, nell'ambito del compostaggio, rivestono un ruolo del tutto marginale, i funghi, in generale, sono responsabili della degradazione di molti tra i polimeri complessi di origine vegetale quali cere, emicellulose, cellulosa, pectina e lignina. Nell'economia complessiva del processo di compostaggio, i funghi operano quindi un'azione fondamentale decomponendo sostanze altrimenti resistenti all'attacco microbico, in modo tale da rendere disponibili metaboliti intermedi ai batteri che provvedono così all'ulteriore trasformazione degli stessi.

Le muffe o funghi filamentosi invadono il substrato in compostaggio mediante una capillare diffusione di vigorosi filamenti, di solito, sinciziali (ife multinucleate), del diametro variabile tra 2 e 10 mm. Prediligono un ambiente tendenzialmente acido, sono meno sensibili alla disidratazione rispetto ai batteri ed attaccano residui organici che per basso contenuto di azoto non sono utilizzati da quest'ultimi.

Poiché i funghi sono in maggior parte, aerobi obbligati, le muffe presentano in genere, una più limitata tolleranza alle condizioni di scarsa ossigenazione rispetto ai batteri. Inoltre, i funghi attivi durante il compostaggio sono, in massima parte, saprofiti, sviluppandosi su materiali organici morti dai quali traggono energia e nutrimento. Numerose sono le specie fungine che ricorrono sia nelle fasi mesofile che nello stadio termofilo del processo.

2.3.4 I protozoi e la macrofauna

Una volta raggiunta la biostabilizzazione del substrato di partenza, vale a dire il superamento dello stadio di compostaggio attivo, i protozoi ed una variegata macrofauna cominciano a colonizzare la matrice organica. I protozoi sono organismi unicellulari che, insieme agli organismi più complessi quali rotiferi, acari, insetti, molluschi ed altri invertebrati, crescono a spese della microflora vivente (batteri e funghi), sulle spoglie di questa ovvero sui materiali organici in decomposizione. Questa comunità contribuisce al processo di definitiva maturazione ed humificazione del substrato sottoposto a compostaggio, incrementando le caratteristiche finali del compost ottenuto, ivi comprese le qualità soppressive nei confronti di determinati funghi fitopatogeni radicicoli.

Nell'ambito della macrofauna, i vermi terricoli quali *Eisenia foetida*, *Lumbricus rubellus* e *Lumbricus terrestris*, sono gli organismi che, probabilmente, esercitano il ruolo positivo più importante. Se non introdotti deliberatamente nella matrice in compostaggio, questi organismi non compaiono fintantoché il processo di stabilizzazione non sia in stadio avanzato. Tuttavia, alcune specie di vermi possono essere immesse nel substrato organico non ancora stabilizzato. Questo deliberato apporto e conseguente allevamento di vermi nella matrice da trattare, al fine di ottenerne la stabilizzazione, è noto con il termine di *vermicompostaggio*. È importante comunque sottolineare che le condizioni compatibili con la vermicoltura, quale forma di trattamento di rifiuti organici in scala industriale, sono ristrette a casi particolari (es. stabilizzazione di certe deiezioni animali o di particolari fanghi biologici) nei quali, a parte la possibilità di mantenere i vermi in attiva crescita all'interno della massa organica in trasformazione, il fattore tempo e la disponibilità di spazio non costituiscano elementi limitanti.

2.4 Fattori che influenzano il processo e controllo delle reazioni

Una serie di fattori fisico-chimici ed edafici (cioè attinenti alle specifiche caratteristiche del substrato) condiziona l'andamento delle reazioni biologiche che realizzano il compostaggio. Dal grado più o meno spinto con il quale vengono governati questi fattori dipende la corretta evoluzione verso la definitiva stabilizzazione del substrato sottoposto a trattamento, sia in termini di durata del processo che di qualità del prodotto finale (FINSTEIN *et al.*, 1986; VALLINI, 1995b).

I fattori che vanno presi in considerazione per una rigorosa gestione del processo sono: (1) la concentrazione di ossigeno e l'aerazione; (2) la temperatura; (3) l'umidità; (4) le proprietà fisico-meccaniche del substrato (porosità, struttura, tessitura e dimensione delle particelle o pezzatura della matrice in trasformazione); (5) la concentrazione ed il rapporto dei nutrienti nella biomassa substrato (es. rapporto C:N); e (6) il pH, anche se in misura più modesta.

2.4.1 La concentrazione di ossigeno e l'aerazione

Il compostaggio consuma notevoli quantità di ossigeno. Come già accennato, durante i primi giorni del processo, le componenti più facilmente degradabili della biomassa substrato sono rapidamente metabolizzate. Il bisogno di ossigeno e, di conseguenza, la produzione di calore sono perciò decisamente maggiori nei primi stadi della biostabilizzazione, mentre decrescono con l'evolversi del processo. Nel caso in cui l'apporto di ossigeno sia limitato, il compostaggio rallenta. Anche se una concentrazione minima di ossigeno del 5% nell'atmosfera circolante tra le particelle della biomassa substrato può consentire il compostaggio, per la gestione ottimale del processo, dovrebbero essere garantite, nella matrice, concentrazioni di O₂ non inferiori al 10%.

Senza una sufficiente ossigenazione, la biomassa substrato diviene anossica e la microflora microbica anaerobica prende il sopravvento, portando all'accumulo di composti ridotti (es. acidi grassi volatili, idrogeno solforato, mercaptani, ecc.), caratterizzati da odore decisamente aggressivo e da elevata fitotossicità. Sebbene alcuni dei suddetti composti intermedi, come gli acidi organici, si formino anche in condizioni aerobiche, questi però sono rapidamente degradati quando l'ossigeno è disponibile. Il mantenimento di un ambiente ossidativo all'interno della matrice organica in corso di stabilizzazione è quindi importante anche per impedire il formarsi di emissioni maleodoranti associate, appunto, con le reazioni di decomposizione anaerobica.

L'aerazione del materiale in compostaggio, per garantire l'apporto di ossigeno necessario al processo, rende inoltre possibili la dissipazione del calore, l'eliminazione del vapor d'acqua e l'allontanamento di altri gas intrappolati nell'atmosfera interna del substrato. In effetti, il tasso di aerazione richiesto per la rimozione del calore può essere anche dieci volte maggiore di quello necessario per l'apporto di ossigeno. Di conseguenza, è la temperatura che normalmente determina l'estensione e la frequenza degli interventi di aerazione.

2.4.2 La temperatura

Di solito, nel caso di matrici putrescibili, la fase di compostaggio attivo si svolge a temperature comprese tra 45 e 70 °C. In speciali applicazioni del compostaggio, non finalizzate alla produzione di ammendante organico, bensì alla detossificazione di rifiuti organici tossici di origine industriale (es. melme di raffineria), il processo si svolge invece, data la natura del substrato, tutto nell'ambito della mesofilia (10-45 °C) (*compostaggio mesofilo o freddo*).

Le temperature termofile sono importanti per la distruzione degli eventuali organismi patogeni associati alla biomassa substrato di partenza. Il limite largamente fissato per la disattivazione dei patogeni umani è 55 °C. Questa temperatura è in grado di abbattere anche la maggior parte degli organismi fitopatogeni, mentre, per i semi delle erbe infestanti, sono necessarie temperature non inferiori a 60 °C.

Si è già detto che la decomposizione microbica durante il compostaggio rilascia una grande quantità di energia sotto forma di calore. Le proprietà auto-coibentanti dei materiali avviati al compostaggio favoriscono l'accumulo di calore, il quale, a sua volta, provoca l'innalzamento della temperatura. Allo stesso tempo, la biomassa in trasformazione perde continuamente calore grazie alla evaporazione dell'acqua ed ai movimenti d'aria che rimuovono il

vapore acqueo ed i gas caldi (es. CO₂) dal substrato. Tutti i sistemi di aerazione accelerano la perdita del calore e, quindi, sono usati per mantenere la temperatura nell'intervallo compatibile con l'attività metabolica dei microorganismi. È importante ribadire che, nei casi di scarsa dissipazione dell'eccesso di calore generato dalle reazioni ossidative esotermiche, la temperatura può raggiungere e oltrepassare i 70 °C. A questo punto la quasi totalità dei microorganismi soccombe o diventa dormiente ed il processo si arresta, per riprendere solo quando la popolazione microbica avrà invaso di nuovo il substrato. Ad evitare questa situazione, giova un puntuale monitoraggio della temperatura e l'attivazione, quando questa si avvicina ai 60 °C, di sistemi, come il rivoltamento o la ventilazione forzata, che accelerino la rimozione del calore. Nel caso in cui si verifichi una pressoché totale autosterilizzazione della matrice in compostaggio, il rapido recupero del processo può ottenersi miscelando al substrato materiale microbiologicamente attivo dello stesso tipo, proveniente da altri cumuli o reattori.

2.4.3 L'umidità

L'umidità è necessaria affinché i processi metabolici microbici possano attuarsi. La fase acquosa è il mezzo nel quale avvengono le reazioni chimiche, la diffusione ed il trasporto dei nutrienti, i movimenti e la migrazione dei microorganismi. In teoria, l'attività biologica trova le condizioni ottimali in un ambiente saturo. Di contro, essa cessa completamente al di sotto del 15% di umidità. In pratica, tuttavia, i materiali avviati al compostaggio dovrebbero avere un contenuto di umidità compreso in un intervallo tra il 55% ed il 65%. Numerose esperienze hanno dimostrato che, approssimandosi l'umidità della matrice organica al 40%, il processo di compostaggio comincia ad essere inibito. Al di sotto del 30-35%, l'attività microbica procede a stento ovvero molto lentamente. In condizioni di umidità > 65%, invece, l'acqua espelle l'aria dalla maggior parte degli spazi interstiziali tra le particelle della matrice organica. Ciò ostacola la diffusione dell'ossigeno e può favorire l'insorgenza di condizioni microaerofile o, addirittura, anossiche.

Poiché l'umidità del substrato diminuisce col procedere del compostaggio, il contenuto in acqua del materiale di partenza dovrebbe essere ben più alto del 55%. Matrici organiche troppo secche per essere avviate direttamente al compostaggio dovranno essere bagnate con acqua o potranno essere mescolate con substrati più umidi, in modo da raggiungere, nelle miscele di partenza, contenuti di acqua compresi tra il 60 ed il 63%. Materiali molto porosi possono essere avviati al compostaggio anche in eccesso di umidità, contrariamente ai substrati con struttura compatta e particelle di piccole dimensioni.

Per tutto il corso del compostaggio, compresa la fase di finissaggio, l'umidità deve mantenersi al di sopra dei limiti compatibili con l'evoluzione delle reazioni biologiche. L'eccessiva disidratazione del substrato nel corso del processo può portare, erroneamente, ad interpretare il declino dell'attività microbica come segno di avvenuta stabilizzazione. Il materiale così ottenuto sarà invece stabilizzato solo dal punto di vista fisico (disidratato). Se nuovamente umidificato, questo, in realtà, riprenderà ad evolversi biologicamente, con grave danno per le colture cui, eventualmente, sia stato somministrato.

2.4.4 La concentrazione ed il rapporto dei nutrienti

Carbonio (C), azoto (N), fosforo (P) e potassio (K) sono gli elementi nutritivi principali richiesti dai microorganismi coinvolti nel processo di compostaggio. Azoto, fosforo e potassio sono inoltre i principali nutrienti delle piante e, per questo, la loro concentrazione finisce per influenzare anche il valore agronomico del compost. La maggior parte delle matrici organiche destinabili al compostaggio, inclusi i residui delle colture e gli scarti verdi dei mercati orto-

frutticoli, contiene ampiamente i principali nutrienti. È però soprattutto la quantità di carbonio e di azoto della biomassa substrato che ne può influenzare la stabilizzazione mediante il compostaggio. In generale, i microorganismi utilizzano, per le reazioni energetiche e la crescita, una quantità di carbonio circa venti volte superiore a quella di azoto. Ne consegue che è importante la disponibilità di C ed N in appropriate proporzioni. La quantità di carbonio riferita a quella di azoto si indica comunemente come rapporto C/N. Le matrici organiche da avviare al compostaggio dovrebbero avere un rapporto C/N compreso tra 20:1 e 30:1 per garantire un andamento ottimale del processo. In taluni casi, tuttavia, risultati accettabili possono ottenersi con materiali di partenza aventi rapporto C/N fino a 40:1. Con rapporti C/N inferiori a 20:1, il carbonio disponibile è completamente utilizzato senza che, di contro, sia stato stabilizzato tutto l'azoto presente. L'eccesso di azoto può allora essere perduto in atmosfera sotto forma di ammoniacca, causando fastidiose emissioni maleodoranti, o di ossido nitroso. D'altra parte, substrati di partenza con rapporto C/N superiore a 40:1 richiedono tempi di compostaggio lunghi, dovuti alla più lenta crescita microbica in presenza di matrice carboniosa in eccesso.

Sebbene il rapporto C/N rappresenti un'utile guida per la preparazione delle miscele di residui organici da avviare al compostaggio, anche il grado di suscettibilità dei composti carboniosi all'attacco microbico deve essere tenuto in debito conto. Così, ad esempio, la paglia, a prevalente composizione cellulosa, si degrada e rende disponibile il carbonio per i microorganismi più facilmente dei sarmenti di patata, nei quali, invece, la cellulosa è diffusamente incrostata da lignina e legata ad altri composti organici (es. resine, tannini, ecc.), recalcitranti alla degradazione biologica. Se il carbonio del substrato è in forma scarsamente degradabile, il processo di compostaggio risulta necessariamente rallentato. Poiché, inoltre, la decomposizione procede centripetamente dalla superficie delle particelle del substrato, riducendo la dimensione delle stesse (aumentando così l'area superficiale), il tasso di degradazione può eventualmente essere incrementato. Nel caso di matrici carboniose scarsamente degradabili, il rapporto C/N di partenza potrà essere aggiustato su valori più alti di quelli ottimali, tenendo comunque conto dell'inevitabile allungamento dei tempi necessari all'esaurimento del compostaggio.

2.4.5 Le proprietà fisico-meccaniche del substrato (porosità, struttura, tessitura e dimensione delle particelle)

La porosità, la struttura e la tessitura sono correlate con le proprietà fisiche dei materiali quali la pezzatura, la forma e la resistenza meccanica, e condizionano il processo di compostaggio attraverso l'influenza esercitata sull'aerazione. Queste proprietà possono essere corrette per mezzo di operazioni di triturazione e sminuzzamento dei substrati di partenza o mediante la miscelazione di questi con matrici definite *agenti di supporto* (*bulking agents*).

La porosità è una misura degli spazi vuoti nella biomassa in compostaggio e determina la resistenza alla circolazione dell'aria. Essa dipende dalla dimensione delle particelle, dalla distribuzione granulometrica dei materiali e dalla continuità degli interstizi tra le particelle. Ovviamente, particelle più grandi e più uniformi incrementano la porosità.

D'altra parte, la struttura indica la rigidità delle particelle, vale a dire la resistenza delle stesse a collassare e compattarsi e, pertanto, un buon grado di struttura previene la perdita di porosità del substrato umido, sistemato in quantità critica (in cumulo o in reattore) per il processo.

La tessitura è la caratteristica che descrive l'area superficiale del substrato disponibile per l'attività microbica aerobica. Come già accennato, nel corso del compostaggio, le reazioni di degradazione avvengono prevalentemente alla superficie delle particelle della matrice in trasformazione. Ciò perché l'ossigeno diffonde facilmente attraverso gli spazi vuoti delimitati

dalle particelle, ma molto più lentamente attraverso la fase liquida o i materiali solidi. Così, i microorganismi aerobi si concentrano nel sottile strato acquoso che contorna le particelle del substrato, utilizzando l'ossigeno all'interfaccia tra la fase liquida e la fase gassosa degli interstizi (Figura 2.2). Poiché l'estensione dell'area superficiale aumenta con la riduzione della pezzatura, il tasso di decomposizione aerobica si innalza in una matrice organica quanto più piccole sono le dimensioni delle particelle. Particelle troppo piccole però rischiano di compromettere la porosità ed è quindi necessario trovare una situazione di compromesso. Risultati soddisfacenti si ottengono normalmente quando il diametro medio delle particelle della matrice sottoposta a compostaggio oscilla tra 0,5 e 5 cm.

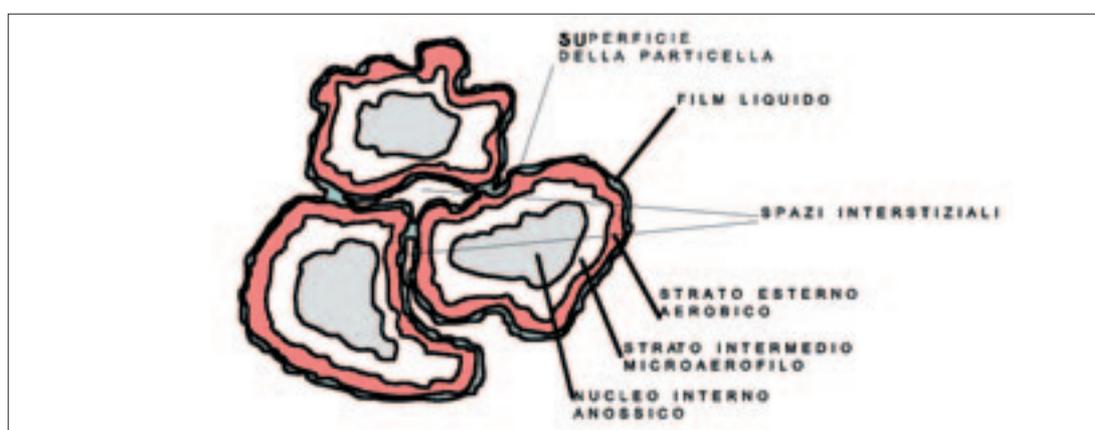


Figura 2.2 - Microcosmo costituito dalle particelle di una matrice organica sottoposta a compostaggio.

Per la maggior parte dei substrati e dei sistemi di compostaggio, possono aversi buoni livelli di porosità e struttura in condizioni di umidità della matrice non superiore al 65%. Tuttavia alcune situazioni richiedono una particolare attenzione. Ad esempio, metodi di compostaggio che non prevedano il rivoltamento della biomassa in trasformazione richiedono maggior struttura per resistere ai fenomeni di compattamento. In questi casi, sono maggiormente indicate particelle di più grandi dimensioni. Allo stesso modo, matrici che presentano problemi di odori dovrebbero essere mescolate con materiali di supporto rigidi in modo da ottenere miscele di partenza con elevata porosità che garantisca un continuo ricambio d'aria negli interstizi, evitando così la formazione di sacche di anaerobiosi nelle quali si ha sviluppo di prodotti volatili maleodoranti.

2.4.6 Il pH

Il compostaggio è relativamente poco sensibile al pH dei substrati di partenza; ciò in ragione dell'ampio spettro di microorganismi associati ai substrati stessi e coinvolti nelle reazioni di processo. I valori ottimali del pH cadono nell'intervallo tra 6,5 e 8, tuttavia la naturale capacità tampone del processo rende possibile l'impiego di substrati con pH compresi in un ben più ampio spettro. Il compostaggio, in effetti, può innescarsi anche in matrici tendenzialmente acide, con pH fino a 5,5, ovvero alcaline, con pH fino a 9.

Il pH comincia ad essere un parametro importante nei substrati che presentano un elevato contenuto di azoto (es. deiezioni zootecniche). Valori di pH > 8,5 facilitano, in questi casi, la conversione dei composti azotati in ammoniacca ad opera dei microorganismi ammonizzanti, con conseguenti sensibili perdite di azoto attraverso la volatilizzazione di NH_3 . Quest'ultima contribuisce all'impatto olfattivo sgradevole delle emissioni gassose e determina, inoltre,

nella matrice, un ulteriore aumento dell'alcalinità. In queste circostanze, si rende necessaria la miscelazione con matrici acidificanti come i residui vegetali freschi.

Nel materiale in corso di compostaggio i valori del pH cambiano col progredire del processo. Così, il rilascio di acidi organici può temporaneamente abbassare il pH nei primi stadi della biostabilizzazione. Durante la fase termofila, con l'intensificarsi del rilascio di ammonio (NH_4OH) nel mezzo ad opera della microflora ammonizzante, il pH subisce un sensibile aumento. Il pH torna nuovamente a scendere durante la fase di finissaggio, anche grazie all'attività dei batteri nitrificanti che trasformano, in sequenza, l'ammonio in acido nitroso e nitrico. Riassumendo, l'estensione del tempo necessario per trasformare in compost i substrati avviati alla biostabilizzazione aerobica dipende da molti fattori quali le caratteristiche della matrice organica di partenza, la temperatura, l'umidità e il tipo di aerazione. Un adeguato contenuto di umidità (60-65%), un corretto rapporto C/N (~ 25) ed una efficace aerazione della massa consentono di realizzare il compostaggio in tempi decisamente contenuti (poche settimane). Le condizioni che rallentano il processo di stabilizzazione sono invece, come già accennato precedentemente, la scarsa umidità del substrato, rapporti C/N della biomassa di partenza eccessivamente alti (> 40), basse temperature, una insufficiente aerazione, la pezzatura troppo grossolana delle particelle della matrice organica e la presenza significativa, in quest'ultima, di materiali refrattari all'attacco microbico.

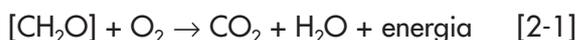
2.5 Aspetti metabolici delle reazioni microbiche a carico dei substrati sottoposti a compostaggio

2.5.1 Le possibili vie di trasformazione biochimica dei composti organici

Nel corso del compostaggio, i microorganismi degradano le diverse sostanze che compongono la matrice organica di partenza, al fine di ottenere energia per le reazioni cataboliche e materiale per le sintesi cellulari. Di pari passo, nel corso del processo, avvengono anche importanti biotrasformazioni, attraverso le quali alcuni composti intermedi derivanti dalla degradazione di materiali a struttura polimerica (es. cellulosa e lignina) sono utilizzati per la sintesi di nuove sostanze complesse, ma profondamente diverse da quelle iniziali (es. acidi humici).

Affinché i microorganismi possano sintetizzare nuovo materiale cellulare, deve rendersi disponibile sufficiente energia per i processi biosintetici. Le due possibili vie metaboliche per la produzione di energia a disposizione dei microorganismi eterotrofi sono la *respirazione* e la *fermentazione*.

La respirazione può essere *aerobica* o *anaerobica*. Nella respirazione aerobica, i microorganismi usano ossigeno molecolare (O_2) per liberare la maggior parte dell'energia dal substrato carbonioso, con formazione di anidride carbonica (CO_2) ed acqua (*reazione 2-1*).



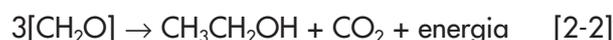
Questa conversione non avviene in un singolo stadio, bensì attraverso una serie di reazioni che servono non solo a liberare significative quantità di energia, ma anche per formare un vasto numero di prodotti organici intermedi che fungono da punto di partenza per numerose reazioni sintetiche.

Nell'ambito del compostaggio, la respirazione aerobica è più funzionale al processo, rispetto alla respirazione anaerobica ed alla fermentazione, in quanto risulta più efficiente, generando una maggiore quantità di energia. La respirazione inoltre può procedere a temperature più elevate e non produce quantità rilevanti di composti odorigeni indesiderati. Le specie

microbiche aerobiche sono, per altro, in grado di utilizzare una più ampia varietà di composti organici come fonte di energia, così da operare una più spinta degradazione e stabilizzazione dei substrati sottoposti a compostaggio.

D'altra parte, nella respirazione anaerobica, i microorganismi, per produrre energia, usano accettori finali di elettroni diversi dall' O_2 , quali nitrati (NO_3^-), solfati (SO_4^{2-}), carbonati (CO_3^{2-}) ed, in taluni casi, i composti ossidati di alcuni metalli (es. Mn^{4+} , Fe^{3+}) ovvero composti organici (es. fumarato, glicina). L'uso, da parte dei microorganismi, di taluni dei suddetti accettori di elettroni alternativi ha come conseguenza la produzione di sostanze odorigene, quali idrogeno solforato (H_2S), acidi grassi ed ammoniaci, causa di potenziali impatti olfattivi negativi.

La fermentazione, dal canto suo, rappresenta la via più semplice per la produzione di energia, non richiede ossigeno ma è scarsamente efficiente dal punto di vista energetico. La maggior parte del carbonio organico che fluisce attraverso le reazioni fermentative è infatti convertito in prodotti finali che ancora contengono una notevole quantità di energia (es. alcoli, acidi organici) (reazione 2-2).



Operativamente, non è del tutto possibile evitare reazioni fermentative durante il processo di compostaggio. Ciò a causa della difficoltà oggettiva di mantenere valori del potenziale di ossido-riduzione fortemente positivi (E_o' intorno a + 800 mV) nelle fasi iniziali della stabilizzazione, in coincidenza delle quali sia la concentrazione di composti organici facilmente assimilabili sia l'umidità del substrato risultano elevate. Tuttavia, in una efficiente gestione del processo, le reazioni fermentative dovranno essere contrastate quanto più possibile in modo da ridurre i rischi di maleodoranze e l'accumulo, nel prodotto finale, di metaboliti ridotti, tossici per le piante.

2.5.2 Le trasformazioni a carico dei composti azotati

Una considerazione del tutto particolare deve essere fatta per le reazioni metaboliche che, nelle condizioni tipiche del compostaggio, avvengono a carico delle frazioni organiche contenenti azoto.

Alcuni microorganismi sono capaci di idrolizzare sostanze azotate complesse come le proteine, ottenendo così composti più semplici quali peptoni, peptidi ed aminoacidi che possono essere più facilmente metabolizzati, da un maggior numero di specie microbiche. L'incorporazione dell'azoto in nuovo materiale cellulare avviene soltanto se è disponibile una sufficiente quantità di carbonio. In condizioni di scarsa disponibilità di substrato carbonioso, cioè in presenza di matrici organiche con rapporto C/N eccessivamente basso (< 15), la mineralizzazione dei composti organici contenenti azoto (*ammonificazione*) porta invece al rilascio finale di ammoniaca (NH_3), a seguito di deaminazione ossidativa degli aminoacidi (reazione 2-3).



L'ammoniaca prodotta può convertirsi in ioni ammonio (NH_4^+) a seconda del pH presente all'interno del substrato in trasformazione. Condizioni acide ($pH < 7$) promuovono la formazione di NH_4^+ , mentre valori elevati del pH (> 9) favoriscono la presenza di ammoniaca. Anche temperature elevate contribuiscono alla formazione di NH_3 , la quale, peraltro, presenta una estrema volatilità. Poiché la fase termofila del compostaggio è caratterizzata da innalzamento della temperatura e da valori di pH nell'ambito dell'alcalinità, essa rappresenta uno stadio critico sia per l'eventuale perdita di azoto attraverso la volatilizzazione dell'ammoniaca, sia per il rilascio di emissioni problematiche dal punto di vista olfattivo.

Un'altra trasformazione chimica che gioca un ruolo chiave nell'ambito del compostaggio è la *nitrificazione autotrofa*, processo attraverso il quale l'ammoniaca o gli ioni ammonio sono ossidati fino a nitrato. La nitrificazione è una reazione in due stadi. Nel primo di questi, l'azoto ammoniacale (N-NH_4^+) viene trasformato in nitrito (NO_2^-) grazie all'azione di un gruppo molto speciale di batteri chemolitotrofi, i batteri nitrosanti (es. *Nitrosomonas*), che si procurano energia attraverso la *reazione 2-4*. Il nitrito così prodotto viene quindi rapidamente convertito in nitrato (NO_3^-), a mezzo della *reazione 2-5*, per intervento di un altro gruppo di microorganismi autotrofi, i batteri nitricanti (es. *Nitrobacter*).



Esistono inoltre alcuni funghi e batteri eterotrofi che sono in grado di catalizzare la nitrificazione partendo direttamente dall'azoto ridotto dei composti organici, senza il passaggio intermedio attraverso l'ammonio. Si tratta di un meccanismo di nitrificazione molto simile a quello riscontrato nei suoli forestali, caratterizzati da pH acido. È, tuttavia, ancora controverso il reale contributo di questa *nitrificazione eterotrofa* nel bilancio complessivo dell'azoto durante il compostaggio.

Le reazioni di nitrificazione si manifestano nei substrati sottoposti alla biostabilizzazione aerobica a partire dall'esaurimento della fase termofila; quando la sostanza organica, prontamente disponibile, risulta pressoché esaurita, la temperatura comincia infatti a scendere sensibilmente e, con essa, anche i valori del pH e si instaurano, pertanto, le condizioni compatibili con l'attività dei batteri nitrificanti (nitrosanti + nitricanti). È, perciò, possibile affermare che la nitrificazione è una reazione tipicamente associata alla fase finale del processo di compostaggio, già definita come finissaggio mesofilo. Poiché il nitrito è tossico nei confronti delle piante, un adeguato periodo di post-maturazione del compost ottenuto serve anche a prevenire eventuali effetti negativi dovuti alla presenza di NO_2^- nella matrice stabilizzata.

Nelle condizioni operative compatibili con le esigenze di un corretto processo di compostaggio, il rifornimento di ossigeno al substrato organico in trasformazione dovrebbe essere senz'altro assicurato. Tuttavia, in talune condizioni particolari, quali il trattamento di matrici eccessivamente umide o di substrati scarsamente strutturati, con la tendenza, quindi, a compattarsi, possono crearsi all'interno del materiale organico in trasformazione nicchie scarsamente ossigenate, quando non, addirittura, completamente anossiche. In questi ambienti, il nitrato rimpiazza l'ossigeno molecolare come accettore finale di elettroni nelle reazioni di respirazione microbica. Si attua così la *denitrificazione*, definita anche *riduzione dissimilativa dei nitrati* (*reazione 2-6*).



Complessivamente, le maggiori perdite di azoto per denitrificazione sono, di solito, dovute alla emissione di ossido nitroso (N_2O) ed azoto molecolare (N_2). È evidente che la denitrificazione non è una reazione desiderata nel compostaggio e soltanto una appropriata aerazione della matrice in trasformazione può contrastare le perdite di nitrati dovute ai fenomeni di riduzione dissimilativa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

DE BERTOLDI M., VALLINI G., PERA A. (1982). Ecologia microbica del compostaggio. *Ann. Microbiol. Enzimol.*, 32, 121-135.

DE BERTOLDI M., VALLINI G., PERA A. (1983). Biology of composting: A review. *Waste Management & Research*, 1: 157-176.

DE BERTOLDI M., VALLINI G., PERA A. (1985). Technological aspects of composting including modelling and microbiology. In: *Composting of Agricultural and Other Wastes* (J.K.R. Gasser ed.), pp. 27-40, Elsevier Applied Science Publishers, London - New York.

FINSTEIN M.S., MILLER F.C., STROM P.F. (1986). Waste treatment composting as a controlled system. In: *Biotechnology* (H.J. Rehm and G. Reed eds), Vol. 8 (W. Schönborn ed.), pp. 362-398, VCH, Weinheim.

FINSTEIN M.S., MILLER F.C., STROM P.F., MACGREGOR S.T., PSARIANOS K.M. (1983). Composting ecosystem management for waste treatment. *Bio/Technology*, 1(4): 347-353.

USDA-NRCS (2000). Composting. Part 637 Environmental Engineering - National Engineering Handbook, Chapter 2, pp. 2-4, Washington D.C..

VALLINI G. (1995a). voce "Compost" (pp. 173-174). In: *Dizionario dell'Ambiente* (a cura di G. Gamba e G. Martignetti), ISEDI/Utet Libreria, Torino.

VALLINI G. (1995b). Il compostaggio. In: *La protezione dell'ambiente in Italia* (a cura di I. Bertini, R. Cipollini, P. Tundo), pp. 83-134, Società Chimica Italiana, Roma.

3. Scelta e preparazione delle matrici organiche da sottoporre a compostaggio

3.1 Requisiti generali del substrato di partenza

Uno dei presupposti fondamentali per attuare un efficiente programma di compostaggio è quello di partire da una corretta combinazione degli ingredienti che formano il substrato organico di partenza. In *Tabella 3.1* vengono presentati, in maniera sinottica, i valori ottimali relativi ad alcuni parametri raccomandati, anche a livello di caratteristiche del substrato di partenza, per favorire il processo di compostaggio. A questo riguardo, due parametri risultano di particolare importanza: il contenuto di umidità ed il rapporto C/N della matrice destinata al processo.

Come accennato in precedenza (*cf.* Cap 2, 2.4.3), l'umidità è essenziale per tutti gli organismi viventi. Peraltro, gli agenti causali del compostaggio, i microrganismi, mancando generalmente di sofisticati meccanismi di ritenzione dell'umidità, sono particolarmente sensibili alla disidratazione. Al di sotto di un contenuto in acqua del substrato compreso tra il 35 ed il 40%, le reazioni microbiche di degradazione e trasformazione sono fortemente limitate. Con valori dell'umidità inferiori al 30% si ha, in pratica, l'arresto di qualsiasi attività. D'altra parte, un'umidità eccessivamente elevata, magari associata ad una insufficiente aerazione del substrato, rappresenta la causa più comune cui imputare l'instaurarsi di condizioni anaerobiche e, di conseguenza, la formazione di emissioni maleodoranti, per non parlare dei problemi relativi alla qualità del prodotto finale.

Tabella 3.1 - Condizioni del substrato raccomandate per una buona gestione del processo di compostaggio e, di conseguenza, per la stabilizzazione della matrice di partenza in tempi rapidi.

Parametro	Intervallo di compatibilità	Intervallo ottimale ^(a)
Rapporto C/N	20:1 - 40:1	25:1 - 30:1
Umidità	45 - 65%	57 - 63%
Concentrazione di O ₂	≥ 5%	≥ 10%
Dimensione delle particelle (Ø cm)	0,5 - 5,0	variabile ^(b)
pH	5,5 - 9,0	6,5 - 8,5
Temperatura di processo (°C)	25 - 70	35 - 60
Densità apparente (kg/m ³)	≤ 750	≤ 650

^(a) Queste raccomandazioni sono riferite alle condizioni per un compostaggio rapido. Non è peraltro raro che, al di fuori di questi valori, si possa comunque attuare il processo con risultati soddisfacenti;

^(b) Dipende dallo specifico materiale di partenza impiegato, dalla dimensione delle particelle e/o dalle condizioni climatiche.

Il limite superiore per l'umidità delle matrici sottoposte a compostaggio dipende strettamente dalle caratteristiche fisico-meccaniche (pezzatura, porosità, struttura, tessitura) dei differenti materiali e dalla strategia di processo adottata. Nella maggior parte dei casi, è tuttavia consigliabile non superare il valore massimo del 60-63%, consapevoli che, con il progredire del processo, verificandosi durante il compostaggio la graduale disidratazione della matrice iniziale, le condizioni potenzialmente favorevoli all'insorgenza di anaerobiosi vanno man mano stemperandosi. Come analizzato in dettaglio precedentemente, altro requisito fondamentale per un materiale organico avviato alla stabilizzazione mediante compostaggio è il corretto rapporto tra carbonio ed azoto (C/N), vale a dire tra i due principali elementi nutrienti (*cf.* Cap. 2, 2.4.4). Quando l'azoto è troppo poco rispetto al carbonio disponibile per le biosintesi, le popolazioni microbiche hanno uno sviluppo limitato ed il processo procede lentamente. L'eccessiva concentrazione di azoto invece, pur stimolando una rapi-

da crescita dei microorganismi ed una intensa attività di degradazione, può creare seri problemi dovuti al rapido esaurimento dell'ossigeno che, a fronte di una aerazione inadeguata, provoca il rapido cambiamento delle condizioni da aerobiche ad anaerobiche, con il conseguente rilascio di odori sgradevoli. Inoltre, parte dell'azoto in eccesso viene inevitabilmente convertito in ammoniaca (cfr. Cap. 2, 2.5.1), contribuendo non solo ad aggravare il problema delle emissioni maleodoranti, ma anche ad accrescere le perdite di azoto per volatilizzazione, con riduzione di questo importante elemento di fertilità nel compost ottenuto.

Per la maggior parte delle matrici avviate al compostaggio, un rapporto C/N tra 25:1 e 30:1 (sulla base del peso) viene considerato adeguato per mantenere i due elementi nutrienti disponibili in forma bilanciata per i microorganismi.

3.2 Gli ingredienti della miscela iniziale

In *Appendice 1* sono riportate le caratteristiche di un ampio novero di residui organici utilizzabili come substrati per la stabilizzazione aerobica mediante compostaggio. Al di là delle specifiche proprietà delle numerose matrici considerate, valgono, in questa sede, alcune premesse generali circa la funzione che i diversi materiali possono giocare nell'ambito della messa a punto delle miscele di partenza.

Nella preparazione della matrice organica da avviare al compostaggio, vengono, di solito, considerate tre componenti: il substrato principale, l'eventuale correttivo o additivo per il bilanciamento dei parametri edafici (es. nutrienti, reazione, salinità) e l'agente di supporto (*bulking agent*). I materiali appropriati per la miscela iniziale vengono determinati sulla base delle caratteristiche del *substrato principale* da trattare. È considerato correttivo un qualsiasi materiale che, aggiunto in quantità modeste rispetto al substrato principale, serve ad integrare elementi nutrienti (soprattutto azoto) scarsi o addirittura assenti ovvero a condizionare la reazione (pH) della matrice organica. Per raggiungere i requisiti richiesti alla miscela iniziale, è possibile ricorrere a più di un additivo. L'agente di supporto è invece, normalmente, un materiale ligno-cellulosico, da moderatamente resistente a refrattario alla biodegradazione, la cui funzione principale è quella di fornire struttura e porosità alla miscela di partenza. Spesso l'agente di supporto assolve anche il compito di mitigare l'eccesso di umidità ovvero l'elevata concentrazione (quantità di sostanza organica prontamente degradabile/unità di peso) del substrato principale. In quest'ultimo caso l'agente di supporto funziona pure da correttivo. L'agente di supporto che, alla fine di un ciclo di compostaggio, risulta scarsamente degradato, può essere separato dal substrato stabilizzato mediante vagliatura ed essere riutilizzato per la preparazione di una nuova miscela.

Prima di passare alla analisi delle procedure di calcolo per la determinazione delle giuste quantità dei diversi ingredienti, è opportuno sottolineare come ciò possa risultare inadeguato al raggiungimento della corretta miscela per il compostaggio. Proprietà di non facile e precisa determinazione, quali la capacità di assorbimento, la degradabilità e la resistenza al compattamento dei materiali, potrebbero alterare le proporzioni di miscelazione richieste per l'ottimizzazione del processo di trasformazione della matrice iniziale. Così, una miscela con un equilibrato rapporto C/N ed un corretto contenuto di umidità potrebbe creare inconvenienti durante il compostaggio a causa del carbonio in forma non facilmente disponibile ovvero della porosità insufficiente. Dunque, l'applicazione delle formule di calcolo, pur costituendo un buon riferimento per la determinazione delle diverse miscele di partenza, non può prescindere da una specifica conoscenza del comportamento dei materiali considerati.

3.2.1 Preparazione della miscela iniziale con contenuto di umidità voluto

Nella preparazione della miscela di partenza da sottoporre a compostaggio, è necessario, prima di tutto, considerare il fattore più critico: l'umidità.

Una volta noti i contenuti in umidità dei singoli componenti che devono essere miscelati per ottenere il substrato iniziale, le quantità relative dei diversi materiali possono essere calcolate - fissata l'umidità desiderata - attraverso la formula generale seguente (equazione 3-1):

$$U_{mix} = \frac{(m_1 \times u_1) + (m_2 \times u_2) + \dots + (m_n \times u_n)}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad [3-1]$$

dove

U_{mix} = umidità da raggiungere nella miscela iniziale

m_n = peso del materiale n (tal quale)

u_n = contenuto di umidità (%) del materiale n

È possibile applicare l'equazione [3-1] direttamente, arrivando al valore di umidità prefissato mediante tentativi successivi con differenti combinazioni degli ingredienti. Quando si opera con due soli ingredienti, l'equazione generale può essere semplificata e risolta calcolando il peso del secondo materiale (m_2) necessario per bilanciare una data quantità del primo materiale (m_1) (equazione 3-2).

$$m_2 = \frac{(m_1 \times U_{mix}) - (m_1 \times u_1)}{u_2 - U_{mix}} \quad [3-2]$$

È da notare che l'obiettivo di umidità prefissato deve giocoforza ricadere nell'intervallo tra le umidità dei due ingredienti da miscelare. Nel caso in cui sia necessario condizionare l'umidità eccessivamente bassa di un determinato substrato m_1 mediante apporto di acqua, m_2 corrisponderà alla quantità di H_2O da aggiungere, il cui valore di umidità (u_2) verrà posto uguale al 100%.

Per miscele a tre o più componenti, la soluzione è raggiungibile con un procedimento analogo, sebbene sia richiesto un calcolo algebrico un po' più complicato. Devono essere tuttavia note le quantità di tutti gli ingredienti tranne uno. Così per trovare la quantità di un terzo materiale (m_3) da aggiungere a quantitativi noti del primo e del secondo ingrediente (m_1 e m_2) in modo da avere una miscela con umidità desiderata (U_{mix}), conoscendo i contenuti di umidità di tutti e tre i componenti (u_1 , u_2 e u_3), deve essere impostata la seguente equazione (equazione 3-3):

$$m_3 = \frac{(m_1 \times U_{mix}) + (m_2 \times U_{mix}) - (m_1 \times u_1) - (m_2 \times u_2)}{u_3 - U_{mix}} \quad [3-3]$$

3.2.2 Preparazione della miscela iniziale con rapporto C/N voluto

Una volta calcolato il corretto contenuto di umidità della miscela da avviarsi al compostaggio, l'altro importante calcolo da impostare è quello relativo al rapporto C/N. Per i valori riguardanti i contenuti di carbonio organico e di azoto totale di numerose matrici organiche destinabili al compostaggio si rimanda alla già citata *Appendice 1*, dalla quale è possibile anche desumere i rapporti C/N.

Avendo a disposizione i valori di C/N delle singole componenti, data l'esigenza di un determinato valore di C/N della miscela iniziale, è quindi possibile desumere le quantità necessarie dei diversi materiali applicando la formula seguente (equazione 3-4):

$$R_{mix} = \frac{m_1 [C_1 \times (100 - u_1)] + m_2 [C_2 \times (100 - u_2)] + \dots + m_n [C_n \times (100 - u_n)]}{m_1 [N_1 \times (100 - u_1)] + m_2 [N_2 \times (100 - u_2)] + \dots + m_n [N_n \times (100 - u_n)]} \quad [3-4]$$

dove

R_{mix} = rapporto C/N della miscela iniziale da sottoporre a compostaggio

m_n = peso del materiale n (tal quale)

u_n = contenuto di umidità (%) del materiale n

C_n = contenuto in carbonio (%) del materiale n

N_n = contenuto in azoto (%) del materiale n

Fissato un rapporto C/N come obiettivo, l'equazione [3-4], nel caso di una miscela di due soli ingredienti, può essere reimpostata per calcolare la quantità del secondo materiale (m_2) da aggiungersi ad una quantità nota del primo (m_1), a fronte dei contenuti di carbonio ed azoto e di umidità dei due componenti (equazione 3-5).

$$m_2 = \frac{m_1 \times N_1 \times (R_{mix} - C_1/N_1) \times (100 - u_1)}{N_2 \times (C_2/N_2 - R_{mix}) \times (100 - u_2)} \quad [3-5]$$

Come nel caso del calcolo dell'umidità, anche per una miscela a tre componenti esiste l'equazione per risalire facilmente al quantitativo (m_3) del terzo componente da aggiungere a quantità note dei primi due (m_1 e m_2), in modo da ottenere un valore predefinito del rapporto C/N nella miscela. Per la soluzione dell'equazione, è indispensabile inoltre che siano conosciuti i contenuti di carbonio, azoto ed umidità di ogni ingrediente (equazione 3-6).

$$m_3 = \frac{[R_{mix} \times m_1 \times N_1 \times (100 - u_1)] + [R_{mix} \times m_2 \times N_2 \times (100 - u_2)] - [m_1 \times C_1 \times (100 - u_1)] - [m_2 \times C_2 \times (100 - u_2)]}{[C_3 \times (100 - u_3)] - [R_{mix} \times N_3 \times (100 - u_3)]} \quad [3-6]$$

Il bilanciamento del rapporto C/N nelle miscele di residui organici da avviare a compostaggio deve tener conto necessariamente della biodisponibilità dei suddetti elementi. Un elevato contenuto della frazione costituita da lignina riduce in maniera sensibile la biodegradabilità della matrice carboniosa. Bisognerà perciò considerare questa situazione in modo da evitare l'aggiunta di azoto in eccesso rispetto alle reali capacità di utilizzazione bilanciata del substrato da parte dei microrganismi. Ciò significa che il rapporto C/N della miscela dovrà essere calcolato sulla base della quantità di carbonio realmente utilizzabile dalle popolazioni microbiche. Esiste una formula matematica che consente di correggere la biodisponibilità di un substrato organico sulla base del contenuto in lignina, applicando la seguente equazione (equazione 3-7):

$$BF = 0,83 - (0,028 \times L_{\%VS}) \quad [3-7]$$

dove

BF = frazione biodegradabile

$L_{\%}$ = lignina come % dei solidi totali (TS)

$VS_{\%}$ = solidi volatili come % dei TS

$$L_{\%VS} = \frac{L_{\%}}{VS_{\%}/100} = \text{contenuto di lignina come \% dei VS}$$

Questa relazione lineare, elaborata sulla base di osservazioni condotte su un ampio numero di materiali ligno-cellulosici sottoposti a digestione anaerobica (CHANDLER *et al.*, 1980), risulta sufficientemente affidabile per matrici a basso contenuto di lignina (4-5 %). Per la stima della biodegra-

dabilità di residui organici caratterizzati da elevate percentuali di lignina (es. paglia, carta da giornali) la seguente relazione logaritmica, detta di VAN SOEST (1994), consente invece di ottenere risultati più accurati (equazione 3-8):

$$BF_{EF} = 100 - 5.41(L_{\%EF})^{0.76} \quad [3-8]$$

dove

BF_{EF} = frazione biodegradabile della fibra estraibile (EF)

EF = fibra estraibile (*Neutral Detergent Fiber*), costituita approssimativamente dalla somma di cellulosa, emicellulosa e lignina

$L_{\%}$ = lignina come % dei solidi totali (TS)

$EF_{\%}$ = fibra estraibile come % dei TS

$$L_{\%EF} = \frac{L_{\%}}{EF_{\%}/100} = \text{contenuto di lignina come \% della fibra estraibile}$$

Applicando la formula [3-8] alla frazione totale di fibra estraibile è possibile calcolare il contenuto in carbonio disponibile del substrato oggetto di interesse (equazione 3-9):

$$C_{\text{biodegradabile}} = C_{\text{totale}} \left(\frac{EF_{\%}}{100} \right) [1 - 0,054 (L_{\%EF})^{0,76}] + C_{\text{totale}} \left(1 - \frac{EF_{\%}}{100} \right) \quad [3-9]$$

D'altra parte, è altresì richiesta la massima cautela nella formulazione delle miscele, qualora - nei casi in cui vengano avviati a compostaggio materiali organici ad elevato contenuto di carbonio biodisponibile (es. residui cellulosici di specie arboree a legno tenero) - il necessario condizionamento del rapporto C/N sia realizzato mediante l'aggiunta di concimi inorganici azotati. L'azoto minerale, infatti, viene rilasciato molto più rapidamente dell'azoto organico. Mentre quest'ultimo si rende disponibile per i microorganismi in tempo compatibile con il tasso di crescita degli stessi, la istantanea disponibilità dell'azoto minerale potrebbe invece eccedere la capacità assimilativa della comunità microbica, con conseguente rilascio di ammoniaca in forma di emissioni maleodoranti o con perdite di nitrati attraverso lisciviazione. Per portarsi in condizioni simili a quelle derivanti dal graduale rilascio dell'azoto organico, è consigliabile che l'aggiunta dei fertilizzanti azotati minerali alle miscele in corso di stabilizzazione avvenga suddividendo la quantità stimata utile in apporti multipli ripetuti.

3.2.3 Calcolo simultaneo delle quantità appropriate dei diversi ingredienti di una miscela di umidità e rapporto C/N voluti

Per la determinazione dei quantitativi relativi ai diversi componenti di una miscela da destinarsi a compostaggio, una volta stabiliti sia il contenuto di umidità che il rapporto C/N desiderati, si ricorre normalmente a semplici metodi algebrici. Con pazienza, è possibile prima risolvere l'equazione dell'umidità relativamente ad una delle quantità incognite e, successivamente, sostituire il valore ottenuto nell'equazione del rapporto C/N, risolvere quest'ultima per l'incognita cercata. Così, considerando le equazioni [3-1] e [3-4] precedentemente analizzate, si ottengono le seguenti soluzioni:

$$m_2 = \frac{A}{B} \quad \text{e} \quad m_3 = \frac{C}{B} \quad [3-10]$$

dove

$$A = m_1 [(u_1 \times C_3) (100 - u_3) - (u_1 \times R_{\text{mix}} \times N_3) (100 - u_3) - (u_3 \times C_1) (100 - u_1) + (R_{\text{mix}} \times N_3) (100 - u_3) \times U_{\text{mix}} - (R_{\text{mix}} \times N_1) (100 - u_1) U_{\text{mix}} + C_1 (100 - u_1) U_{\text{mix}} - C_3 (100 - u_3) U_{\text{mix}} + (u_3 \times R_{\text{mix}} \times N_1) (100 - u_1)]$$

$$B = (R_{mix} \times N_2) (100 - u_2) U_{mix} - (R_{mix} \times N_2) (100 - u_2) u_3 - (R_{mix} \times N_3) (100 - u_3) U_{mix} + (R_{mix} \times N_3) (100 - u_3) u_2 - C_2 (100 - u_2) U_{mix} + C_2 (100 - u_2) u_3 + C_3 (100 - u_3) U_{mix} - C_3 (100 - u_3) u_2$$

$$C = m_1 [(R_{mix} \times N_1) (100 - u_1) U_{mix} - (R_{mix} \times N_1) (100 - u_1) u_2 - (R_{mix} \times N_2) (100 - u_2) U_{mix} + (R_{mix} \times N_2) \times (100 - u_2) u_1 - C_1 (100 - u_1) U_{mix} + C_1 (100 - u_1) u_2 + C_2 (100 - u_2) U_{mix} - C_2 (100 - u_2) u_1]$$

A titolo esemplificativo, di seguito viene riportata un'ipotesi di calcolo per una miscela a tre componenti costituita da residui vegetali da raccolta differenziata presso mercati orto-frutticoli (substrato principale), fanghi di depurazione delle acque reflue civili (additivo) e lolla di riso (agente strutturante).

Date le caratteristiche dei tre ingredienti sotto riportate:

Parametro	Residui ortofrutticoli (n = 1)	Fanghi di depurazione (n = 2)	Lolla di riso (n = 3)
m_n (kg)	100	?	?
u_n (%)	87	75	15
C_n (% TS)	58	33	45
N_n (% TS)	2,5	3,7	0,4

e gli obiettivi di umidità (U_{mix}) e rapporto C/N (R_{mix}) da raggiungere nella miscela:

$$U_{mix} = 63\% \quad R_{mix} = 30$$

si avrà:

$$A = 100 [(87 \times 45) (100 - 15) - (87 \times 30 \times 0,4) (100 - 15) - (15 \times 58) (100 - 87) + (30 \times 0,4) (100 - 15) 63 - (30 \times 2,5) (100 - 87) 63 + 58 (100 - 87) 63 - 45 (100 - 15) 63 + (15 \times 30 \times 2,5) (100 - 87)]$$

$$A = 5.671.200$$

$$B = (30 \times 3,7) (100 - 75) 63 - (30 \times 3,7) (100 - 75) 15 - (30 \times 0,4) (100 - 15) 63 + (30 \times 0,4) (100 - 15) 75 - 33 (100 - 75) 63 + 33 (100 - 75) 15 + 45 (100 - 15) 63 - 45 (100 - 15) 75$$

$$B = 59.940$$

$$C = 100 [(30 \times 2,5) (100 - 87) 63 - (30 \times 2,5) (100 - 87) 75 - (30 \times 3,7) (100 - 75) 63 + (30 \times 3,7) (100 - 75) 87 - 58 (100 - 87) 63 + 58 (100 - 87) 75 + 33 (100 - 75) 63 - 33 (100 - 75) 87]$$

$$C = 4.414.800$$

da cui, applicando le equazioni [3-10], risulta che, nel caso in esame, per ogni 100 kg di residui orto-frutticoli, dovranno aggiungersi 94,6 kg di fanghi di depurazione e 73,65 kg di lolla di riso, con un rapporto tra i tre ingredienti $m_1:m_2:m_3$ corrispondente a 37,3:35,3:27,4.

È opportuno porre l'attenzione sul fatto che la simultanea soluzione di una ricetta a tre o più ingredienti dipende interamente dal fatto di avere a disposizione matrici con caratteristiche compatibili, una volta miscelate, con il raggiungimento degli obiettivi di umidità e C/N voluti. Quando, nell'applicazione delle formule [3-10], si ottengono valori negativi di m_2 ed m_3 , ciò significa che non esistono soluzioni possibili.

3.3 Caratterizzazione preliminare delle matrici da trattare

Da quanto sopra descritto, la precisa conoscenza delle caratteristiche dei substrati disponibili rappresenta un passaggio fondamentale per la costituzione delle miscele da avviare a compostaggio. Fortunatamente, i valori dei principali parametri fisici e chimici (es. umidità, pH, contenuto in C ed N) di numerosi scarti, residui e rifiuti organici possono essere reperiti facilmente nella letteratura tecnico-scientifica di settore. In mancanza di alcuni dati quantitativi, è possibile talvolta derivare i valori dei parametri mancanti attraverso operazioni convenzionali di calcolo. Un esempio è rappresentato dal caso in cui non sia possibile reperire in letteratura il valore relativo al contenuto in carbonio di una matrice organica di cui però è nota la percentuale di ceneri. A questo punto, il contenuto di C potrà essere stimato con buona approssimazione mediante l'equazione seguente (equazione 3-11):

$$C (\%) = \frac{100 - \text{ceneri} (\%)}{1,8} \quad [3-11]$$

Tuttavia, laddove informazioni non siano disponibili, è necessario procedere ad analisi specifiche sui materiali oggetto di trattamento.

Oltre che a consentire il corretto condizionamento delle matrici organiche per un ottimale gestione del processo di stabilizzazione, l'analisi dei materiali di partenza risulta senza dubbio indispensabile per l'individuazione di eventuali contaminanti (es. metalli pesanti, pesticidi, solventi, ecc.) che potrebbero o interferire negativamente con lo svolgimento del processo di compostaggio, o porre rischi igienico-sanitari e di inquinamento ambientale presso le stazioni di trattamento, ovvero rendere inutilizzabile il compost prodotto.

Anche in presenza di matrici con caratteristiche medie ricavabili dai dati di letteratura, è preferibile ricorrere alle analisi di laboratorio nella fase di attivazione di una nuova filiera di compostaggio. Successivamente, è necessario procedere a nuove analisi, quando intervengono sostanziali cambiamenti nella tipologia o nell'origine dei materiali di partenza.

Se per la completa caratterizzazione delle matrici organiche destinate al compostaggio è d'obbligo il ricorso a laboratori specialistici, la determinazione di alcuni parametri quali la densità, l'umidità, il pH ed il contenuto in sali solubili può essere facilmente condotta presso la stazione di compostaggio, con l'ausilio di strumenti di base molto semplici e poco costosi. Quanto sopra si applica eventualmente anche al compost, per una preliminare caratterizzazione del prodotto finale.

3.3.1 Analisi di campo sulle matrici destinate al compostaggio

Il primo passo per la caratterizzazione dei materiali è l'ottenimento di un campione rappresentativo della matrice di interesse. Il campione deve possedere mediamente le qualità del substrato in esame. È perciò consigliabile raccogliere più campioni da posizioni diverse nell'ambito della massa considerata e formare, quindi, un unico campione omogeneo mediante accurata miscelazione di tutte le aliquote prelevate. Bisogna evitare di raccogliere i campioni da localizzazioni particolari, quali le superfici esposte, non rappresentative ai fini della valutazione delle caratteristiche medie. La quantità dei singoli campioni dovrà essere sufficientemente ampia in modo da assicurare una buona rappresentatività della matrice. Di solito, campioni di 1 kg possono risultare adeguati, anche se matrici particolarmente grossolane potrebbero obbligare a prelievi più consistenti. Una volta formato il campione finale, se le determinazioni sullo stesso non vengono condotte contestualmente, è opportuno conservare il materiale da analizzare in apposito contenitore che impedisca la perdita di umidità. La *densità* di una sostanza corrisponde al peso di questa diviso per il volume occupato dalla stessa. Di solito, per le necessità nell'ambito delle attività di compostaggio, è richiesto il valore della *densità apparente (bulk density)*, che rappresenta la massa di una data matrice divisa per il volume del

cumulo che questa forma ovvero del recipiente che la contiene. Il volume comprende quindi lo spazio tra le particelle. A titolo di esempio, dovendo impiegare trucioli di legno come agente di supporto per la formazione di una miscela, risulterà più importante conoscere la densità della matrice tal quale (i trucioli) piuttosto che quella del legno di cui i trucioli sono fatti (densità delle particelle). Disponendo di un recipiente di volume e peso noti, la densità può essere determinata applicando la semplice formula seguente (equazione 3-12):

$$D_A = \frac{M_{cp} - M_{cv}}{V_c} \quad [3-12]$$

dove

D_A = densità apparente

M_{cp} = peso del contenitore riempito con il materiale di interesse

M_{cv} = peso del contenitore vuoto

V_c = volume del contenitore

Quando si determina la densità apparente, è importante riempire il contenitore per la misura cercando di garantire il medesimo grado di compattamento della matrice nelle condizioni di utilizzo. L'eccessivo costipamento del materiale in esame porta infatti a una sovrastima della densità.

L'*umidità* è la frazione del peso totale di un substrato rappresentata dall'acqua. È solitamente espressa in percentuale. La frazione di materiale con esclusione del contenuto in acqua costituisce invece la sostanza secca.

Il contenuto di umidità può essere determinato mediante essiccamento del campione di matrice organica per rimuovere l'acqua, seguito dalla pesata del campione disidratato, rapportata a quella del campione tal quale. La formula da applicare è la seguente (equazione 3-13):

$$U = \frac{M_w - M_d}{M_w - M_c} \times 100 \quad [3-13]$$

dove

U = contenuto di umidità

M_w = peso totale del campione di materiale tal quale, compreso il peso del contenitore

M_d = peso totale del campione di materiale essiccato, compreso il peso del contenitore

M_c = peso del contenitore

Con l'essiccamento del campione, deve essere evitata quanto più possibile la perdita di composti volatili quali l'ammoniaca e gli acidi organici. Per questo motivo, i campioni devono essere disidratati a temperatura relativamente bassa, per un periodo di tempo sufficientemente prolungato. La procedura generale per la determinazione dell'umidità presuppone di pesare il campione finché questo non evidenzia di aver raggiunto lo stadio di peso costante, quando cioè, attraverso due pesate in successione temporale, non si apprezza ulteriore perdita di peso. Nella maggior parte dei casi, con campioni di 100 g del substrato oggetto di verifica, è possibile raggiungere la condizione di peso costante dopo permanenza degli stessi in stufa a 105 °C per 24 h.

Per accorciare i tempi di disidratazione del campione, può utilmente essere impiegato anche il forno a microonde. In questo caso, si riesce a rimuovere completamente l'acqua dalla matrice in esame nell'arco di alcuni minuti (es. alla potenza di 600 watts, 8 minuti possono risultare sufficienti per essiccare campioni di 100 g). I tempi necessari per la disidratazione mediante microonde devono comunque essere di volta in volta verificati in modo da evitare l'eccessivo riscaldamento dei campioni, con conseguente combustione di parte del materiale in esame. È buona norma disporre il campione nel forno in strato sottile.

La procedura per la determinazione del pH, applicabile oltre che ai compost maturi, anche alle matrici di partenza e ai campioni prelevati durante il processo di trasformazione, si basa sull'estrazione degli ioni idrogeno dal materiale in esame mediante utilizzo di acqua, in rapporto predefinito; la successiva determinazione del pH, dato dalla relazione $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, viene effettuata mediante pH-metro, strumentazione reperibile sul mercato a costi modesti. La determinazione del pH riveste importanza fondamentale nello studio del processo di compostaggio in quanto da esso dipende l'attività delle popolazioni microbiche oltre che la disponibilità degli elementi nutritivi e di altri elementi (es. alcuni metalli pesanti). La misura viene condotta su un'aliquota di campione fresco pari a 10,0 g, posta in becher o beuta a collo largo da 250 ml e addizionata di 100 ml di acqua distillata. La miscela viene tenuta in agitazione per circa 30 minuti; terminata l'omogeneizzazione, dopo aver lasciato riposare la soluzione per 30 minuti, si procede alla filtrazione con filtri veloci a pieghe. L'estratto viene successivamente sottoposto alla misura al pH-metro, previa calibrazione dello strumento mediante lettura delle apposite soluzioni tampone.

Per la misura della conducibilità elettrica può essere utilizzata la stessa procedura prevista per la determinazione del pH; in questo caso, però, terminata la fase di omogeneizzazione, la sospensione viene filtrata sottovuoto e successivamente sottoposta a lettura al conduttimetro. Lo strumento deve essere preventivamente calibrato effettuando la misura su uno standard a conducibilità nota (per informazioni più dettagliate sulle metodiche descritte si rimanda al Manuale ANPA "Metodi di analisi del compost", 2001). La conducibilità elettrica specifica, CES, può essere espressa in dS/m (decisiemens per metro) o in mmhos/cm (millimhos per centimetro). Queste unità di misura sono equivalenti e danno quindi lo stesso valore numerico. È possibile convertire il valore della conducibilità in ppm di sali solubili, semplicemente moltiplicando CES per 640.

Un'idea di quanto la salinità di un substrato possa, a fine processo di stabilizzazione, influire sulla compatibilità del compost ottenuto con l'impiego in agricoltura, è data dalla *Tabella 3.2*.

Tabella 3.2 - Scala indicativa della risposta delle piante al contenuto in sali solubili del substrato di crescita

Salinità (CES dS/m)	Risposta delle piante
$0 \leq \text{CES} \leq 2$	nessun effetto
$2 \leq \text{CES} \leq 4$	inibizione della crescita delle specie più sensibili
$4 \leq \text{CES} \leq 8$	crescita stentata della maggior parte delle specie
$8 \leq \text{CES} \leq 16$	crescita delle sole specie tolleranti
> 16	crescita di un limitato numero di specie alofile

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

CHANDLER J.A., JEWELL W.J., GOSSETT J.M. VAN SOEST P.J., ROBERTSON J.B. (1980). Predicting methane fermentation bio-degradability. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, No. 10, pp. 93-107.

VAN SOEST P.J. (1994). *The Nutritional Ecology of the Ruminants*. Cornell University Press, Ithaca (NY), pp. 476.

4. I metodi di compostaggio

4.1 Quale metodo di compostaggio adottare?

Numerosi sono i metodi di compostaggio applicabili alla stabilizzazione dei rifiuti organici. La scelta del metodo dipende da una serie di fattori, tra i quali, in primo luogo, la tipologia delle matrici organiche da trattare. Ad influenzare l'adozione di un sistema di compostaggio piuttosto che un altro sono però anche la quantità di rifiuto da stabilizzare e la disponibilità di spazio per il trattamento, l'entità dell'investimento stanziato per le strutture impiantistiche, l'incidenza della manodopera sull'operatività del sistema, la dislocazione topografica del sito destinato alla stazione di trattamento ed una molteplicità di considerazioni di carattere ambientale, infrastrutturale e sociale. Sulla base di queste necessità, non è possibile stabilire *a priori* quale filiera di compostaggio sia più confacente alle esigenze di un determinato contesto. Tuttavia, anche se l'obiettivo di una corretta stabilizzazione aerobica dei rifiuti organici può essere raggiunto attraverso strategie impiantistiche diverse, è opportuno tenere ben presenti i limiti associati alle specifiche soluzioni, evitando l'adozione di sistemi non appropriati di trattamento, sulla base della mera economicità dell'intervento o delle mode tecnologiche di volta in volta ricorrenti sul mercato come soluzioni rivoluzionarie.

Come è stato già ampiamente evidenziato, le matrici organiche destinabili alla stabilizzazione attraverso il processo di compostaggio ospitano, in generale, sia microorganismi in grado di condurre reazioni di decomposizione anaerobica che specie microbiche con metabolismo ossidativo. Poiché il fine del compostaggio è la biostabilizzazione aerobica della sostanza organica, il requisito fondamentale per garantire un decorso rapido ed efficiente del processo consiste nel mantenere la presenza di ossigeno nelle matrici in trasformazione, ai livelli compatibili con il metabolismo microbico aerobico. Ne consegue che, nelle diverse situazioni operative, il metodo di compostaggio adottato, determina il modo attraverso il quale la suddetta esigenza è soddisfatta e finisce per condizionare altri aspetti del processo come il controllo della temperatura, la movimentazione del materiale in trasformazione, il controllo delle emissioni maleodoranti ed il tempo di stabilizzazione.

Nel panorama tecnologico, si riconoscono essenzialmente tre tipologie generali di metodi di compostaggio: a) il compostaggio in cumuli periodicamente rivoltati, b) il compostaggio in cumuli statici aerati e c) il compostaggio in bioreattori. Ciascuna tipologia si articola in una vasta gamma di sistemi applicativi.

Esiste anche il cosiddetto *compostaggio passivo*, il quale non ha però rilevanza in termini tecnologici (Figura 4.1). Esso infatti presuppone il semplice ammasso della matrice organica putrescibile,

la quale viene poi lasciata indisturbata per lunghi periodi di tempo (molti mesi), senza condizionamento alcuno delle reazioni di degradazione e trasformazione. Rientra in questa categoria il trattamento delle deiezioni animali presso la maggior parte delle aziende agricole.

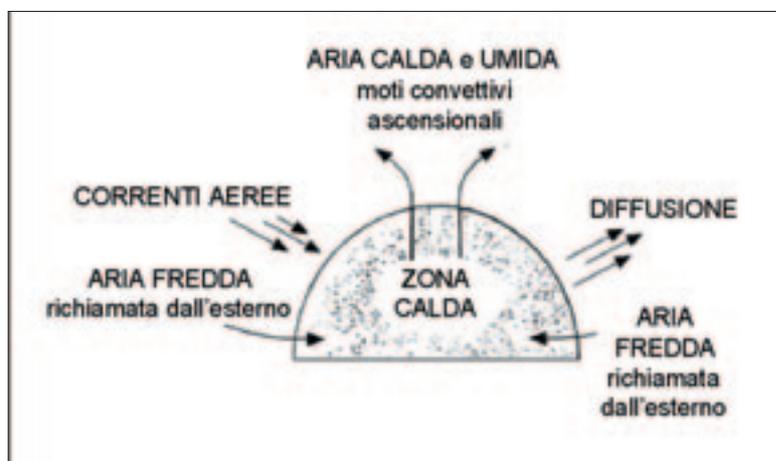


Figura 4.1 - Rappresentazione schematica di cumulo in compostaggio passivo.

4.2 I sistemi tecnologici di compostaggio

4.2.1 Il compostaggio in cumuli con rivoltamento della biomassa substrato

Il compostaggio secondo questo metodo si attua disponendo la matrice di partenza in lunghe andane (*windrows*), normalmente a sezione triangolare o trapezoidale più o meno rastemata, le quali sono movimentate o rivoltate periodicamente (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Aia di compostaggio con andane (*windrows*) disposte per il rivoltamento.

L'altezza delle andane varia a seconda delle caratteristiche del substrato e della macchina movimentatrice. Matrici molto dense (es. alcuni tipi di deiezioni animali), che tendono a compattarsi, devono essere sistemate in cumuli di 1,2-1,5 m; d'altra parte, con materiali piuttosto soffici, come i fanghi di depurazione miscelati a scaglie di legno (*wood chips*), si possono formare cumuli di 2-3 m di altezza e talvolta anche più alti. La base dei cumuli varia, di solito, dai 3 ai 6 m. Le più comuni pale meccaniche possono lavorare tranquillamente anche su andane

alte. Le macchine rivoltatrici, sia trainate che semoventi, non sono invece compatibili con cumuli alti più di 3 m.

I cumuli sono aerati principalmente grazie alle correnti d'aria e ai moti convettivi e diffusivi della stessa. Il ricambio d'aria all'interno della matrice in compostaggio dipende dalla porosità del cumulo. Quindi, la dimensione di un cumulo compatibile con una efficiente aerazione è determinata dalla porosità dello stesso. Cumuli troppo grandi tendono a compattarsi, con il rischio di insorgenza di reazioni anaerobiche nella parte centrale. Di contro, andane di dimensioni modeste perdono calore troppo rapidamente; cosicché, le temperature necessarie per una progressiva evaporazione dell'acqua e per la distruzione degli eventuali organismi patogeni non sono raggiunte. Il rivoltamento consente il rimescolamento dei materiali contribuendo anche a ridurre la pezzatura delle particelle, con conseguente aumento della superficie disponibile per l'attacco microbico. Esso ripristina anche la porosità della matrice in trasformazione, incrementando, al contempo, gli scambi passivi del vapore acqueo e degli altri gas prodottisi nell'atmosfera interna al cumulo. Sebbene le andane, in conseguenza del rivoltamento, vengano aerate, l'ossigeno apportato dalla movimentazione negli interstizi vuoti della matrice è consumato rapidamente dai microorganismi. Per questo, il risultato del rivoltamento è una variazione ciclica della concentrazione di ossigeno all'interno del cumulo. L'ossidazione biologica non può essere mantenuta, costantemente, al massimo dell'efficienza poiché, tra una movimentazione e l'altra, la concentrazione di ossigeno costituisce il fattore limitante.

Il rivoltamento permette inoltre la redistribuzione nell'ambito del cumulo dei differenti strati della matrice, secondo un profilo diverso. Così il materiale in superficie viene rimpiazzato da quello proveniente dalle zone interne del cumulo e viceversa. Ciò consente, nel corso del processo, una eguale esposizione di tutta la matrice ora all'atmosfera più ossigenata della superficie, ora alle alte temperature dell'interno del cumulo. In questo modo, la biomassa substrato subisce una stabilizzazione omogenea ed una sufficiente igienizzazione.

La frequenza dei rivoltamenti dipende dal tasso di decomposizione della biomassa, dal contenuto di umidità e dalla porosità del substrato. Dal momento che il tasso di degradazione è, solitamente, molto elevato negli stadi iniziali del processo, la frequenza dei rivoltamenti può diminuire con

l'età del cumulo. Matrici molto putrescibili possono richiedere rivoltamenti giornalieri nelle prime fasi del compostaggio. Al progredire della biostabilizzazione, la frequenza delle movimentazioni può essere ridotta fino ad un rivoltamento a settimana. L'insorgenza di emissioni maleodoranti, un rapido declino della temperatura ovvero l'eccessivo accumulo di calore verso i limiti che rischiano di compromettere la vitalità dei microorganismi, sono tutte situazioni che rendono ragionevole un rivoltamento. Durante la stagione riproduttiva delle mosche, i cumuli devono essere rivoltati almeno una volta alla settimana, indipendentemente dall'andamento delle temperature della matrice, in modo da interrompere il ciclo biologico di questi insetti.

Con il progredire del processo di stabilizzazione, le dimensioni dei cumuli si contraggono sensibilmente sì da rendere opportuna la fusione di due o più cumuli in una nuova, unica andana che impedisca l'eccessiva dissipazione del calore. Nel compostaggio all'aperto, tale espediente risulta molto importante, specialmente durante la stagione fredda (Figura 4.3).

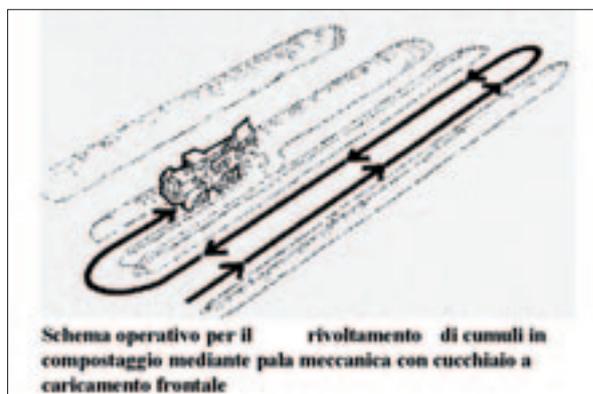


Figura 4.3 - Rappresentazione di aia di stabilizzazione organizzata secondo il sistema dei cumuli movimentati periodicamente a mezzo di pala meccanica.

Con il metodo dei cumuli rivoltati periodicamente, la fase di compostaggio attivo dura, generalmente, da tre a nove settimane, a seconda della natura del substrato di partenza e della frequenza delle movimentazioni. Per ottenere il superamento della fase di intensa attività biologica in tre-quattro settimane, è necessario procedere a rivoltamenti una o due volte al giorno nel corso della prima settimana di processo, dopo di che, ad un rivoltamento ogni due-tre giorni.

Per quanto riguarda la scelta delle macchine operatrici destinate al rivoltamento del materiale in compostaggio, si dovrà tener conto sia della quantità di materiale da movimentare, sia della forma e delle dimensioni dei cumuli.

In piccoli impianti di compostaggio, il rivoltamento può essere assicurato da una *pala meccanica dotata di cucchiaio caricatore frontale* (Figura 4.4). Con questo tipo di macchina, la matrice in compostaggio viene prelevata dal cumulo e lasciata poi ricadere in modo da ricostituire l'andana con materiale reso più soffice dalla movimentazione. L'azione della pala serve non solo ad aerare il materiale ma anche a rimescolarlo. I cumuli rivoltati con pala meccanica sono di solito allestiti in coppie ravvicinate, al fine di renderne più facile l'accorpamento man mano che, con il procedere del processo, la matrice in compostaggio si riduce in volume. A seconda della dimensione della macchina, una pala meccanica è in grado di movimentare 30-60 m³/h.



Figura 4.4 - Rivoltamento dei cumuli di materiale in compostaggio mediante pala meccanica con cucchiaio caricatore frontale (FEL/front end loader).

Negli ultimi 20 anni sono state messe a punto macchine specializzate per il rivoltamento delle andane di materiale in compostaggio. Queste macchine hanno il



Figura 4.5 - Macchina volta-cumuli azionata dalla presa di forza di un trattore. L'albero fresante movimenta soltanto metà dell'andana.

pregio di ridurre notevolmente i tempi di lavoro e la manodopera necessaria; esse, inoltre, consentono un più omogeneo rimescolamento del materiale. Alcune di queste macchine operatrici sono progettate per essere azionate dai comuni trattori di uso agricolo, mediante connessione con la presa di forza frontale o posteriore; altre sono semoventi.

Le macchine rivoltatrici azionate da trattore possono essere trainate ovvero spinte. Di solito sporgono da un lato del trattore e movimentano il materiale in compostaggio man mano che il trattore procede lungo il corridoio tra due andane. Queste macchine possono operare sia a mezzo di un albero rotante, perpendicolare allo sviluppo longitudinale delle andane, munito di palette o dischi di varia foggia che fresano, rimescolano e risistemano il cumulo, sia mediante un nastro elevatore inclinato, ad ampio fronte di carico, dotato di opportuni raschiatori (Figura 4.5 - 4.6)

La maggior parte di queste macchine rivoltatrici azionate da trattore sono in grado di operare, ad ogni passaggio, solo sulla metà del fronte dell'andana interessata al rivoltamento. In questo

caso, la movimentazione completa di un cumulo si esaurisce con due passaggi del trattore, in opposto senso di marcia, lungo l'asse longitudinale dell'andana. Esistono anche macchine rivoltatrici trainate le quali operano su tutta la larghezza dell'andana, cavalcando la stessa con gli organi fresanti (Figura 4.7).

Al trattore, per poter muovere una macchina rivoltatrice, è richiesta una potenza minima non inferiore ad 80 hp.

Le macchine rivoltatrici semoventi consistono, invece, sia in poderosi telai cavalca-cumulo, montati su ruote gommate o cingoli e dotati di asse rotante frontale, con palette o dischi fresanti, sia in convogliatori cingolati a nastro trasportatore mobile su piano inclinato. Rispetto alle operatrici azionate da trattore, le macchine rivoltatrici semoventi possono operare su cumuli sistemati in parallelo, con corridoi intercalari più stretti; ciò significa un notevole risparmio di spazio altrimenti improduttivo ai fini del processo. Considerato l'elevato costo di acquisto, le macchine semoventi trovano tuttavia adeguato sfruttamento soltanto in impianti di grandi dimensioni (Figura 4.8).

4.2.2 Il compostaggio in cumuli statici aerati

Questo metodo elimina la necessità di movimentare il materiale in compostaggio, rendendo, possibile l'ossigenazione attraverso la circolazione di aria in appositi sistemi di tubi diffusori. Una prima importante distinzione, nell'ambito del metodo, è tra sistemi nei quali si applica l'aerazione passiva dei cumuli e sistemi nei quali, invece, si ricorre all'aerazione forzata.



Figura 4.6 - Convogliatore a piano inclinato per il rivoltamento dei cumuli. In alto, è mostrata la macchina allestita per essere trainata da un trattore; in basso, è invece possibile vedere lo stesso tipo di macchina, in versione semovente. In entrambi i casi, la rivoltatrice opera, ad ogni passaggio, soltanto su una metà del cumulo.

Cumuli statici aerati passivamente. Il compostaggio in cumuli aerati passivamente prevede il trasporto dell'aria all'interno del substrato in trasformazione attraverso un apparato di tubi bucherellati, immersi nel cumulo. Le estremità aperte dei tubi terminano all'esterno del cumulo. L'aria fluisce nei tubi e, per mezzo di forellini aperti per tutta la lunghezza della porzione immersa nella matrice organica, si diffonde attraverso il profilo del cumulo, grazie all'effetto ciminiera creato dai gas caldi, che si portano verso gli strati esterni per poi fuoriuscire alla superficie del substrato (cfr. Figura 4.1).

I cumuli devono essere non più alti di 1-1,2 m e ricoperti, in superficie, con uno strato di circa 10 cm costituito da compost maturo, paglia o torba di sfagno. Questo strato esterno ha funzioni coibenti e di adsorbimento delle emissioni maleodoranti. Poiché, una volta formato, il cumulo non viene più movimentato, se non a fine processo, è necessario miscelare bene il substrato di partenza per renderlo quanto più omogeneo e dotato di una adeguata tessitura, magari ricorrendo all'uso di agenti di supporto ligno-cellulosici (es. paglia triturrata, trucioli di legno, ecc.). I tubi per l'aerazione sono piazzati

sul basamento che ospiterà il cumulo, sopra uno strato di compost maturo, paglia o torba, simile a quello con cui verrà coibentata la matrice in compostaggio. Di solito, i tubi vengono posizionati con i fori rivolti verso il basso in modo da evitare rischi di ostruzione ed il drenaggio della condensa. Quando il processo di compostaggio è completato, i tubi vengono semplicemente sfilati dalla matrice ed il materiale impiegato come coibente viene miscelato al compost.

Questo metodo di compostaggio si è rivelato particolarmente interessante per il trattamento dei residui di alcune industrie conserviere, caratterizzati dalla presenza di sostanze a forte impatto olfattivo o da elevate concentrazioni di composti azotati (es. rifiuti della lavorazione di molluschi e crostacei, liquami suinicoli, scarti della macellazione e dell'industria ittica, ecc.).

Cumuli statici con aerazione forzata. Il metodo dei cumuli statici aerati si basa sull'uso di apparati che costringono l'aria a fluire forzatamente attraverso la matrice in compostaggio. Questi apparati consentono, in generale, un maggiore controllo del processo. Il rifornimento di aria nella matrice organica in trasformazione può essere attuato in due modi: attraverso *aspirazione di aria* dalla superficie del cumulo (*suction* o *vacuum induced ventilation*) o per *insufflazione forzata di aria* nel substrato (*blowing* o *forced pressure ventilation*) (Figura 4.9).

Con la tecnica dei cumuli statici con aerazione forzata, i substrati di partenza, eventualmente miscelati ad appropriati agenti di supporto che ne incrementino la porosità, sono sistemati in cumulo su una platea di solito ricoperta da uno strato di scaglie di legno, paglia triturrata od altro mate-



Figura 4.7 - Compostaggio in cumuli aerati mediante movimentazione a mezzo di macchina rivoltatrice trainata, con capacità di lavoro su tutta la larghezza del cumulo.

riale poroso. Questo strato di materiale poroso ospita i tubi per l'aerazione, opportunamente bucherellati. Nelle soluzioni impiantistiche più recenti, si evita il posizionamento dei tubi di aerazione sulla superficie della platea di compostaggio, ricavando, nella stessa, canalette grigliate che ospitano i tubi o che funzionano esse stesse da conduttura di aerazione. Il sistema di tubi è connesso ad un ventilatore che può aspirare aria ovvero spingerla attraverso la matrice in compostaggio. Affinché sia garantita una uniforme diffusione dell'aria nella matrice in trasformazione, i cumuli non devono superare i 2,5 m in altezza.

Nei cumuli "aspirati", viene creata una depressione per mezzo del sistema di tubi posizionati nella matrice, sulla platea di compostaggio, e connessi con il ventilatore che, in questo caso, agisce da aspiratore. L'aria viene richiamata nel substrato dalla superficie esterna, passa attraverso il profilo del cumulo e viene drenata, al fondo, dal sistema di tubi dotati di fori. L'aria esausta è veicolata all'esterno del cumulo dal tubo di raccordo principale, il quale si immette in un sistema filtrante, prima di connettersi con

l'aspiratore. Ciò permette l'abbattimento delle eventuali emissioni maleodoranti ed evita che il vapor acqueo, drenato via dal cumulo assieme all'aria esausta, raggiunga, con il suo carico di sostanze corrosive (acidi organici), l'aspiratore. Il sistema di compostaggio basato sull'aspirazione dell'aria, detto anche *processo Beltsville* (EPSTEIN *et al.*, 1976), presenta alcuni inconvenienti rispetto al controllo dei parametri di processo. Il richiamo di aria fredda dall'atmosfera esterna all'interno del substrato, fa sì che, nella regione centrale dei cumuli, si condensino il vapor acqueo. Ciò porta, in primo luogo, alla formazione di ristagni d'acqua che possono provocare l'insorgenza di condizioni anaerobiche in vaste porzioni della matrice. La ridotta evaporazione determina, inoltre, una minore dissipazione del calore e, di conseguenza, un cattivo controllo della temperatura.

Nel sistema di aerazione forzata per insufflazione, invece, il ventilatore funziona come soffiante, inducendo una pressione positiva all'interno della matrice. In questo modo, l'aria esausta viene spinta verso la superficie esterna del substrato e rimpiazzata da quella fresca diffusa dal sistema di tubi alla base del cumulo (Figura 4.10). Con questo sistema, il controllo delle eventuali emissioni maleodoranti può essere conseguito mediante la stesura di uno strato (circa 10 cm) di compost maturo alla superficie del cumulo.

Il sistema di biostabilizzazione con aerazione forzata per insufflazione rappresenta, fra tutte le alternative di compostaggio in cumuli statici, la procedura più razionale per la gestione del processo. L'insufflazione rende possibile, infatti, un miglior controllo della temperatura, che è poi il parametro che maggiormente condiziona il metabolismo microbico durante la fase di compostaggio attivo.



Figura 4.8 - Compostaggio in cumuli aerati mediante movimentazione a mezzo di macchina rivoltatrice semovente.

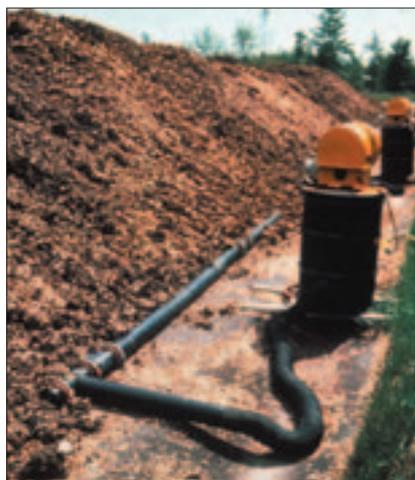


Figura 4.9 - Compostaggio in cumuli statici aerati mediante ventilazione forzata.

Le soffianti, e quindi l'adduzione forzata di aria nella matrice in compostaggio, possono essere governate secondo strategie diverse. I ventilatori possono infatti operare sia in continuo che ad intermittenza. In quest'ultimo caso, il meccanismo di controllo dei periodi di lavoro e di pausa può dipendere da un programma impostato su apposito temporizzatore (*timer*) o da un sensore di temperatura collocato all'interno del cumulo.

L'insufflazione in continuo, per quanto garantisca una costante ossigenazione e dissipazione del calore in eccesso dal substrato, presenta alcuni inconvenienti. Le zone del cumulo più vicine ai tubi diffusori tendono a raffreddarsi troppo ed a disidratarsi. Ciò determina l'arresto dell'evoluzione biologica di cospicue porzioni della matrice, nelle quali anche la disattivazione degli eventuali patogeni viene compromessa.

D'altra parte, con le soffianti operanti ad intermittenza, le temperature nelle diverse sezioni del cumulo tendono invece, tra un turno di insufflazione e l'altro, a equalizzarsi.

Quando i periodi di aerazione forzata sono governati da un *timer*, le soffianti si attivano o si disattivano sulla base di tempi fissati. Il programma dei periodi di lavoro e di pausa dipende dalle caratteristiche del cumulo (dimensioni) e, soprattutto, da quelle della biomassa substrato (degradabilità, porosità, ecc.). Di solito si ricorre a

cicli durante i quali la soffiante lavora da 1/3 a 1/2 del tempo disponibile (ad esempio 10 min di lavoro ogni 20 min di pausa). I periodi di pausa non dovrebbero mai superare i 30 min.

La gestione dell'insufflazione per mezzo di programmi impostati su *timer*, per quanto consenta una buona aerazione del substrato ed un sufficiente controllo della temperatura, non necessariamente riesce a mantenere le temperature del cumulo entro limiti ottimali per l'attività microbica.

Un più stretto controllo della deriva termica nei cumuli statici "insufflati" è stato raggiunto assoggettando il funzionamento delle soffianti all'andamento della temperatura all'interno del substrato. Il sistema di insufflazione forzata dei cumuli governato dalla temperatura (*temperature feed-back control*) viene indicato anche come *processo Rutgers* (FINSTEIN *et al.*, 1980; MACGREGOR *et al.*, 1981; FINSTEIN *et al.*, 1982; FINSTEIN *et al.*, 1983). Poiché la temperatura è un indice indiretto dell'attività metabolica della



Figura 4.10 - Soffiante per l'immissione di aria nel materiale in compostaggio secondo il sistema dei cumuli aerati per insufflazione.

biomassa microbica, un sensore termico (termocoppia) è collocato nel cumulo di compostaggio. Questo sensore invia un segnale ad un termostato sul quale viene impostata, a discrezione dell'operatore, una certa temperatura (normalmente 55 °C). Il termostato è collegato, a sua volta, con la centralina di controllo delle soffianti. Quando la temperatura alla termocoppia raggiunge il valore fissato sul termostato, questo attiva le soffianti, le quali lavorano in continuo, fin tanto che la dissipazione del calore dovuta alla ventilazione forzata non riporta la temperatura del substrato sotto al limite impostato sul termostato. Alle temperature inferiori

rispetto al limite fissato sul termostato, le soffianti agiscono secondo un programma di tempi di lavoro e pause governato da un *timer*. In questa maniera, si garantiscono i massimi apporti di aria in coincidenza con le punte più intense di attività microbica. Poiché elevata attività dei microorganismi significa maggiore utilizzazione di ossigeno e produzione di calore, l'aria fornita dalle soffianti "su richiesta" soddisfa, da una parte, le accresciute esigenze di ossigeno e dissipa, dall'altra, il calore in eccesso. Il valore di 55 °C, di solito impostato sul termostato, garantisce il raggiungimento di temperature sufficienti alla disattivazione dei patogeni. Con il *processo Rutgers*, la fase di compostaggio attivo si conclude nell'arco di tre-quattro settimane.

4.2.3 Il compostaggio in bioreattori

Con il termine compostaggio in bioreattore (*in-vessel composting*) si indica la stabilizzazione della biomassa substrato in particolari strutture di contenimento, dove tecniche di movimentazione e di aerazione forzata della matrice sono variamente combinate. I "bioreattori" possono essere contenitori chiusi o semplici vasche aperte. La maggior parte di questi apparati assolve solo ad una prima parziale omogenizzazione e trasformazione delle matrici organiche. La biostabilizzazione aerobica vera e propria del materiale in uscita dai reattori avviene, di solito, attraverso uno dei numerosi sistemi in cumulo.

Da un punto di vista delle applicazioni tecnologiche, le più diffuse tipologie di bioreattori sono: i *cilindri rotanti*, i *silos*, le *biocelle* e le *trincee dinamiche aerate*. Cilindri rotanti, silos e biocelle rientrano nella categoria dei reattori chiusi, mentre le trincee dinamiche aerate sono un esempio di reattori aperti. A loro volta, cilindri rotanti, silos e trincee dinamiche aerate, contrariamente alle biocelle, prevedono la movimentazione della biomassa substrato all'interno del reattore.

I cilindri rotanti. Si tratta di grandi cilindri disposti orizzontalmente e sistemati su speciali ingranaggi che ne consentono un lento movimento rotatorio. Il substrato viene alimentato attraverso una tramoggia sistemata ad una estremità del cilindro. La matrice organica, a seguito del movimento rotatorio, viene miscelata e spinta attraverso tutta la lunghezza del cilindro, per poi venir scaricata all'estremità opposta a quella di carico (Figura 4.11). Le dimensioni più frequenti per questo tipo di cilindri sono 3 m di diametro per 35 m circa di lunghezza (Figura 4.12). Considerando un utilizzo massimo del volume interno intorno al 70%, le suddette misure consentono una capacità giornaliera dell'ordine di 50 t, con tempi di residenza del substrato di tre giorni. Nel cilindro, i processi di decomposizione iniziano rapidamente, preparando il substrato alla stabi-

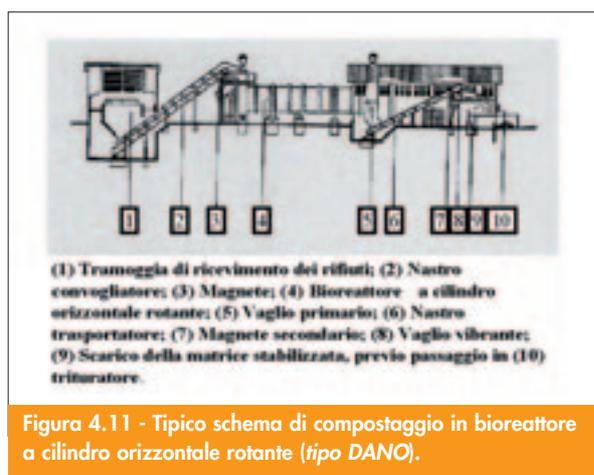


Figura 4.11 - Tipico schema di compostaggio in bioreattore a cilindro orizzontale rotante (tipo DANO).

compartimenti sono aperti ed il materiale in essi contenuto è trasferito in sequenza, liberando così il primo compartimento che riceve un nuovo carico. All'interno del cilindro si raggiungono temperature $> 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ che contribuiscono ad una drastica disattivazione degli eventuali microrganismi patogeni.

Questi cilindri rotanti sono costosi e, in sostanza, non apportano alcun giovamento significativo al processo complessivo di stabilizzazione della matrice di partenza. La quasi totalità del processo di compostaggio avviene infatti all'esterno del bioreattore, con i soliti problemi di controllo del processo. Preparazione e igienizzazione del substrato possono essere raggiunti secondo procedure molto più semplici e meno onerose.



Figura 4.12 - Bioreattore a cilindro orizzontale rotante.

nuova matrice fresca viene alimentata dall'alto. L'aerazione è attuata per mezzo di un sistema di diffusori posti al fondo del silo, che permettono all'aria di passare attraverso tutto il profilo del materiale in compostaggio. Una volta arrivata al culmine del reattore, l'aria esausta viene convogliata in un filtro per l'abbattimento degli odori. Il tempo di ritenzione del substrato all'interno del silo è normalmente dell'ordine delle due settimane. Dopo la rimozione dal silo, la matrice viene avviata alla fase di completa stabilizzazione in cumulo ovvero in un secondo silo, anch'esso aerato.

Inconvenienti principali del compostaggio in silos sono: la tendenza ad un eccessivo compattamento della biomassa substrato; la difficoltà di aerare in maniera omogenea, con rischio di eccessiva ventilazione e raffreddamento della matrice a contatto dei diffusori a fronte della scarsa ossigenazione delle parti alte del silo; la condensa del vapore lungo le pareti fredde del reattore, con conseguente ostacolo della progressiva perdita di umidità ed eccessivo ristagno d'acqua nella matrice. Tutto ciò può limitare il decorso delle reazioni aerobiche e rendere difficile il controllo della temperatura.

lizzazione successiva, fuori del reattore. L'aria è alimentata dalla estremità di scarico della matrice e si muove, nel cilindro, in direzione opposta rispetto all'avanzamento del substrato. La velocità di rotazione e il grado di inclinazione dell'asse del cilindro determinano il tempo di ritenzione del materiale caricato. All'interno, il cilindro può essere completamente aperto oppure diviso in due o tre compartimenti, separati da porte di trasferimento manovrabili. In quest'ultimo caso, alla fine di ogni giorno di attività, viene aperta la porta di trasferimento dell'estremità di scarico e l'ultimo compartimento è così svuotato. Successivamente gli altri

compartimenti sono aperti ed il materiale in essi contenuto è trasferito in sequenza, liberando così il primo compartimento che riceve un nuovo carico. All'interno del cilindro si raggiungono temperature $> 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ che contribuiscono ad una drastica disattivazione degli eventuali microrganismi patogeni.

I silos. Sono reattori cilindrici, verticali, di solito completamente chiusi. In quelli a configurazione più recente, ogni giorno uno speciale apparato estrattore rimuove dal fondo del reattore la porzione di substrato parzialmente stabilizzata, mentre

I silos si prestano al compostaggio di matrici organiche particolarmente soffici e ben strutturate.

Le biocelle. Il compostaggio mediante biocelle prevede un preliminare trattamento della biomassa substrato all'interno di veri e propri *containers* scarrabili, da sistemarsi in apposita platea cementata, dotati di un impianto di aerazione che consente l'adduzione di aria all'interno del reattore attraverso il pavimento ad intercapedine, perforato. Ogni biocella può contenere da 30 a 60 m³ di materiale, il quale viene caricato attraverso un portellone, successivamente chiuso in maniera ermetica. Il metodo è, a tutti gli effetti, un sistema statico e, perciò, richiede una accurata preparazione della miscela iniziale, sia in termini di bilanciamento dei nutrienti, sia, soprattutto, in termini di adeguata porosità e resistenza meccanica al compattamento. Dopo uno stazionamento di 7-12 giorni all'interno del *container*, la matrice in trasformazione, avendo perso buona parte della putrescibilità e della tendenza a rilasciare percolato, viene sistemata in cumuli, all'esterno, dove raggiunge la completa maturazione in ulteriori 8 settimane. In conclusione, l'intero ciclo di trattamento con il sistema a biocelle richiede un arco temporale di 9-10 settimane. Le biocelle, come tutti i sistemi di compostaggio in reattori chiusi, offrono la possibilità sia di controllare le emissioni di odori, mediante il trattamento dell'aria esausta in uscita per mezzo di biofiltri, sia di gestire razionalmente il percolato. Questi bioreattori possono essere impiegati singolarmente o in batteria di due o più unità.

Le trincee dinamiche aerate. Sono definite anche *letti agitati (agitated beds)*. Questi sistemi combinano l'aerazione controllata del substrato con il periodico rivoltamento dello stesso. Non sono reattori chiusi ed il compostaggio delle matrici alimentate avviene in strette corsie o vasche (trincee), delimitate da pareti che corrono soltanto lungo l'asse longitudinale.

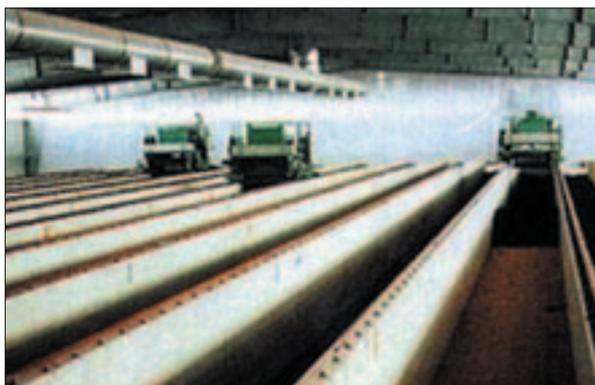


Figura 4.13 - Batteria di corsie per il compostaggio di matrici organiche secondo il sistema delle trincee dinamiche aerate.

Più corsie possono essere sistemate, in batteria, una adiacente all'altra (Figura 4.13) e sul culmine di ogni parete è posizionata una rotaia. Una macchina rivoltatrice si muove a cavallo di ogni corsia, seguendo il binario formato dalle due pareti di contenimento adiacenti. Negli impianti a corsie multiple, la macchina rivoltatrice può essere spostata da una trincea all'altra per mezzo di un telaio traslatore su ruote, posto in testa alle vasche.

In un tipico schema operativo, la biomassa substrato è alimentata all'estremità di carico della corsia. La macchina rivoltatrice avanza sulle rotaie e la matrice viene rivoltata e scaricata alle spalle della macchina stessa. Così, ad ogni passaggio, la macchina movimentata il materiale in compostaggio verso l'estremità di scarico della corsia. La macchina rivoltatrice ha la funzione di miscelare la matrice in trasformazione, favorendone così la omogeneizzazione, mediante la disaggregazione di eventuali agglomerati, e incrementando il rilascio di vapor acqueo e di calore. Il rivoltatore opera in maniera completamente automatizzata (Figura 4.14).

Sul pavimento delle vasche, corrono, in senso longitudinale, delle canalette che ospitano il sistema di diffusione dell'aria, connesso con una serie di soffianti. In questo modo la matrice in compostaggio può essere aerata anche in fase di stazionamento. Poiché, lungo la corsia, il substrato si trova in stadi di maturazione diversi, la corsia stessa è suddivisa in sezioni, a ciascuna delle quali può essere addotta una quantità d'aria diversa da quella contemporaneamente immessa nelle



Figura 4.14 - Particolare di macchina rivoltatrice a carroponte per la movimentazione del substrato in fase di compostaggio attivo all'interno di una trincea dinamica aerata.

altre. Di solito, ogni sezione è alimentata da una soffiante, governata da un sensore di temperatura collocato nel settore di riferimento e funzionante secondo il sistema a *feed-back* (cfr. 4.2.2).

La capacità del sistema dipende, ovviamente, dal numero e dalle dimensioni delle corsie. Nelle applicazioni più diffuse, le trincee hanno una lunghezza di 25-30 m, sono larghe 3-4 m e sono delimitate da pareti alte 1,5-3 m. La lunghezza delle corsie e la frequenza dei rivoltamenti determina i periodi di residenza della biomassa all'interno del reattore. A seconda delle caratteristiche del substrato, i tempi di ritenzione variano da tre a cinque settimane, dopo di che, il materiale in uscita dalle trincee viene avviato alla fase di finissaggio.

Questo tipo di bioreattori si è rivelato particolarmente efficace nel trattamento di biomasse ad elevato contenuto di umidità, come i rifiuti dei mercati ortofrutticoli per la produzione di compost di elevate specifiche qualitative (VALLINI *et al.*, 1990; VALLINI *et al.*, 1993).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

EPSTEIN E., WILLSON G.B., BURGE D.C., ENKIRI N.K. (1976). A forced aeration system for composting wastewater sludge. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 48: 688-694.

FINSTEIN M.S., CIRELLO J., MACGREGOR S.T., MILLER F.C., PSARIANOS K.M. (1980). Sludge composting and utilization: Rational approach to process control. (*Final Report to USEPA, NJDEP, CCMUA*) U.S. Dept. Of Commerce, NTIS, Springfield, VA, No. PB82136243.

FINSTEIN M.S., MILLER F.C., MACGREGOR S.T., PSARIANOS K.M. (1982). Sewage sludge composting: Process design and control. (*Final Report to USEPA, MERL/ORD*), Cincinnati.

FINSTEIN M.S., MILLER F.C., STROM P.F., MACGREGOR S.T., PSARIANOS K.M. (1983). Composting ecosystem management for waste treatment. *Bio/Technology*, 1(4): 347-353.

MACGREGOR S.T., MILLER F.C., PSARIANOS K.M., FINSTEIN M.S. (1981). Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. *Appl. Environ. Microbiol.*, 41: 1321-1330.

VALLINI G., PERA A., SORACE G., CECCHI C., MANETTI P. (1990). Green composting. *Bioycle*, 31(6): 33-35.

VALLINI G., PERA A., VALDRIGHI M., CECCHI F. (1993). Process constraints in source-collected vegetable waste composting. *Wat. Sci. Tech.*, 28(2): 229-236.

5. Le principali operazioni presso la stazione di compostaggio

Le operazioni relative al rivoltamento e/o alla aerazione del substrato organico in corso di compostaggio costituiscono solo un aspetto, per quanto importante, nell'ambito della filiera complessiva di produzione del compost.

Una volta adottate le misure per garantire il corretto andamento del processo di trasformazione biologica, produrre compost si riduce essenzialmente ad una serie di operazioni per la razionale gestione dei materiali. Una porzione cospicua degli investimenti per attrezzature e manodopera in un impianto di compostaggio riguarda, in molti casi, la movimentazione, il condizionamento fisico-meccanico, la miscelazione e la vagliatura sia delle matrici di partenza che del prodotto finale. Una filiera di trattamento e/o produzione presuppone che vi sia una successione di operazioni, di alcune delle quali è necessaria la ripetizione ad intervalli più o meno cadenzati.

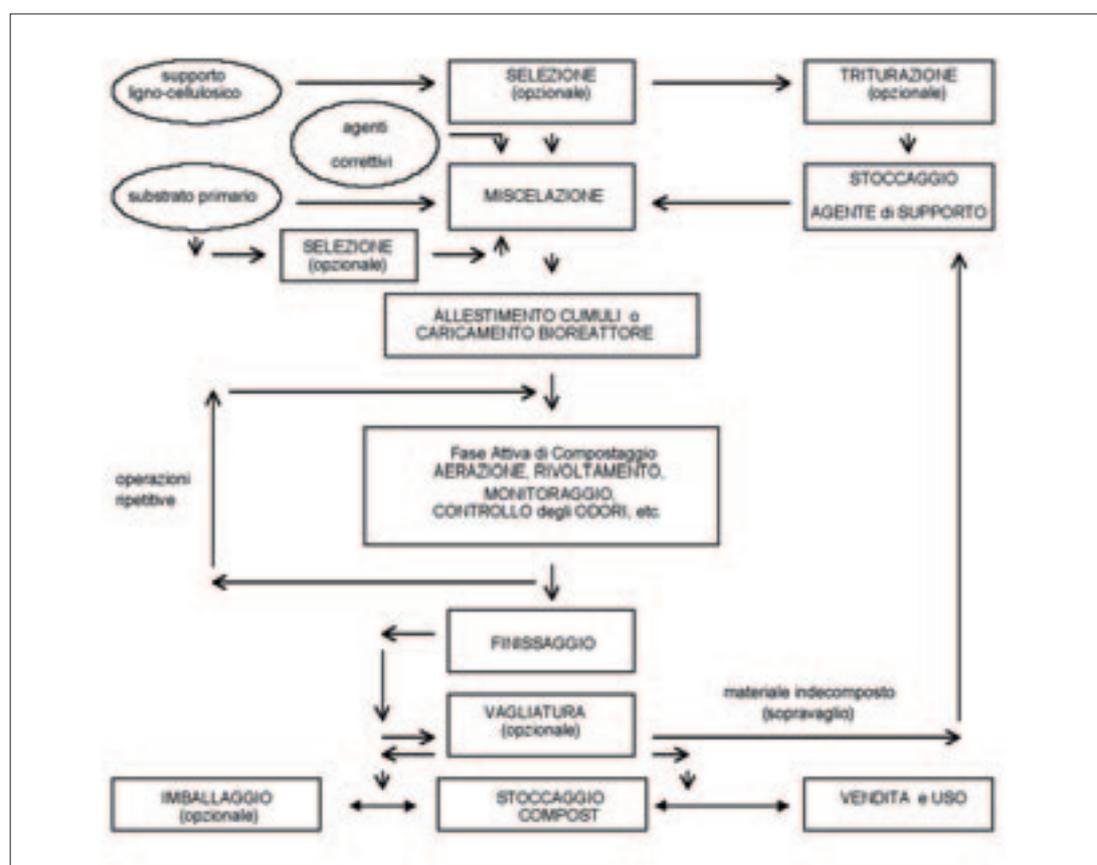


Figura 5.1 - Quadro di riferimento delle operazioni ricorrenti presso una stazione di compostaggio.

In *Figura 5.1*, sono illustrate le tipiche operazioni che rientrano nella organizzazione di uno schema per la produzione di compost e la ricorrente sequenza in cui dette operazioni vengono attuate. In aggiunta alla movimentazione, stoccaggio e selezione dei materiali organici conferiti alla stazione di compostaggio, sono spesso necessarie operazioni secondarie finalizzate al condizionamento dei substrati destinati alla biostabilizzazione, al recupero di materiali indecomposti dal compost finito o alla nobilitazione del compost ottenuto per incrementarne le possibilità di vendita e d'impiego. Operazioni secondarie sono la separazione delle componenti non desiderate dai substrati di partenza e dal compost (vagliatura), la riduzione di pezzatura delle matrici organiche grossolane (triturazione e/o sminuzzamento), l'imbballaggio del compost finito. Non tutte le operazioni secondarie rivestono, ovviamente, carattere di irrinunciabile necessità e devono essere comunque compatibili con i costi economici complessivi (RYNK, 1992; RICHARD, 1996).

5.1 Gestione delle materie prime oggetto di trattamento

5.1.1 Stoccaggio

Il compostaggio inizia con la raccolta ed il conferimento all'impianto della matrice organica che rappresenta il substrato principale oggetto del trattamento. Data la elevata fermentescibilità, il substrato principale non può essere di norma stoccato, se non per il tempo necessario alla sistemazione dello stesso nella sezione di compostaggio. Ciò significa che le matrici organiche putrescibili devono essere avviate al trattamento man mano che giungono all'impianto. Così facendo, si impedisce da una parte l'insorgenza di maleodoranze dovuta a fenomeni fermentativi e putrefattivi, dall'altra viene limitata la proliferazione di insetti e la presenza di roditori. Inoltre, al fine di evitare la dispersione di percolato, il substrato principale deve essere lavorato su apposito piazzale dotato di pavimentazione impermeabile e sistema di raccolta dei colaticci. Rappresentando la manipolazione di matrici putrescibili una fase comunque critica per la dispersione degli odori, è consigliabile prevedere la ricezione, l'eventuale triturazione e la miscelazione di questi rifiuti organici con altri ingredienti in strutture confinate, a meno che non si operi in luoghi lontani da insediamenti abitativi.

Lo stoccaggio della matrice organica principale diventa possibile, anche se per periodi di tempo limitati (alcune settimane), quando quest'ultima è costituita da un refluo acquoso (es. acque di vegetazione dei frantoi oleari), caratterizzato da fermentescibilità modesta, per il quale si prevede un trattamento mediante co-compostaggio con un substrato organico solido (es. residui pagliosi), previo assorbimento sullo stesso. Lo stoccaggio, in questo caso, può essere realizzato in vasche e depositi, concepiti per il contenimento degli odori e degli aerosol.

Gli agenti di supporto quali paglia, cippato di ramaglie, trucioli di legno, segatura ed altri substrati ligno-cellulosici, in ragione della lenta reattività all'attacco microbico, dovuta ad un elevato contenuto in carbonio ed a modesti contenuti di umidità, possono essere invece stoccati presso la stazione di compostaggio anche per lunghi periodi di tempo. Poiché, una volta bagnati, questi materiali cominciano a compostare, ancorché lentamente data la scarsità di azoto, è preferibile che siano accumulati sotto tettoie, o, se all'aperto, sotto teli impermeabili. Questi ultimi, tuttavia, rappresentano un impedimento alle normali operazioni di impiego degli agenti ligno-cellulosici. È inoltre importante sottolineare che la presenza presso l'impianto di matrici secche aumenta notevolmente il rischio di incendi. In condizioni di distanza contenuta dai luoghi di approvvigionamento delle matrici strutturanti, la situazione ottimale potrebbe dunque essere quella di mantenere, presso la stazione di compostaggio, una scorta di scarti ligno-cellulosici sufficiente per alcuni giorni, contando poi su rifornimenti programmati ripetuti, che evitino eccessivi accumuli.

Per quanto riguarda l'eventuale stoccaggio dei substrati con funzione di correttivo e/o additivo, valgono le stesse considerazioni fatte per l'ingrediente primario, qualora queste matrici siano esse stesse putrescibili (es. fanghi di depurazione). Nel caso in cui gli ingredienti correttivi siano costituiti da materiali inorganici (es. concimi o scorie minerali), lo stoccaggio non costituisce un problema, sempre che si usi l'accortezza di sistemare questi materiali al riparo dell'azione dilavante della pioggia.

5.1.2 Condizionamento fisico-meccanico (triturazione e dilacerazione)

Qualora i materiali di supporto ligno-cellulosici vengano conferiti all'impianto in forma grossolana, è indispensabile procedere ad una preliminare riduzione della pezzatura in modo da rendere queste matrici compatibili con la corretta preparazione delle miscele di partenza.

D'altra parte, può risultare necessario sminuzzare anche il substrato principale, solitamente umido e di scarsa consistenza (es. rifiuti dei mercati orto-frutticoli), qualora si presenti particolarmente disomogeneo.

È ovvio che le macchine destinate alla frantumazione ed allo sminuzzamento di materiali ligno-cellulosici dovranno vincere la resistenza meccanica elevata di queste matrici. In questi casi, si ricorre a trituratori a dischi uncinati (*hooked cutter disc grinder*) (Figura 5.2), a mulini a martelli (*hammer mill*) (Figura 5.3) o a trituratori a tramoggia rotante (*rotating tub grinder*) (Figura 5.4). È da notare che queste macchine sono tutte caratterizzate da un elevato numero di giri degli elementi frantumatori o di taglio.



Figura 5.2 - Vista interna di un trituratore a dischi rotanti uncinanti (*hooked cutter disc grinder*), impiegato nello sminuzzamento di residui di potatura.

Quando invece una matrice organica presenta scarsa resistenza ed elevato contenuto di umidità, se sottoposta ad energica sollecitazione meccanica, tende inevitabilmente a trasformarsi in poltiglia o, addirittura, in una sorta di purea. In tali circostanze è necessario ricorrere a macchine del tipo sminuzzatori (*shredder*) a pettini fissi su nastri convogliatori ovvero a dilaceratori a coltelli rotanti a basso numero di giri.

5.2 Formazione della miscela iniziale: allestimento dei cumuli o alimentazione del bioreattore

Una volta stabiliti i rapporti di miscela tra i diversi componenti della matrice da avviarsi a compostaggio (cfr. Cap. 3, 3.2), è necessario disporre di attrezzature che consentano la omogenea miscelazione degli ingredienti e, successivamente, una corretta disposizione in cumulo o una razionale alimentazione nell'eventuale bioreattore.

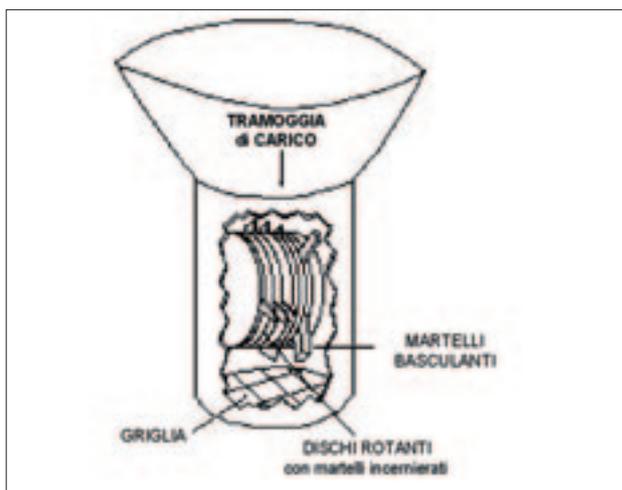


Figura 5.3 - Schema di funzionamento di mulino a martelli.

Con andane rivoltate e cumuli statici, la miscelazione e la costituzione dei cumuli sulle aie di compostaggio sono due operazioni necessariamente distinte. In particolare, nel caso dei cumuli statici aerati, la miscelazione rappresenta un punto nodale per garantire l'efficace trasformazione biologica della miscela di partenza. La miscelazione infatti avviene una sola volta e le caratteristiche che la matrice iniziale assume sono fondamentali per ciò che avverrà nell'intero corso del processo. Quando si opera invece con andane rivoltate, i successivi cicli di

movimentazione del substrato hanno il pregio di ripristinare, di volta in volta, la porosità della matrice in trasformazione.

Se gli ingredienti da miscelare sono soltanto due (*ad esempio* substrato principale e agente di supporto ligno-cellulosico) ed entrambi costituiti da materiali solidi, il rimescolamento mediante pala meccanica può risultare sufficiente.



Figura 5.4 - Trituratore a tramoggia rotante, per il condizionamento meccanico dei substrati organici destinati al compostaggio.

Per l'ottenimento di una omogenea miscela a più ingredienti, dei quali almeno uno in fase liquida, sono, invece, indicate macchine, a stazione fissa, del tipo trituratori a coclee controrotanti.

Dispositivi miscelatori a coclee possono anche essere allestiti su appositi carri spanditori sia semoventi che azionati da trattore. In questo caso, miscelazione e formazione dei cumuli avvengono in rapida successione, man mano che la macchina operatrice si muove sulla platea di compostaggio, grazie ad una bocca di scarico posteriore o laterale.

Anche in caso di compostaggio in bioreattore dinamico, cioè con movimentazione

della biomassa substrato all'interno del contenitore (cfr. Cap. 4, 4.2.3), è opportuno introdurre un substrato già bilanciato sia per quanto riguarda i nutrienti sia per quanto attiene al grado di struttura ed alla porosità. Lasciare alla sola azione degli organi di movimentazione interni al bioreattore il compito di miscelare e sminuzzare una matrice composita può creare inconvenienti anche gravi quali l'eccessivo compattamento di alcune porzioni del substrato ovvero la stratificazione dei vari ingredienti per classi granulometriche diverse.

Con i bioreattori, laddove non siano previsti dispositivi di caricamento mediante appositi nastri trasportatori di collegamento tra la tramoggia di accumulo della miscela iniziale e contenitore, il caricamento avverrà con l'ausilio di una pala meccanica a cucchiaio frontale.

5.3 Raffinazione, stoccaggio e nobilitazione del compost

5.3.1 Il finissaggio

Esauritasi la fase di compostaggio attivo, il prodotto stabilizzato richiede una fase di finissaggio della durata variabile da 2-3 settimane ad 1-2 mesi, a seconda del metodo di trattamento adottato. In questo arco di tempo la matrice stabilizzata subisce ancora importanti trasformazioni biologiche (es. humificazione e nitrificazione) e sviluppa le caratteristiche di un compost perfettamente maturo. Oltre che, giocoforza, nel caso del compostaggio in bioreattori, di solito, anche laddove viene attuato il compostaggio in cumuli o andane, la fase di finissaggio viene condotta in settori della stazione di trattamento differenti dalle aie di trasformazione attiva. Ciò consente di liberare spazio sulle platee di stabilizzazione dove andane e cumuli richiedono un maggior numero di interventi. Niente vieta, tuttavia, che in talune circostanze, lo stesso piazzale ospiti la matrice in trasformazione in tutti gli stadi di stabilizzazione.

Dal momento che nei cumuli destinati al finissaggio devono essere ancora garantite condizioni aerobiche al fine di consentire le reazioni necessarie all'ottenimento di un prodotto finale compatibile con l'impiego agricolo, grande attenzione deve essere rivolta alla dimensione dei cumuli stessi. Condizioni anaerobiche o fermentative portano infatti alla formazione di composti maleodoranti ed eventualmente tossici per le colture. Sebbene sia possibile prevedere per i cumuli di finissaggio sia il rivoltamento periodico che l'insufflazione forzata di aria, in molti casi si cerca di rendere meno onerosa questa fase operando in cumuli statici ad aerazione passiva, cioè basata sui soli moti convettivi dell'aria dall'esterno all'interno della matrice. In tali condizioni, l'altezza dei cumuli di finissaggio non dovrebbe mai superare i 2,5 m di altezza, con materiali sufficientemente pro-

si e 1,8 m con matrici più fini e compatte ovvero quando il compost sia destinato ad impieghi intensivi in ambito orto-floro-vivaistico. La larghezza dei cumuli dovrebbe invece essere compresa tra 4,5 e 6 m.

Il ristagno di umidità alla base dei cumuli costituisce una delle cause principali dell'insorgenza delle condizioni di anaerobiosi non desiderate. Poiché i cumuli di materiale stabilizzato in finissaggio non hanno la capacità di produrre calore sufficiente per consentire l'evaporazione dell'acqua in eccesso derivante dalle precipitazioni atmosferiche ovvero dalla corruzione superficiale delle acque meteoriche, è buona norma sistemare la matrice su piazzali pavimentati, dotati di sistema di drenaggio. Le acque piovane devono essere allontanate dai cumuli che, per altro, devono essere allestiti con andamento parallelo alla pendenza della platea di stoccaggio. Per risparmiare spazio, è consigliabile che i corridoi intercalati tra i cumuli siano piuttosto stretti (1-1,2 m), tali da consentire il solo passaggio di una persona per eventuali ispezioni e controlli.

Il finissaggio in piazzali all'aperto richiede, a seconda delle condizioni climatiche in cui opera la stazione di compostaggio, tempi medio-lunghi di stazionamento (1-2 mesi), mentre seppur con costi di investimento maggiori, la fase di finissaggio condotta in piazzali coperti da tettoie, evita gli inconvenienti derivanti da un andamento meteorologico eccessivamente piovoso. È infine possibile gestire la fase di finissaggio in maniera ottimale se, alla sistemazione dei cumuli in platea coperta, si abbina anche la ventilazione della matrice stabilizzata, mediante flusso continuo di bassi volumi d'aria, per mezzo di appositi sistemi di diffusione realizzati sul pavimento della platea stessa. Operando in tali condizioni, nonostante un incremento degli oneri di gestione specifici per questa sezione dell'intera filiera produttiva, è possibile ottenere un compost perfettamente maturo in 2-3 settimane.

5.3.2 *Lo stoccaggio del prodotto finito*

Una volta giunto a completa maturazione, a seguito della fase di finissaggio, il compost è pronto per essere avviato all'utilizzazione finale. Tuttavia l'uso e, quindi, la vendita del compost avvengono solitamente su base stagionale, con picchi in corrispondenza dei mesi primaverili e di quelli autunnali, e pertanto la stazione di compostaggio dovrà dotarsi di aree e strutture sufficienti per stoccaggi del prodotto finito derivante da almeno sei mesi di produzione.

Lo stoccaggio del prodotto finito può essere realizzato sia all'aperto che in strutture coperte, ed anche in questo caso le condizioni climatiche del sito influenzeranno la scelta. La dimensione dei cumuli di stoccaggio del compost maturo non risente più dei limiti imposti sia in fase di compostaggio attivo sia in fase di finissaggio. Tuttavia, tenendo conto dei rischi derivanti dai fenomeni di autocombustione, specialmente durante i mesi estivi, i cumuli non dovrebbero mai superare l'altezza di 3-4 m.

5.3.3 *La vagliatura*

Prima della commercializzazione, il compost può, talvolta, richiedere alcune manipolazioni necessarie per aumentarne la qualità e/o facilitarne la vendita e l'utilizzo da parte di uno spettro diversificato di potenziali utilizzatori.

Ad esempio, qualora la matrice di partenza sia stata approntata con il ricorso ad agenti strutturanti con dimensione delle particelle grossolana, una volta raggiunta la piena maturazione, il compost viene di solito sottoposto a vagliatura. Questa operazione consente, da una parte, di ottenere un prodotto finito più omogeneo e di granulometria idonea alle applicazioni più specialistiche (es. floricoltura, orticoltura, vivaismo), dall'altra, di recuperare il substrato ligno-cellulosico solo parzialmente decomposto per nuove miscele con l'ingrediente primario. La vagliatura ha infine il compito di eliminare dal prodotto finito eventuali frazioni contaminanti (es. frammenti di materiale plastico, inerti di varia natura), nei casi in cui queste siano presenti nel substrato umido di partenza.

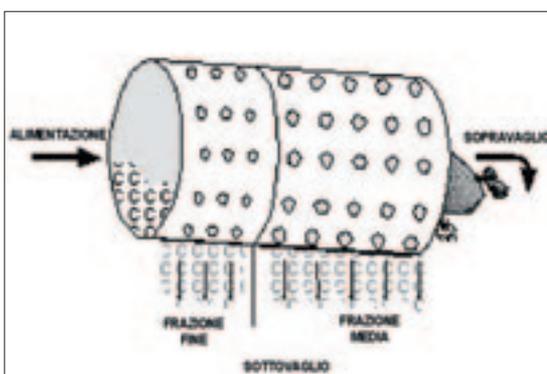


Figura 5.5 - Schema di funzionamento di un vaglio a tamburo rotante orizzontale (in alto) e fase di vagliatura del compost maturo (in basso).

Nella scelta del macchinario destinato alla vagliatura, è importante considerare la dimensione delle aperture dei vagli, la conformazione dei vagli in rapporto alla tipologia di particelle della matrice oggetto del trattamento, la suscettibilità all'occlusione dei fori, l'efficienza ed il costo.

Per la vagliatura finale del compost si opera, solitamente, con fori di 0,8-1,5 cm od anche più grandi a seconda del materiale da raffinare e della destinazione del prodotto finito. Fori di diametro più ridotto consentono una più spinta separazione tra porzione fine della matrice oggetto di vagliatura e le componenti più grossolane. Ciò diminuisce però la capacità di trattamento (m^3/h) del vaglio ed aumenta i rischi di occlusione.

L'efficacia di un vaglio è invece correlata alla sua capacità di separare le particelle della matrice nelle frazioni granulometriche desiderate. Quindi essa diminuisce quando particelle più grandi di quelle desiderate passano attraverso il vaglio ovvero quando particelle con dimensioni corrispondenti alla frazione voluta rimangono al di sopra della superficie di vagliatura.

Sia la capacità che l'efficacia dipendono dal tasso di alimentazione del vaglio rispetto alla superficie vagliante utile ($m^3/m^2/h$) e dalla

dimensione dei fori. Le condizioni ottimali si raggiungono nel giusto compromesso tra qualità del materiale affinato e quantità dello stesso ottenuta nell'unità di tempo.

È da notare inoltre che i vagli funzionano meglio se alimentati con materiale più secco e pertanto, come già accennato, è preferibile condurre l'operazione di vagliatura dopo la fase di finissaggio. Per evitare problemi ricorrenti di impaccamento della matrice trattata e di ostruzione delle aperture dei vagli, il compost sottoposto a vagliatura dovrebbe avere un'umidità non superiore al 45%. Al fine di ovviare ai fenomeni di impaccamento, alcune tipologie di vaglio presentano apparati per la preventiva rottura e miscelazione dei grumi di compost prima che questo passi alla vagliatura vera e propria.

Esistono numerosi tipi di vagli utilizzabili per l'affinamento del compost maturo. Tra i più diffusi si ricordano i vagli a tamburo o cilindro inclinato rotante ed i vagli oscillanti o vibranti.

I primi, la cui superficie curva è dotata di fori, possono essere aperti o racchiusi in una scocca di protezione. In quest'ultimo caso, un'apertura longitudinale è presente nella parte inferiore per la raccolta del materiale fine in uscita dai fori. I vagli a cilindro rotante sono solitamente dotati di un dispositivo di carico all'estremità più elevata e presentano alette interne per consentire l'avanzamento della matrice lungo l'asse longitudinale, fino all'estremità posta più in basso, dalla quale fuoriesce il materiale grossolano. Essi, talvolta, presentano anche sistemi di spazzole che, ruotando a contatto della porzione d'arco superiore del vaglio, ad ogni giro del tamburo, consentono di liberare i fori da eventuali occlusioni.

I vagli oscillanti o vibranti usano invece movimenti di scuotimento ed agitazione più o meno intensi per incrementare la separazione delle frazioni a diversa granulometria, man mano che la matrice in trat-

tamento scivola lungo le superfici vaglianti inclinate. La differenza tra vagli oscillanti e vibranti consiste nella velocità e nella frequenza dei movimenti impressi alle superfici dotate di fori. Con questo tipo di vagli è possibile, disponendo in serie superfici agitate recanti aperture di dimensioni man mano crescenti, separare anche più di due classi granulometriche differenti. I vagli vibranti, in particolar modo, riescono a separare in maniera soddisfacente anche materiali con umidità intorno al 50-55 %.

5.3.4 Aggiunta di additivi e confezionamento

Le proprietà di un compost raffinato, a seconda delle esigenze di impiego, possono essere migliorate mediante l'integrazione di elementi fertilizzanti o di correttivi del pH. Questa ulteriore operazione di nobilitazione viene attuata soltanto in presenza di un mercato particolarmente esigente e disposto a farsi carico dei costi aggiuntivi inevitabili per l'ottenimento di un prodotto che risulta essere necessariamente disegnato per settori produttivi ad elevato reddito. Per l'omogenea incorporazione degli additivi, possono essere impiegati macchinari simili a quelli adottati per la preparazione delle mescole iniziali destinate alla stabilizzazione (cfr. Cap. 5, 5.2).

Altra operazione che può rivelarsi vantaggiosa in vista della commercializzazione del compost è rappresentata dal confezionamento del prodotto. In effetti, il compost venduto in sacchetti o in altra tipologia di contenitori spunta sul mercato prezzi decisamente più alti rispetto al materiale venduto sfuso, in grandi quantità. A ciò deve aggiungersi il fatto che un compost insacchettato è più facilmente gestibile in fase di stoccaggio e di manipolazione prima dell'utilizzo.

Dal momento che una stazione di compostaggio deve mirare prima di tutto a distribuire, nel minor tempo possibile, il prodotto ottenuto dalla continua trasformazione dei rifiuti organici trattati, la vendita di partite consistenti di compost sfuso rimane la via principale per evitare eccessivi stoccaggi. Di solito, per applicazioni in pieno campo ovvero per gli impieghi nelle aziende floro-vivaistiche o di produzione orticola in coltura protetta, sono gli utilizzatori stessi che si approvvigionano di partite di materiale non confezionato direttamente presso l'impianto di produzione. Il compost sfuso può essere stoccato senza eccessivi problemi nell'ambito dell'azienda agricola e gestito facilmente, in sede di distribuzione, con il macchinario aziendale.

Il compost confezionato è invece normalmente destinato al mercato del giardinaggio, della floricoltura hobbistica e dell'agricoltura a carattere familiare. Questi settori richiedono prodotti disponibili nelle tipologie compatibili con una diffusa esigenza di quantitativi medio-piccoli. La commercializzazione del compost confezionato deve perciò avvalersi giocoforza di un collaudato sistema di distribuzione che, in generale, la stazione di compostaggio non è in grado di gestire in maniera diretta. Si ricorre, in questi casi, a convenzioni con grandi catene di distribuzione, alle quali il gestore dell'impianto di compostaggio trasferisce tutti gli oneri della commercializzazione capillare, contando, al tempo stesso, su acquisti programmati certi.

È evidente che la stazione di compostaggio, soltanto in presenza di strategie definite e prospettive chiare di commercializzazione del prodotto, può caricare il compost dei costi aggiuntivi derivanti dall'allestimento di una linea di imballaggio, eventualmente corredata anche da apposito impianto di pellettizzazione.

In conclusione, è bene ricordare che il confezionamento in sacchi di film plastico può applicarsi a compost con tenore di umidità non superiore al 35 %.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

RICHARD T.L. (1996). Municipal solid waste composting: Physical processing. *Technical Series*, Dept. of Agricultural & Biological Engineering - New York State College of Agriculture and Life Sciences, Cornell University, Ithaca, NY.

RYNK R., a cura di (1992). *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES) - Cooperative Extension, Ithaca, NY.

6. Gestione del ciclo di produzione del compost: controllo del processo e contenimento dei potenziali fattori negativi

Attuare il compostaggio senza un accurato controllo delle operazioni, può portare all'insorgenza di problemi di carattere ambientale ed igienico-sanitario, nonché a rischi legati alla sicurezza degli operatori. I responsabili della progettazione della stazione di compostaggio ed i gestori della stessa devono essere consapevoli di queste possibili complicazioni prima di prendere qualsiasi tipo di decisione, in modo da evitare i suddetti inconvenienti. In verità, in anni recenti, la chiusura di un numero non trascurabile di impianti di compostaggio è stata causata proprio dall'insorgenza di problemi della stessa natura di quelli sopra ricordati, primo fra tutti, il rilascio di emissioni maleodoranti.

6.1 Generazione e controllo degli odori

La formazione ed il rilascio di odori costituisce uno dei punti più critici di una qualsiasi stazione di compostaggio. A questo proposito è importante conoscere le diverse situazioni che possono portare alla generazione di emissioni maleodoranti in modo da rendere possibili interventi di prevenzione e/o mitigazione sia a livello delle condizioni di processo, sia sulle caratteristiche delle strutture impiantistiche.

6.1.1 Ricorrenza e caratteristiche del problema

Gli odori possono generarsi in coincidenza di tappe differenti dell'intera filiera di compostaggio. La natura specifica delle matrici organiche trattate influisce sensibilmente sulla formazione degli odori. Ad esempio, materiali come fanghi di depurazione e residui della lavorazione dei prodotti ittici spesso si rendono responsabili di intense emissioni maleodoranti, sin dalle prime operazioni legate al ciclo di produzione del compost. Addirittura, il rilascio di odori può costituire un serio problema già a livello di raccolta e trasporto delle matrici organiche, prima ancora che queste raggiungano l'impianto di compostaggio. È dunque importante organizzare le operazioni di asporto e di conferimento dei rifiuti secondo cadenze temporali e con mezzi che limitino al massimo questo inconveniente. Più elevata è la natura putrescibile e, quindi, odorigena dei materiali trattati, maggiore dovrà essere l'attenzione circa la necessità di aumentare il più possibile le cadenze di asporto presso i punti di accumulo (es. mercati, cassonetti stradali, ecc.), dove, peraltro, sarà importante garantire una sistematica pulizia dei contenitori adibiti allo stoccaggio provvisorio. Allo stesso modo, i veicoli impiegati per la raccolta dovranno garantire il contenimento più ermetico possibile dei materiali asportati. Soprattutto dovrà essere curata l'assoluta tenuta rispetto a qualsiasi rilascio di percolato.

Una volta arrivati alla stazione di compostaggio, i materiali organici dovranno essere movimentati e manipolati (es. ridotti in pezzatura, miscelati con matrici di supporto ligno-cellulosiche, ecc.) al fine di ottenere il substrato di partenza ottimale per il processo di stabilizzazione (cfr. Cap. 5, 5.1 e 5.2). Queste operazioni preliminari, rappresentano un fase molto delicata rispetto alla possibile emissione di odori. Laddove, perciò, le condizioni ambientali in cui si trova ad operare la stazione di compostaggio non diano sufficiente garanzia circa una efficiente e rapida diluizione degli odori in atmosfera, lontano da insediamenti abitativi, è consigliabile confinare questa fase in strutture chiuse, la cui aria interna verrà trattata prima del rilascio all'esterno.

Ma è soprattutto l'impropria gestione delle reazioni biologiche, alla base del processo di compostaggio, che rappresenta la fase a maggior rischio di emissioni di odori (KISSEL *et al.*, 1992). Questi ultimi vengono infatti generati sia a seguito del tipo di metabolismo microbico prevalente all'interno della matrice in trasformazione, sia come conseguenza di reazioni di natura strettamente chimica. Gli odori, inoltre, seppur dipendano, in generale, dalla presenza di composti gassosi o volatili, possono anche essere associati a microparticelle solide, costituenti le polveri.

Come più volte accennato l'instaurarsi di condizioni anaerobiche incrementa la formazione di composti maleodoranti quali acidi organici, mercaptani, alcoli, amine, idrogeno solforato ed altre sostanze odorigene (DIAZ, 1987; WILLIAMS & MILLER, 1992a). Alcuni dei principali composti responsabili delle emissioni maleodoranti presso le stazioni di compostaggio sono riportati in *Tabella 6.1*.

Tabella 6.1 - Composti ritenuti maggiormente responsabili delle emissioni di odori presso gli impianti di compostaggio

Composti contenenti zolfo	
Idrogeno solforato Ossisolfuro di carbonio Disolfuro di carbonio Dimetil solfuro	Dimetil disolfuro Dimetil trisolfuro Metantiolo Etantiolo
Composti contenenti azoto	
Ammoniaca Aminometano Dimetilamina	Trimetilamina 3-metilindolo (scatolo)
Acidi grassi volatili	
Acido formico Acido acetico Acido propionico	Acido butirrico Acido valerico Acido iso-valerico
Chetoni	
Propanone (acetone) Butanone	2-pentanone
Altri composti	
Benzothioazolo Etanale (acetaldeide)	Fenolo

Fonte: Williams & Miller, 1992a.

Ancorché lunga sia la lista delle sostanze potenzialmente coinvolte nella generazione di odori, sul fronte delle emissioni maleodoranti, i problemi più ricorrenti per un impianto di compostaggio sono riconducibili, nella maggior parte dei casi, alla formazione di composti ridotti dello zolfo e dell'azoto, nonché alla presenza di acidi grassi volatili.

Composti odorigeni contenenti zolfo possono formarsi durante la trasformazione delle matrici sottoposte a compostaggio a seguito di reazioni fermentative a carico delle sostanze solforate dei substrati organici (es. aminoacidi come cistina e metionina), oppure per la presenza di solfati, in condizioni di scarsa ossigenazione che stimolano la respirazione anaerobica delle forme ossidate dello zolfo da parte di alcune specie microbiche. Giova ricordare che, in condizioni di respirazione aerobica, tipiche di un corretto andamento del compostaggio, si formano quantità trascurabili di composti solforati volatili.

Come sopra accennato, ai fastidi legati alla emissione di odori, contribuiscono anche gli acidi grassi volatili. Questi si generano come prodotti del metabolismo fermentativo dei carboidrati e si accumulano quindi, principalmente, in condizioni anaerobiche.

Sebbene l'insorgenza di emissioni maleodoranti sia di solito associata al crearsi di condizioni anossiche all'interno della matrice in compostaggio, anche la corretta evoluzione delle reazioni di stabilizzazione, secondo le vie della degradazione aerobica, genera odori. Ciò è particolarmente vero per quel che riguarda la volatilizzazione dell'ammoniaca. La decomposizione delle proteine porta infatti alla formazione di ammoniaca o di ammonio attraverso il processo noto come ammonificazione (cfr. Cap. 2, 2.5.2). NH_4^+ e NH_3 subiscono poi reazioni di interconversione sulla base

delle condizioni di pH del mezzo. NH_4^+ è la forma prevalente in condizioni acide mentre la presenza di NH_3 è favorita da un ambiente basico. La tensione di vapore dell'ammoniaca (NH_3) è bassa e, di conseguenza questa volatilizza facilmente anche a basse temperature.

Un complesso di fattori edafici ed ambientali (cfr. Cap. 2, 2.4) finisce per influenzare la quantità ed il tipo di composti odorigeni prodotti nel corso del compostaggio e la possibilità che questi vengano rilasciati in atmosfera. La composizione chimica della miscela iniziale, la concentrazione di ossigeno nel corso del processo, il tasso di diffusione dell'ossigeno, la dimensione delle particelle del substrato, il contenuto di umidità e la temperatura sono, dunque, tutti fattori che condizionano la formazione di odori. Le temperature elevate, per esempio, facilitano il rilascio di composti odorigeni determinando un aumento della pressione di vapore. Esse, inoltre, rendono più difficile il mantenimento delle condizioni di degradazione aerobica all'interno della matrice in trasformazione e incrementano la cinetica delle reazioni non biologiche che generano sostanze maleodoranti. La formazione di composti odorigeni all'interno del substrato in compostaggio non significa però, necessariamente, che le stesse sostanze siano rilasciate in atmosfera. Questi composti possono migrare infatti attraverso il profilo della massa in trasformazione ed essere quindi degradati. Un caso esemplare è quello dell'idrogeno solforato (H_2S) il quale, se prodotto in zone scarsamente ossigenate della matrice organica, può essere convertito in zolfo elementare, una volta passato in condizioni aerobiche. Soltanto nei casi in cui ciò non si verifichi, allora i composti odorigeni sono rilasciati in atmosfera dando luogo alle emissioni maleodoranti.

6.1.2 Misure di prevenzione ed abbattimento delle emissioni maleodoranti

Nello stadio di progettazione della stazione di compostaggio, è necessario che siano analizzate accuratamente le condizioni operative attraverso le quali verrà attuata l'intera filiera di trattamento delle matrici organiche. All'interno di questa pianificazione dovrà essere, da subito, sviluppata una strategia di prevenzione e controllo delle emissioni maleodoranti. Nel caso in cui, pur in presenza di azioni mirate, permangano problemi legati all'insorgenza di odori, si dovrà procedere alle seguenti verifiche:

- Identificazione delle principali sorgenti degli odori.
- Identificazione dell'intensità, della frequenza, delle caratteristiche e delle condizioni meteorologiche associate all'insorgenza di odori. (Ogni stazione di compostaggio dovrebbe, auspicabilmente, stabilire "una emissione odorigena standard" al di sopra della quale i residenti potrebbero denunciare l'odore come reale fastidio. Un gruppo di verifica organolettica degli odori, costituito da membri (volontari o designati) della popolazione interessata, finalizzato alla individuazione del livello di accettabilità della comunità, può, in tal senso, aiutare a valutare la reale intensità dell'odore e la possibilità che questo sia avvertito tra i residenti).
- Fissazione dei limiti per le emissioni odorigene nel sito interessato all'attività di compostaggio, a fronte dei massimi consentiti, per gli stessi odori, nel contesto ambientale più generale.
- Rilevazione del tasso di rilascio degli odori dalle sorgenti sospette mediante comparazione con i limiti di emissione consentiti.
- Individuazione delle opportune misure di prevenzione e/o mitigazione degli odori a livello di ogni potenziale sorgente.

Come già accennato in precedenza (cfr. 6.1.1), causa degli odori possono essere vari composti presenti nei substrati organici oggetto di trattamento. Questi odori possono essere generati in stadi diversi della filiera di trasformazione in compost dei rifiuti fermentescibili: durante la raccolta ed il conferimento, nelle fasi preparatorie della miscela iniziale, in corso di stabilizzazione ma

anche durante il finissaggio e lo stoccaggio del prodotto finale. Esistono metodi sia per misurare la quantità, l'intensità, il carattere pervasivo, il tasso di rilascio ed il trasporto degli odori, sia per fissare adeguati standard di riferimento per gli odori stessi. La quantità di odore, per esempio, può essere espressa come il numero di diluizioni necessarie (ED, *effective dilutions*) tali per cui il 50% di un gruppo di verifica organolettica, costituito da dieci persone, sia ancora in grado di percepire l'odore oggetto d'indagine. Questa quantità è conosciuta come ED₅₀. Gli standard di riferimento per gli odori possono anche essere stabiliti sulla base di misure olfattometriche (es. ED₁₀), sulla scorta del numero di disturbi registrati ovvero in riferimento a precisi limiti fissati per legge. Da non trascurare sono anche i dati relativi alle condizioni meteorologiche tipiche del sito in cui si opera, quali la direzione e la velocità dei venti prevalenti, la temperatura e le condizioni di inversione. Questi rappresentano importanti elementi che finiscono per influenzare i fenomeni legati alla emissione ed alla percezione degli odori. Per informazioni più approfondite sui metodi di misura e di definizione degli standard di riferimento degli odori si rimanda al documento dell'Environmental Protection Agency (EPA) americana *Draft Guidelines for Controlling Sewage Sludge Composting Odors* (USEPA, 1992) ed al più recente manuale *Control of Composting Odors* (WALKER, 1993).

I metodi scelti per il controllo delle emissioni odorigene dipendono dalla sorgente degli odori, dal grado di abbattimento degli odori richiesto e dalle caratteristiche dei composti responsabili delle emissioni maleodoranti stesse. Gli interventi per la riduzione degli odori devono comprendere sia misure di prevenzione che sistemi di trattamento delle emissioni. In aggiunta agli accorgimenti, di seguito riportati, esplicitamente mirati alla captazione degli odori a livello delle diverse sorgenti od al trattamento delle emissioni, il rigoroso monitoraggio ed il controllo del processo di compostaggio aiuteranno ad evitare l'instaurarsi di condizioni anaerobiche e, di conseguenza, a limitare il rilascio di odori. Anche se il compostaggio in bioreattori pone tendenzialmente minori problemi di emissioni maleodoranti, nondimeno, in questi casi, il processo dovrà essere governato correttamente. Infine, una accurata scelta della localizzazione della stazione di compostaggio ed il coinvolgimento attivo delle popolazioni interessate, sia nelle fasi di progettazione che durante la gestione dell'impianto, possono contribuire a minimizzare i problemi derivanti dal rilascio di odori (cfr. Cap. 7, 7.1 e 7.2).

6.1.2.1 Sistemi di prevenzione basati sulla gestione della filiera di trasformazione

Presso le stazioni di compostaggio, dove vengono trattati rifiuti organici da raccolta differenziata ovvero altro tipo di residui ad elevata fermentescibilità, è importante ridurre quanto più possibile i tempi di stazionamento delle matrici in questione sui piazzali di scarico e di stoccaggio transitorio. I responsabili della raccolta devono perciò provvedere affinché il materiale sia conferito all'impianto senza creare accumuli di matrice fresca che non sia immediatamente preparata per la fase di compostaggio attivo. A meno che l'impianto non funzioni anche su turni festivi, è quindi buona norma sospendere la ricezione dei rifiuti durante la pausa di fine settimana.

Per il resto, gli altri accorgimenti che consentono di prevenire la possibile formazione di odori sono:

- un pronto allestimento dei cumuli ovvero il rapido trasferimento della biomassa substrato nell'eventuale bioreattore;
- la verifica che la matrice in fase di compostaggio attivo sia nelle condizioni ottimali di aerazione, tali da evitare il formarsi di zone anaerobiche;
- l'attuazione degli eventuali turni di rivoltamento della biomassa substrato in coincidenza con venti favorevoli la rapida diluizione e dispersione delle emissioni odorigene in direzione opposta a quella degli insediamenti civili;
- assicurare, laddove il compostaggio avvenga in cumuli statici, la copertura degli stessi con uno strato superficiale (5-10 cm) di compost maturo;

- evitare la formazione di ristagni di percolato alla base dei cumuli o al fondo del bioreattore;
- il confinamento della fase attiva di compostaggio in strutture chiuse, la cui aria possa essere captata e convogliata in speciali apparati di trattamento dei composti odorigeni (cfr. di seguito: *Sistemi tecnologici di abbattimento*)

6.1.2.2 Sistemi tecnologici di abbattimento

Laddove, in condizioni di corretta gestione del processo, le misure di prevenzione non risultino ancora adeguate ad un sufficiente controllo degli odori è possibile ricorrere a sistemi tecnologici più o meno sofisticati. Presupposto affinché questi sistemi possano essere applicati è che le emissioni rilasciate dai materiali in compostaggio siano intercettate. Ciò significa che le operazioni potenzialmente a rischio per la formazione di odori dovranno essere condotte in ambiente confinato, dal quale sia possibile evacuare l'aria arricchitasi di composti maleodoranti.

Le principali tipologie di apparati per l'abbattimento delle emissioni odorigene, oggi adottate presso le stazioni di compostaggio a più elevato contenuto tecnologico, sono rappresentate essenzialmente dai *biofiltri* e dalle *torri di lavaggio (scrubbers ad umido)*. Per il trattamento delle emissioni maleodoranti sono stati proposti anche l'*assorbimento* su carbone attivo od altri materiali ad elevata capacità di trattenimento o la *combustione* dei composti odorigeni. Questi ultimi sistemi, benché risultati molto efficaci, con rese di abbattimento intorno al 99%, non hanno tuttavia trovato pratica applicazione a causa degli eccessivi costi complessivi di trattamento.

I biofiltri sono stati originariamente concepiti per il trattamento di composti odorigeni e di sostanze volatili tossiche (es. solventi organici) presso un'ampia varietà di impianti industriali. Con l'espansione del compostaggio quale metodo di trattamento e recupero di rifiuti organici, il campo di impiego di questi sistemi si è grandemente dilatato, stimolando la messa a punto di nuove soluzioni tecnologiche oggi disponibili sul mercato (WILLIAMS & MILLER, 1992b).

Lo schema generale di un apparato per biofiltrazione consiste di un sistema di adduzione dell'aria contenente i composti odorigeni ad una unità riempita con un substrato particolato filtrante costituito da compost maturo, terreno o anche da materiale inerte che consenta la formazione di uno strato di biomassa microbica attiva (biofilm) sulla superficie delle particelle. Il flusso da trattare viene finemente distribuito attraverso il mezzo filtrante mediante una rete di tubi dotati di piccoli fori di diffusione posta al fondo del biofiltro. Per evitare l'occlusione dei fori da parte della sovrastante colonna di matrice filtrante, la rete di tubi diffusori è, di solito, immersa in uno strato di ghiaia o altro materiale poroso, dotato di resistenza meccanica allo schiacciamento. L'aria carica di odori in entrata al biofiltro viene generalmente umidificata in modo da evitare la disidratazione del substrato biologicamente attivo.

Come il flusso odorigeno si diffonde attraverso il mezzo filtrante, i composti gassosi responsabili degli odori vengono adsorbiti sulla superficie delle particelle dove vengono degradati dai microrganismi colonizzatori della superficie. Le matrici filtranti contengono un'elevata carica microbica, di norma nell'ordine, rispettivamente, di 10^9 batteri ed attinomiceti e di 10^5 funghi per grammo di materiale. Questi microrganismi ossidano i composti odorigeni in anidride carbonica, acqua e forme minerali inodori di azoto e zolfo, prima che il flusso d'aria fuoriesca dal biofiltro (BOHN & BOHN, 1987). Le matrici di riempimento dei biofiltri costituiscono il supporto fisico per le cellule microbiche e, nel caso di substrati organici quali il compost, sono anche fonte di nutrienti per i microrganismi che degradano i composti odorigeni. Quando i biofiltri sono invece riempiti con matrici particolate inerti, il substrato di crescita per i microrganismi è costituito dalle stesse molecole odorigene che devono essere abbattute. In questi casi è però necessaria una fase preliminare di attivazione del biofiltro, il quale viene alimentato con un flusso gassoso umido contenente sostanze organiche e minerali in grado di sostenere la colonizzazione delle particelle da parte di un'abbondante flora microbica, a questo punto in grado di mineralizzare i composti odorigeni nel flus-

so gassoso oggetto di trattamento. Oltre alla necessaria presenza dei catalizzatori biologici (i microorganismi), la biofiltrazione si avvale di due importanti fenomeni che sono l'adsorbimento e l'assorbimento (NAYLOR et al., 1988). L'adsorbimento è il processo per cui le molecole volatili odorogene, gli aerosol ed, eventualmente, il particolato in sospensione nel flusso gassoso sono trattiene e si concentrano sulla superficie delle particelle della matrice filtrante a seguito di attrazioni molecolari. L'assorbimento è invece il processo per cui i composti gassosi odorogeni si dissolvono nel sottile film acquoso che contorna la superficie delle particelle del materiale filtrante. Non appena i microorganismi ossidano le sostanze responsabili degli odori, i siti di adsorbimento all'interno della matrice di riempimento del biofiltro tornano ad essere disponibili per catturare nuove molecole di composti odorogeni trasportati dal flusso d'aria. Ciò determina l'auto-sostentamento del processo, prolungando la capacità filtrante del biofiltro.

Differenti tipi di biofiltri sono stati, di volta in volta, impegnati presso le stazioni di compostaggio. In sintesi, è possibile operare una generale distinzione tra sistemi di biofiltrazione aperti e sistemi chiusi.

In un biofiltro aperto, la matrice filtrante viene normalmente collocata in apposito contenitore collocato sulla superficie del suolo o in una vasca scavata nel terreno. In entrambi i casi, al fondo della struttura aperta di contenimento è sistemato il sistema di tubazioni per l'adduzione del flusso gassoso da trattare, ospitato in un letto di gaia. In entrata al biofiltro, può essere collocata, se necessaria, la sezione di umidificazione dell'aria in ingresso. La vasca viene poi riempita con la matrice filtrante.

Un sistema di biofiltrazione chiuso è invece simile ad un vero e proprio bioreattore, completamente isolato dall'ambiente esterno, solitamente fuori terra, nel quale viene fatta passare l'aria oggetto di trattamento. Al fondo del biofiltro, i tubi di adduzione del flusso gassoso sono collocati in un intercapedine sovrastata da un setto metallico dotato di fori, sul quale è sistemato il mezzo filtrante. Quest'ultimo può essere arrangiato come un unico letto continuo ovvero disposto lungo l'altezza del reattore su ripiani, anch'essi dotati di fori, in modo da ottenere, all'interno del biofiltro, più strati di letto filtrante intercalati da settori vuoti. Finalmente, il flusso gassoso trattato fuoriesce dalla testa del reattore, nella quale viene mantenuto uno spazio in cui può essere eventualmente presente un sistema di nebulizzatori per l'umidificazione dell'aria e la possibile distribuzione di soluzione nutriente sulla matrice filtrante.

La tipologia di biofiltro da adottare dipenderà dalla disponibilità di spazio presso la stazione di compostaggio, dalle condizioni climatiche del sito di insediamento dell'impianto e dalle risorse finanziarie. I biofiltri aperti richiedono, ovviamente, maggiori superfici e non sono indicati per situazioni di elevata piovosità. I biofiltri chiusi, ancorché più efficienti e controllabili, sono però decisamente più costosi.

Per un efficace controllo degli odori mediante l'impiego di biofiltri, è fondamentale tenere in considerazione alcune indicazioni:

- Sia il contenitore che la matrice filtrante devono avere caratteristiche tali da garantire un ambiente favorevole per la crescita microbica. Il contenuto di umidità all'interno del materiale di riempimento deve essere funzionale ad un intenso metabolismo microbico di tipo ossidativo. Mantenere il giusto tenore di umidità nel biofiltro non è cosa semplice.
- La matrice filtrante deve avere un'ampia superficie attiva e, al tempo stesso, essere altamente porosa. Ciò spesso comporta il ricorso alla miscelazione di materiali biologicamente attivi caratterizzati da particelle fini (es. suolo) con matrici strutturanti più grossolane (es. compost, scaglie di materiale ligno-cellulosico, pallini di polistirene).
- Il mezzo filtrante deve possedere un'adeguata capacità tampone nei confronti del pH in modo da prevenire fenomeni di acidificazione, dovuta, per esempio, ad un eccessivo accumulo di solfati.

- Il compattamento della matrice filtrante deve essere scongiurato per tutto il tempo di funzionamento del biofiltro.
- L'uniforme distribuzione del flusso gassoso da trattare deve essere garantito all'interno della matrice filtrante. Se, infatti, si venissero a formare canali di flusso preferenziali, l'efficienza del biofiltro ne risulterebbe drasticamente ridotta, con rischio di inadeguato controllo degli odori.

In *Tabella 6.2* sono presentati i valori della capacità massima di rimozione relativa a differenti matrici filtranti nei confronti di alcuni composti odorigeni trattati in biofiltro.

Per quanto riguarda i costi relativi alla biofiltrazione, le indicazioni deducibili dalla letteratura, indicano investimenti iniziali dell'ordine di 180.000-230.000 Lire per m³ di aria passante attraverso il biofiltro per minuto (BOHN & BOHN, 1987). È comunque da sottolineare come i biofiltri presentino minor costi di installazione e ancor più ridotti costi di esercizio e mantenimento rispetto ad altri sistemi di trattamento degli odori, quali gli *scrubbers* a umido (*cf.* sotto).

Tabella 6.2 - Tassi di rimozione relativi ad alcuni composti odorigeni, passati attraverso biofiltri contenenti matrici filtranti differenti

Composto	Tasso massimo di rimozione
Metilformiato	35 g/kg p.s. di mezzo ¹ /die
Iidrogeno solforato	5 g S/ kg p.s. di mezzo /die
Butilacetato	2,14 g/ kg p.s. di torba/die
Butanolo	2,41 g/ kg p.s. di torba/die
n-butanol	2,40 g/ kg p.s. di compost/die
Etilacetato	2,03 g/ kg p.s. di torba/die
Toluene	1,58 g/ kg p.s. di torba/die
Metanol	1,35 g/ kg p.s. di mezzo /die
Metantiolo	0,9 g S/ kg p.s. di torba/die
Dimetil disolfuro	0,68 g S/ kg p.s. di torba/die
Dimetil solfuro	0,38 g S/ kg p.s. di torba/die
Ammoniaca	0,16 g N/ kg p.s. di torba/die

¹ non altrimenti specificato, con densità apparente di 200 Kg/m³.
p.s., peso secco: Williams & Miller, 1992a.

Gli *scrubbers* ad umido si basano sull'impiego di soluzioni di lavaggio per rimuovere i composti odorigeni presenti nel flusso gassoso, mediante assorbimento e successiva ossidazione di queste sostanze. Esiste una vasta gamma di *scrubbers*. Nei sistemi costituiti dalle cosiddette torri impaccate, il liquido di lavaggio viene ripartito in film sottile che si muove lentamente sulla superficie del mezzo di riempimento. L'aria da trattare è, di solito, introdotta dal fondo della torre e fluisce verso l'alto attraverso il materiale di riempimento, in controcorrente rispetto alla soluzione di lavaggio (LANG & JAGER, 1992). Quest'ultima viene normalmente ricircolata per minimizzarne il consumo (ELLIS, 1991). Negli *scrubbers* cosiddetti a nebbia, invece, la soluzione di lavaggio è atomizzata in goccioline finissime le quali sono disperse, all'interno di una camera di contatto, attraverso il flusso d'aria oggetto di trattamento. Le goccioline caricate dei composti odorigeni precipitano al fondo della camera, dalla quale il liquido di lavaggio accumulatosi viene continuamente rimosso (ELLIS, 1991; LANG & JAGER, 1992).

In taluni casi, sono stati proposti i cosiddetti *scrubbers* a stadi multipli, nei quali il flusso gassoso da trattare viene sottoposto a lavaggi con soluzioni diverse, mirate all'abbattimento differenziato dei vari composti odorigeni. Costituisce un esempio di questa nuova tendenza quanto adottato presso le strutture dell'impianto regionale di compostaggio sito nella contea di Montgomery (Maryland). Qui, a seguito di investigazioni da parte della Washington Suburban Sanitary Commission, è stato

identificato nel dimetil disolfuro (DMDS) il principale agente odorigeno presente nell'aria in uscita dal materiale organico in fase di biostabilizzazione (HENTZ *et al.*, 1991). Questi risultati hanno portato alla messa a punto di uno *scrubber* a tre stadi in grado di rimuovere il 97 % del suddetto composto dall'aria di processo. La filiera di lavaggio di deodorizzazione adottata implica un primo lavaggio con soluzione acida e tensioattivi per eliminare l'ammoniaca e certi composti organici. Segue una fase di ossidazione con ipoclorito per rimuovere il DMDS ed altri solfuri organici. Infine, è previsto un lavaggio con acqua ossigenata per abbattere ulteriormente e, eventualmente dechlorurare, i possibili composti organici ancora presenti (MURRAY, 1991).

Il ricorso agli *scrubbers* richiede un accurato piano di conduzione e mantenimento degli apparati al fine di garantirne l'efficienza operativa. È quindi importante, in via preventiva, considerare il peso economico che questi sistemi rappresentano rispetto agli altri interventi di mitigazione e controllo degli odori.

6.2 Attenzione per i fattori di rischio sanitario e di sicurezza sul lavoro

Sebbene il compostaggio non costituisca di per sé un'attività intrinsecamente pericolosa, presso gli impianti di biostabilizzazione è necessario prendere alcune precauzioni in modo da ridurre al minimo situazioni di possibile rischio, per quanto riguarda sia gli infortuni che gli aspetti igienico-sanitari degli operatori.

I potenziali problemi concernenti la salubrità e la sicurezza che ricorrono presso le stazioni di compostaggio includono l'esposizione alle polveri ed alle endotossine, il contatto con aerosoli ed eventuali sostanze chimiche tossiche, i rumori e gli incidenti connessi con le macchine in uso presso l'impianto. Questi problemi possono essere efficacemente contenuti mediante un'appropriata progettazione delle strutture, degli spazi e delle procedure operative della stazione di compostaggio, nonché attraverso un'adeguata formazione del personale.

Moltissimi impianti di compostaggio, in tutto il mondo, hanno operato tranquillamente per anni senza il verificarsi di gravi situazioni di pericolo per la salute e la sicurezza degli operatori. Ciò nonostante, gli addetti agli impianti devono essere coscienti degli specifici aspetti di rischio legati alla filiera del compostaggio. La consapevolezza di questi problemi consente di riconoscere preventivamente le situazioni di rischio, richiamando l'attenzione sulle precauzioni ed i rimedi da adottare prima che si creino condizioni veramente critiche.

6.2.1 Bioparticolato e bioaerosol

Durante le operazioni di compostaggio possono originarsi polveri dotate di reattività biologica (*bioparticolato*), le quali sono, in buona sostanza, sospensioni in aria di solidi finemente dispersi, costituite da cellule microbiche ovvero da microorganismi associati a piccolissime particelle di materiali organici o inorganici. I microorganismi sono in grado di rimanere sospesi nell'aria per periodi di tempo anche lunghi, mantenendo la vitalità e l'eventuale infettività. Nelle polveri disperse si ritrovano cellule di batteri e attinomiceti, propaguli di muffe e spore fungine, nonché particelle virali (CLARK *et al.*, 1983).

Un problema specifico correlato con le stazioni di compostaggio è rappresentato dalla presenza del fungo *Aspergillus fumigatus*. Questo deuteromicete è normalmente associato alla sostanza organica in corso di decadimento, quale, ad esempio, la lettiera dei boschi di latifoglie, e, perciò, finisce per colonizzare anche le matrici trattate presso gli impianti di produzione di compost. Le spore (conidi) di questo fungo sono facilmente disperse nell'aria a seguito del rivoltamento dei cumuli di matrice organica in trasformazione e, soprattutto, durante l'agitazione meccanica del compost finito. Ciò si verifica, con particolare intensità, quando i materiali movimentati sono secchi e polverosi. Il numero di propaguli di *A. fumigatus* nell'aria decresce comunque rapidamente

già a poca distanza dalla sorgente e dopo poco tempo dalla cessazione delle operazioni di rivoltamento (EPSTEIN & EPSTEIN, 1989).

Le spore di *A. fumigatus* possono essere inalate o entrare nel corpo umano attraverso ferite ed abrasioni dell'epidermide. Il fungo non è considerato un pericolo per gli individui sani. Tuttavia, in soggetti sensibili, può causare affezioni polmonari (aspergillosi) ed infezioni di vario genere. Le condizioni che predispongono gli individui alle infezioni da parte di *A. fumigatus*, ma anche di altre specie fungine, comprendono l'indebolimento delle difese immunitarie, le allergie, l'asma, il diabete, la tubercolosi, le lesioni della membrana timpanica, l'uso di antibiotici e di ormoni adrenocorticotropi, le terapie post-trapianto, la leucemia ed i limfomi (USDA & USEPA, 1980; WIRTH, 1989). Approssimativamente si stima che il 5-10 % della popolazione sia sensibile ad *A. nidulans*. Oggi, tuttavia, sono disponibili test ematici per l'identificazione degli antigeni di natura fungina in individui sensibili. Ciò consente di verificare, in via preventiva, la compatibilità di un operatore con l'ambiente di lavoro tipico della stazione di compostaggio.

Altro elemento di potenziale rischio igienico-sanitario presso le strutture impiantistiche adibite al compostaggio è rappresentato dall'esposizione alle endotossine. Quest'ultime sono tossine prodotte all'interno delle cellule di alcuni microorganismi e rilasciate a seguito della rottura degli involucri cellulari. È stato accertato che i livelli di endotossine nell'aria delle stazioni di compostaggio possono variare da 0,001 a 0,014 mg/m³ (RODERIQUE & RODERIQUE, 1990).

Poiché sia il bioparticolato che le endotossine sono essenzialmente associati alle polveri, il controllo della dispersione di queste ultime dovrebbe essere pianificato già a livello di progettazione delle strutture impiantistiche e di organizzazione delle operazioni previste nell'ambito della stazione di compostaggio. Queste misure consentono di ridurre i rischi a carico del personale addetto agli impianti e possono riassumersi nei seguenti punti:

- Impedire l'eccessiva disidratazione delle matrici organiche in corso di trattamento e del compost finito.
- Umidificare il prodotto finale stoccato, a maggior ragione se da lungo tempo, prima di qualsiasi movimentazione.
- Pavimentare le superfici di lavoro e la viabilità interna della stazione di compostaggio.
- Confinare, dove possibile, le operazioni di vagliatura e confezionamento del compost in strutture chiuse, dotate di sistema di aspirazione e filtrazione dell'aria.
- Proteggere i lavoratori dall'esposizione alle polveri in coincidenza delle operazioni maggiormente responsabili della formazione di bioparticolato (es. rivoltamento dei cumuli), usando macchine operatrici a cabina chiusa e climatizzata.
- Applicare, preferibilmente, sistemi di compostaggio ad aerazione forzata della matrice in trasformazione piuttosto che basati sul rivoltamento periodico dei cumuli.

In aggiunta ai suddetti accorgimenti, gli addetti all'impianto dovrebbero essere ben informati circa i potenziali rischi biologici presenti presso la stazione di compostaggio. Questi ultimi, anche se estremamente bassi in individui sani, dovrebbero spingere alla osservanza di precauzioni ed al ricorso ad accorgimenti di protezione personale quali:

- l'uso di mascherine protettive capaci di filtrare particelle di dimensioni inferiori ad 1 micron;
- l'impiego di tute da lavoro da sostituire, in apposito spogliatoio dotato di docce, con gli abiti civili, all'uscita dall'impianto a fine turno lavorativo;
- l'accurato lavaggio delle mani ogni volta vi sia contatto con cibi o bevande;
- il pronto ricorso alla disinfezione a seguito di eventuali piccole ferite.

In definitiva, presso la stazione di compostaggio, i rischi di carattere biologico riguardanti la salute umana sono strettamente connessi sia con la suscettibilità degli individui, sia con la natura dei materiali trattati. Mentre i rifiuti organici di origine vegetale presentano una modesta carica di microorganismi potenzialmente patogeni per l'uomo, il quadro cambia drasticamente, ad esempio, nel caso di trattamento dei fanghi di depurazione. Questi ultimi infatti contengono un'elevatissima concentrazione di organismi patogeni. Ciò richiede, da parte degli operatori, l'osservanza più scrupolosa possibile delle normali misure di sicurezza (es. uso di indumenti da lavoro adatti, lavaggio delle mani prima di toccare cibi e bevande o gli occhi, ecc.). Uno degli aspetti più critici nella manipolazione dei fanghi, specialmente quando questi vengono impiegati allo stato fluido nella preparazione delle miscele di partenza per il compostaggio, è rappresentato dalla possibile formazione e dispersione di aerosol trasportatori di agenti patogeni (*bioaerosol*). Le microgocce sospese nell'aria, contenenti cellule microbiche o particelle virali, costituiscono un veicolo potenziale di infezione, nei confronti del quale le misure possibili di protezione sono il confinamento al chiuso delle operazioni di miscelazione e l'impiego di apposite maschere e guanti da parte degli operatori addetti alla manipolazione dei fanghi.

6.2.2 Presenza di sostanze chimiche tossiche

Quantunque questa evenienza sia da ritenersi remota nel caso del compostaggio di matrici organiche da raccolta differenziata, è tuttavia possibile che presso gli impianti di biostabilizzazione dei rifiuti solidi urbani possano liberarsi composti organici volatili (*volatile organic compounds* o VOCs), potenzialmente pericolosi per gli operatori (GILLET, 1992). Si tratta di composti, quali benzene, cloroformio e tricloroetilene (trielina), normalmente contenuti in taluni solventi, vernici e smacchiatori di uso domestico.

La combinazione della ventilazione forzata o del rivoltamento periodico dei cumuli e delle elevate temperature raggiunte in fase termofila può facilitare il rilascio in atmosfera di VOCs dal materiale in trasformazione. La maggior parte dei VOCs viene liberata dal substrato nelle prime 24-48 ore di processo (KISSEL *et al.*, 1992). Quando la fase attiva del compostaggio è confinata in ambienti chiusi, un appropriato ricambio d'aria è importante anche per evitare l'esposizione degli addetti a concentrazioni non trascurabili di questi composti. Le tecnologie di abbattimento messe a punto per il controllo degli odori possono risultare utili anche per la rimozione dei VOCs dall'aria di processo. Il miglior metodo per limitare l'emissione di VOCs consiste tuttavia nel prevenire la presenza di queste sostanze nelle matrici organiche oggetto di trattamento. Ciò è ottenibile, ancora una volta, mediante programmi di asporto differenziato del rifiuto organico presso le famiglie e di raccolta mirata dei prodotti pericolosi.

L'esposizione degli operatori a composti tossici come policlorobifenili (PCBs), diossine, pesticidi e idrocarburi policiclici aromatici (PAHs), eventualmente presenti nelle matrici di partenza, sebbene ritenuta verosimile in taluni casi, non è stata fin qui quantificata con precisione (GILLET, 1992). Allo stesso modo, non sono mai stati accertati effetti negativi sui lavoratori derivanti dall'esposizione a metalli eventualmente presenti nell'aria degli impianti di compostaggio. In uno studio condotto sulle concentrazioni di piombo e cadmio nell'atmosfera circolante presso stazioni per la stabilizzazione della frazione organica dei rifiuti solidi urbani (MOZZON *et al.*, 1987), sono stati rilevati valori (< 0,003 mg/m³) ben al di sotto dei livelli di attenzione. Ciò suggerisce che, nella filiera di produzione di compost da matrici selezionate, l'esposizione degli operatori ai metalli può considerarsi un fenomeno affatto trascurabile.

6.2.3 L'inquinamento acustico

È importante ricordare che disturbi uditivi importanti si verificano per esposizioni prolungate ad intensità di rumore eccedenti gli 85 decibels. Purtroppo molti tra i macchinari impiegati presso le stazioni di compostaggio (es. trituratori, mulini, vagli, ecc.) superano di gran lunga il limite sopra riportato.

Misure di contenimento delle emissioni acustiche, sia mediante accorgimenti tecnologici di insonorizzazione che attraverso una distribuzione temporale delle operazioni più rumorose, possono senz'altro giovare a mitigare questo inconveniente. La protezione del personale con cuffie anti-rumore rimane comunque un accorgimento necessario, specialmente per gli addetti al rivoltamento dei cumuli mediante macchine operatrici.

6.2.4 Altri aspetti riguardanti la sicurezza e la prevenzione degli infortuni

I principali problemi legati alla prevenzione degli infortuni nell'ambito degli impianti di compostaggio riguardano i macchinari in uso. Sia le macchine operatrici (es. trituratori, pale meccaniche, rivoltatrici, ecc.) che le attrezzature fisse (es. separatori balistici, mulini, vagli, ecc.) devono essere dotate dei requisiti di sicurezza stabiliti dalle norme vigenti. Particolare attenzione dovrà essere rivolta alla schermatura degli organi meccanici rotanti dotati di elevata velocità di movimento. In particolare, gli organi fresanti delle macchine volta-cumuli, devono impedire l'eiezione di pietre o altri corpi contundenti eventualmente presenti nel materiale in corso di movimentazione. Gli operatori dovranno poi avere a disposizione i sistemi di protezione standard (es. occhiali, guanti, mascherine, calzature rinforzate), di volta in volta previsti per lo svolgimento in sicurezza delle mansioni cui sono destinati.

Anche il fuoco può rappresentare, in talune circostanze, un problema da tenere in considerazione nella gestione della stazione di compostaggio. Se il materiale in trasformazione è mantenuto entro i livelli di umidità appropriata per il processo, i rischi di combustione spontanea sono limitati, specialmente presso gli impianti in cui il trattamento dei materiali avviene all'aperto. Tuttavia, se le matrici organiche in corso di stabilizzazione vanno incontro ad una eccessiva disidratazione, peraltro in cumuli di grandi dimensioni, l'autocombustione può diventare un rischio serio. Questo fenomeno avviene solitamente quando lo stadio termofilo del processo provoca la rapida diminuzione dell'umidità del substrato entro valori compresi tra il 25 ed il 45 %. A questo punto, nella parte interna dei cumuli con altezza largamente eccedente i 3,5 m, il calore può innescare reazioni chimiche che portano alla combustione spontanea del substrato. Insieme, il controllo del contenuto di umidità e della temperatura entro i limiti ottimali per il compostaggio e l'allestimento di cumuli di dimensioni compatibili con il corretto svolgimento delle reazioni di trasformazione costituiscono il sistema di prevenzione più efficace nei confronti dei fenomeni di autocombustione. La presenza di un adeguato sistema antincendio è comunque obbligatoria per ogni stazione di compostaggio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BOHN H.L. & BOHN R.K. (1987). Biofiltration of odors from food and waste processing. In: *Proc. of Food Processing Waste Conference*, Georgia Technological Research Institute, Atlanta, GA, Sept. 1-2 1987.

CLARK C.S., RYLANDER R., LARSSON L. (1983). Levels of gram-negative bacteria, *Aspergillus nidulans*, dust, and endotoxins at compost plants. *Appl. Environ. Microbiol.*, 45(5):1501-1505.

DIAZ L.F. (1987). Air emissions from compost. *BioCycle*, 28(8):52-53

- ELLIS S. (1991).** Air pollution and odor control methods. In: *Proc. of the Northeast Regional Solid Waste Composting Conference*, Composting Council, Washington D.C., June 1991, pp. 23-26.
- EPSTEIN E. & EPSTEIN J.I. (1989).** Public health issues and composting. *BioCycle*, 30(8):50-53.
- GILLET J.W. (1992).** Issues in risk assessment of compost from municipal solid waste: Occupational health and safety, public health, and environmental concerns. *Biomass & Bioenergy*, 3(3-4):145-162.
- HENTZ L.H., MURRAY C.M., THOMPSON J.L., GASNER L., DUNSON J.B. (1991).** Odor control research at the Montgomery County Regional Composting Facility. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, 26(Nov/Dec).
- KISSEL J.C., HENRY C.H., HARRISON R.B. (1992).** Potential emissions of volatile and odorous organic compounds from municipal solid waste composting facilities. *Biomass & Bioenergy*, 3(3-4):181-194.
- LANG M.E. & JAGER R.A. (1992).** Odor control for municipal sludge composting. *BioCycle*, 33(8):76-85.
- MOZZON D., BROWN D.A., SMITH J.W. (1987).** Occupational exposure to airborne dust, respirable quartz, and metals arising from refuse handling, burning, and landfilling. *J. Am. Ind. Hyg. Ass.*, 48(2):111-116.
- MURRAY C.M. (1991).** Controlling odor. In: *Proc. of the 1990 Solid Waste Composting Council Conference*, Composting Council, Washington D.C., November 1990, pp. 93-96.
- NAYLOR L.M., KUTER G.A., GORMSEN, P.J. (1988).** Biofilters for odor control: The scientific basis. *Compost Facts*, International Process System Inc., Hampton, NH.
- RODERIQUE J.O. & RODERIQUE D.S. (1990).** The environmental impacts of yard waste composting. Brickner & Bratton Inc., Falls Church, VA.
- USEPA (1992).** Draft guidelines for controlling sewage sludge composting odors. Office of Wastewater Enforcement and Compliance, Washington D.C..
- USDA & USEPA (1980).** Manual for composting sewage sludge by Beltsville aerated-pile method. EPA 1600-8-80-022. Washington D.C..
- WALKER J.M. (1993).** Control of composting odors. In: *Science and Engineering of Composting* (Hoitink and Keener eds.), Renaissance Publications, Worthington, OH.
- WILLIAMS T.O. & MILLER F.C. (1992a).** Odor control using biofilters, Part I. *BioCycle*, 33(10):72-77.
- WILLIAMS T.O. & MILLER F.C. (1992b).** Biofilters and facility operations, Part II. *BioCycle*. 33(11):75-78.
- WIRTH R. (1989).** Introduction to Composting. Minnesota Pollution Control Agency, St. Paul, MN.

7. Localizzazione della stazione di compostaggio, rispetto delle distanze di sicurezza ed organizzazione degli spazi interni

Il sito prescelto per l'installazione di una stazione di compostaggio deve disporre di spazio sufficiente e condizioni tali da garantire il trattamento in ogni situazione meteorologica. Nel luogo di insediamento dell'impianto, inoltre, i disagi dovuti agli eventuali impatti negativi riconducibili all'attività di trattamento dei rifiuti organici dovrebbero risultare il più possibile circoscritti, sia per quanto riguarda le emissioni maleodoranti che l'inquinamento acustico. La localizzazione di un insediamento impiantistico per il compostaggio presuppone perciò l'individuazione di un sito compatibile con il carattere complessivo delle attività previste. In particolare, il sistema di trattamento prescelto dovrà essere adattato alle caratteristiche del luogo (o viceversa), con specifico riferimento sia alle sistemazioni superficiali per il corretto drenaggio delle acque meteoriche, sia alle misure di prevenzione nei confronti di ogni forma di inquinamento (US COMPOSTING COUNCIL, 1991; RYNK *et al.*, 1992).

7.1 Scelta del sito

Per la localizzazione della stazione di compostaggio, si dovrà tener conto della facilità di accesso da parte dei veicoli coinvolti nelle operazioni di conferimento delle matrici da trattare. Distanza e posizione baricentrica dell'impianto rispetto alle aree servite costituiscono inoltre elementi di grande importanza per il contenimento non solo dei costi ma anche degli impatti legati al traffico veicolare.

Siti posti nelle vicinanze di installazioni sensibili quali asili-nido, scuole, ospedali, mense, strutture ricreative e per il tempo libero dovrebbero essere evitati in via preliminare. La stazione di compostaggio dovrebbe inoltre essere localizzata a distanza sufficiente (non meno di 500 metri in linea d'aria) dagli insediamenti abitativi e, preferibilmente, fuori dall'orizzonte di vista degli stessi. In caso contrario, è inevitabile che si complicano i problemi legati alle relazioni pubbliche con la popolazione e, di conseguenza, al consenso degli abitanti, aspetto, questo, importantissimo ai fini della operatività dell'impianto. Allo stesso modo, anche le misure di prevenzione delle emissioni odorigene richiederebbero interventi molto più sofisticati ed onerosi.

In via del tutto preliminare, occorre, perciò, procedere alla stesura di una mappa che evidenzia la possibile localizzazione della stazione di compostaggio in relazione a tutti i fattori critici della zona prescelta: direzione dei venti prevalenti, rete viaria, pendenza del terreno, linee di corrivazione delle acque meteoriche, usi delle aree circumvicine, nonché tutti quegli elementi di rilevanza ambientale quali la dislocazione dei corpi idrici e di eventuali impaludamenti.

7.2 Requisiti per l'insediamento

7.2.1 Valutazione delle distanze di sicurezza e di rispetto

Una volta individuato, in linea generale, il sito di localizzazione, è necessario procedere ad un'attenta valutazione delle distanze di sicurezza e di rispetto tra la stazione di compostaggio e gli eventuali elementi territoriali sensibili.

Le distanze poste a separazione dell'impianto di trattamento dai corsi d'acqua, dalle riserve idriche e dalle abitazioni civili hanno lo scopo di garantire la qualità delle acque e di ridurre al massimo i fattori di disturbo quali impatti olfattivi sgradevoli ed inquinamento acustico.

Sia la fascia orizzontale di rispetto interposta tra la stazione di compostaggio ed i corpi idrici, per quanto riguarda la protezione delle acque superficiali, sia la distanza in verticale tra i piazzali di trattamento ed il livello stagionale massimo raggiungibile dalle acque sotterranee, per quanto

riguarda la protezione della falda, devono tener conto delle specifiche normative nazionali e regionali di settore. La stessa cosa vale per le distanze minime di rispetto nei confronti degli insediamenti abitativi.

7.2.2 *Ottimizzazione del drenaggio*

La presenza di condizioni favorevoli un efficace allontanamento delle precipitazioni è requisito fondamentale di qualsiasi stazione di compostaggio, sia che questa attui la stabilizzazione all'aperto, sia che operi su superfici coperte. Un drenaggio insufficiente porta inevitabilmente al ristagno d'acqua ed al conseguente rischio di impaludamento del sito. In tali condizioni, qualora il compostaggio venga condotto su aie scoperte, il materiale in trasformazione tende a saturarsi con gravi ripercussioni sul corretto andamento del processo. La disordinata corrivazione delle acque meteoriche può inoltre provocare la formazione e la dispersione di notevoli quantità di percolato.

Per quanto sin qui considerato, è necessario che le superfici destinate al compostaggio siano, prima di tutto, adeguatamente pavimentate in modo da evitare non solo i rischi di inquinamento delle acque sotterranee ma anche la formazione di fango che renderebbe impraticabile agli automezzi l'accesso ed il movimento negli spazi operativi. I piazzali di trattamento e di stoccaggio dei materiali dovranno inoltre presentare opportuna pendenza in modo da convogliare le acque verso canalette e pozzetti di raccolta. Sempre nel caso in cui il compostaggio venga realizzato in cumuli all'aperto, è importante costruire le andane secondo la direzione della pendenza. In questo modo, l'acqua può essere evacuata senza incontrare sbarramenti, cosa che invece si verificherebbe con i cumuli posti perpendicolarmente alle linee di deflusso.

Alle superfici destinate alla stazione di compostaggio dovrebbe essere garantita una pendenza minima dello 0,3 %, fermo restando il fatto che le condizioni ottimali si realizzano con pendenze comprese tra lo 0,6 e l' 1%.

Le acque meteoriche e di ruscellamento provenienti dalle aree circostanti la stazione di compostaggio devono essere intercettate con opere di contenimento, quali terrapieni, ed una rete di canali in grado di convogliarle lontano dalle superfici occupate dall'impianto. Allo stesso modo, gli edifici a servizio della stazione di compostaggio dovranno essere provvisti di tettoie dotate di docce di convogliamento e di discesa delle acque di pioggia per evitare la dispersione delle stesse sui piazzali.

Prima della progettazione di dettaglio dell'installazione, è in ogni caso opportuno che venga eseguita una ricognizione idrogeologica sul sito ad opera di uno specialista.

7.2.3 *Considerazioni ambientali*

Come già accennato, i rischi associati alle emissioni maleodoranti, ai rumori, alla dispersione di polveri, al rilascio di percolato ed al dilavamento superficiale dipendono in maniera non trascurabile dalle caratteristiche del sito prescelto per la localizzazione dell'impianto di compostaggio. Elementi importanti che incidono sul complessivo impatto ambientale delle operazioni di compostaggio sono inoltre le caratteristiche dei materiali trattati, il metodo di trattamento adottato e la gestione del processo.

Nel caso di stazioni di compostaggio con trattamento dei materiali all'aperto, il problema degli odori può essere ridotto attraverso una corretta conduzione delle operazioni solo nel caso in cui l'impianto sia stato razionalmente progettato e la filiera di trattamento ben organizzata nella successione delle varie fasi. In particolare, nella localizzazione di una stazione di compostaggio, è indispensabile considerare la direzione dei venti prevalenti, specialmente durante la stagione calda.

Un'attenzione specifica deve essere inoltre rivolta alle polveri ed all'inquinamento acustico derivanti sia dalle singole operazioni di trattamento sia dal traffico veicolare in entrata ed in uscita dal-

l'impianto. Già la razionale programmazione di certe operazioni e dei trasporti nell'arco della giornata può grandemente limitare questo tipo di inconvenienti. Ad esempio, operazioni particolarmente rumorose come la triturazione dei residui ligno-cellulosici dovrebbero essere condotte nelle ore centrali del mattino o del pomeriggio, al di fuori cioè dei momenti di riposo o di relax durante i quali l'eventuale popolazione circostante risulta più sensibile al fastidio dei rumori. Nelle valutazioni di pianificazione si dovrà tener conto del fatto che l'eventuale fastidio relativo alla generazione di rumori è, per certi versi, strettamente connesso alla quantità di materiale da trattare e che, durante il periodo primaverile-estivo, le finestre delle abitazioni sono solitamente aperte e più numerose risultano per gli abitanti le occasioni di stazionare all'esterno.

La visibilità generale dell'impianto e l'impatto architettonico delle strutture tecnologiche tendono ad influenzare negativamente la percezione sociale di una stazione di compostaggio.

Nei casi in cui risulti possibile, la collocazione dell'impianto dovrebbe avvenire all'interno di un'area già destinata ad altre attività industriali. Ciò consentirebbe di sfruttare le condizioni di specifica vocazione del sito ad ospitare insediamenti produttivi, così come dettato dalla programmazione urbanistica. È evidente che, in una simile circostanza, la stazione di compostaggio dovrebbe comunque non interferire negativamente con le altre attività, obiettivo raggiungibile con il confinamento al chiuso delle fasi critiche del processo. D'altra parte, nel caso in cui un impianto di compostaggio venga collocato al di fuori di aree a destinazione industriale, è di grande importanza provvedere al mascheramento delle strutture tecnologiche, sia sfruttando le naturali caratteristiche paesaggistiche del sito prescelto sia creando barriere vegetali con specie arboree ed arbustive quanto più coerenti con le fitocenosi locali. Se la stazione di compostaggio è destinata a rimanere visibile al pubblico, essa dovrà apparire ordinata e ben curata anche nei dettagli architettonici e di arredo esterno (es. colori delle opere edili, aiuole, recinzioni, inerbimenti delle fasce non destinate alle operazioni). Un impianto trascurato in questi elementi è spesso destinato a suscitare sospetto nella popolazione circostante.

7.3 Organizzazione degli spazi e delle attrezzature funzionali alla stazione di compostaggio

Una volta individuato il sito di insediamento della stazione di compostaggio, si deve procedere alla razionale progettazione dell'area interessata alle operazioni di trattamento ed alla individuazione delle attrezzature necessarie per l'attuazione del processo secondo il sistema tecnologico prescelto. È buona prassi che i tecnici cui è affidata la progettazione - meglio se accompagnati dai responsabili dell'Amministrazione interessata alla realizzazione della stazione di compostaggio, in caso di commessa pubblica - visitino impianti esistenti in modo da trarre utili indicazioni di prima mano presso queste strutture già operanti, di varia tipologia.

All'atto della stesura del progetto della stazione di compostaggio, è importante prevedere la possibilità di espansione dell'impianto stesso. Sulla scorta di stime su base territoriale, dovrebbero essere, infatti, sviluppati scenari diversi riferibili sia ad eventuali cambiamenti nella tipologia e nella quantità dei materiali trattati, sia alle necessità di allargamento e modifica delle strutture impiantistiche e degli schemi di processo.

Nella progettazione di una stazione di compostaggio, sono da ritenersi critici - con valenza generalmente applicabile anche ai sistemi in bioreattore - i seguenti elementi:

- l'area di ricezione e pre-trattamento dei materiali
- l'area destinata alla stabilizzazione e maturazione delle matrici trattate
- l'area necessaria per i post-trattamenti a carico del compost ottenuto ed allo stoccaggio del prodotto finito
- le zone di rispetto
- la viabilità
- le strutture di servizio e per la sicurezza dell'impianto

L'area di ricezione e pre-trattamento, definita anche *area di preparazione*, rappresenta lo spazio necessario per ospitare i materiali organici in entrata, che altrimenti dovrebbero essere direttamente scaricati dagli autocarri nelle aie di compostaggio, man mano che questi vengono conferiti presso l'impianto.

Nell'area di ricezione è possibile effettuare, se necessaria, la separazione di eventuali materiali indesiderati dalle matrici organiche oggetto di trattamento. Ma, soprattutto, è qui che vengono mescolati gli ingredienti per ottenere la corretta miscela di partenza da avviare alla stabilizzazione.

In condizioni climatiche particolarmente avverse, è consigliabile prevedere la copertura di quest'area con apposita tettoia. Gli spazi operativi dovranno inoltre essere appositamente pavimentati e dotati di sufficiente pendenza per la raccolta dei percolati. Barriere di contenimento in cemento dovranno essere disposte lungo almeno uno dei lati del piazzale di ricezione, in modo da facilitare il caricamento dei materiali mediante pala meccanica con cucchiaio frontale. Quando la stazione di compostaggio è ubicata in zona sensibile per il manifestarsi di disagi dovuti all'emissione di odori, la sezione di ricezione, condizionamento e miscelazione delle matrici fermentescibili dovrebbe non soltanto essere collocata al coperto, ma addirittura in locale chiuso, dal quale sia possibile convogliare l'aria interna verso gli apparati di filtrazione e deodorizzazione.

L'area destinata ai pre-trattamenti dovrà inoltre prevedere spazio sufficiente per la triturazione e lo stoccaggio dei materiali ligno-cellulosici di supporto. Di solito, le superfici destinate a queste operazioni sono realizzate allo scoperto.

È di fondamentale importanza che l'accesso a quest'area e la distribuzione degli spazi siano tali da consentire le operazioni degli automezzi con il minor numero possibile di manovre.

L'area di stabilizzazione e maturazione, indicata anche come *area di processo*, comprende sia gli spazi destinati ad ospitare i cumuli durante la fase attiva del compostaggio sia quelli destinati al materiale in fase di finissaggio (*curing*).

Sebbene nella letteratura tecnica di settore, di derivazione prevalentemente americana, la copertura in asfalto o la pavimentazione in cemento delle aie di compostaggio siano indicate come un vero e proprio lusso, è auspicabile che oggi, in Italia, un impianto di compostaggio preveda l'impermeabilizzazione delle superfici destinate alla stabilizzazione di rifiuti organici. Con la pavimentazione viene infatti garantita la captazione e la raccolta degli eventuali percolati, impedendo così la migrazione degli stessi negli strati sub-superficiali del terreno o, addirittura, nelle acque di falda. La pavimentazione delle aie di compostaggio favorisce, inoltre, un più efficace smaltimento delle acque di pioggia, e l'accesso delle macchine operatrici anche in condizioni meteorologiche avverse.

Nel caso di compostaggio in cumuli statici aerati mediante ventilazione forzata, per evitare intralci alle macchine operatrici, il sistema di adduzione dell'aria dovrà essere sistemato al di sopra di uno strato drenante, all'interno di canalette realizzate nella pavimentazione e coperte da griglie rimovibili.

L'estensione dell'area di processo dipenderà dalle caratteristiche dei materiali trattati (es. umidità, densità apparente, ecc.), per i quali sono necessari tempi di stabilizzazione e maturazione diversi, anche a seconda del sistema di compostaggio adottato.

Nel caso di compostaggio in cumuli aerati mediante rivoltamento periodico, la macchina utilizzata per movimentare il materiale in trasformazione influirà sulla larghezza dei corridoi tra le andane.

Se il compostaggio viene condotto con il sistema in cumuli rivoltati mediante pala meccanica, la larghezza delle fasce intercalate tra le andane dovrà essere di circa 5-6 m, in modo da consentire agilmente le manovre della macchina operatrice. Con un rivoltatore laterale spinto o trainato da un trattore, saranno sufficienti corridoi di circa 3,5 m. La larghezza dei corridoi può ridursi a circa 1 m quando sono impiegate macchine rivoltatrici semoventi cavalca-cumulo. Anche con il sistema di compostaggio in cumuli statici aerati, è sufficiente lasciare uno spazio tra le andane intorno a 0,7-1 m.

L'area di processo può essere allestita al di sotto di tettoie qualora si operi in condizioni climatiche

caratterizzate da ripetute precipitazioni durante tutto l'arco dell'anno, mentre, se la stazione di compostaggio si trova nelle vicinanze di insediamenti abitativi è consigliabile confinare l'area di processo all'interno di capannoni chiusi, tenuti in leggera depressione e dotati di sistemi per il ricambio dell'aria interna, con dispositivi per la captazione e l'abbattimento degli odori e delle polveri.

L'area dei post-trattamenti e di stoccaggio del prodotto finale comprende gli spazi necessari per eventuali operazioni di vagliatura, miscelazione, additivazione e confezionamento del compost maturo.

Nel caso in cui il prodotto finale sfuso non sia trasferito agli utilizzatori in un periodo di tempo sufficientemente breve, potrebbe rendersi necessario uno stoccaggio al coperto. Specialmente nella stagione invernale, le precipitazioni ripetute rischiano di bagnare eccessivamente e dilavare il compost. Tuttavia, è elemento da tenersi in considerazione anche il rischio che il prodotto maturo, stoccato per lungo tempo all'aperto, possa essere contaminato da semi di piante infestanti trasportati dai venti.

Nella progettazione di una stazione di compostaggio, si ritiene comunque ragionevole prevedere un'area di stoccaggio destinata al compost di almeno 3 mesi di produzione.

Le zone di rispetto rappresentano quelle aree interposte tra la stazione di compostaggio ed eventuali insediamenti o punti sensibili presenti nelle vicinanze dell'impianto.

Come già precedentemente accennato, esistono specifici strumenti normativi regionali e nazionali che stabiliscono le distanze di sicurezza minime cui attenersi nella realizzazione di una stazione di compostaggio, rispetto ai diversi obiettivi sensibili (es. abitazioni, insediamenti produttivi, corsi d'acqua, etc.). Tuttavia, le cautele aggiuntive talvolta imposte dalla necessità di mitigare al massimo gli impatti negativi, dipendono grandemente dalla tipologia dell'impianto di compostaggio adottato. Strutture impiantistiche ad alta tecnologia e confinate all'interno di edifici chiusi potrebbero richiedere una minore estensione delle zone di rispetto a fronte di stazioni di compostaggio operanti all'aperto. Anche la tipologia (grado di fermentescibilità) dei materiali trattati e la presenza di venti prevalenti finiscono per influire sulla estensione delle aree di rispetto all'intorno di una stazione di compostaggio.

In generale, più estesa è la fascia di rispetto circostante l'impianto, maggiore risulterà il grado di accettazione da parte dei residenti.

Esempio di determinazione delle superfici necessarie e di organizzazione delle aree di trattamento presso una stazione di compostaggio impostata secondo il metodo dell'aerazione mediante cumuli rivoltati

Di seguito viene riportato un caso esemplificativo di procedura per la determinazione e l'organizzazione degli spazi interni relativi ad una stazione di compostaggio. Ulteriori elementi per il dimensionamento delle aree necessarie alla attuazione del processo sono disponibili in Appendice 2, dove vengono analizzati due casi tipici, l'uno rappresentato da una stazione di compostaggio attrezzata per la produzione di compost a partire dalla frazione organica dei rifiuti urbani ottenuta attraverso il sistema di raccolta secco-umido mediante cassonetti stradali dedicati, l'altro riferito ad un impianto destinato alla stabilizzazione dei residui organici da raccolta differenziata alla fonte presso gli utenti.

Si considera, in questo caso, la trasformazione giornaliera, per sei giorni alla settimana, di 10 t di rifiuti verdi (densità apparente: 800 kg/m³) da raccolta alla fonte presso i mercati orto-frutticoli, miscelati con 7,5 t di ramaglie cippate (densità apparente: 500 kg/m³), derivanti dalla manutenzione di parchi e giardini. Il rivoltamento dei cumuli è attuato mediante pala meccanica dotata di cucchiaio caricatore frontale. La fase attiva del processo è prevista per un periodo di sette settimane, mentre lo stadio di finissaggio si protrae per ulteriori cinque settimane. Alla

segue

fine della fase di affinamento, il compost viene vagliato per il recupero dell'agente di supporto ligno-cellulosico, da reimpiegarsi in un nuovo ciclo di stabilizzazione. Nel passaggio dalla miscela iniziale al substrato stabilizzato, si prevede una riduzione di volume del 45 % circa, mentre il compost raffinato (vagliato) alla fine della fase di finissaggio occupa un volume corrispondente a 1/4 di quello occupato dal materiale di partenza.

1. CALCOLO DELLE SUPERFICI PER L'AREA DESTINATA ALLA FASE DI COMPOSTAGGIO ATTIVO

1.1 Volume del materiale da avviarsi giornalmente a compostaggio

rifiuti verdi: $10 \text{ t} / 0,8 = 12,5 \text{ m}^3$; cippato di ramaglie: $7,5 \text{ t} / 0,5 = 15 \text{ m}^3$; Totale: $27,5 \text{ m}^3$

1.2 Computo del volume del materiale nelle piazzole destinate alla fase di compostaggio attivo

Volume totale del materiale:
(6 giorni/settimana X 7 settimane) 42 giorni X $27,5 \text{ m}^3/\text{giorno} = 1.155 \text{ m}^3$

Volume totale del materiale corretto del (*) fattore di contrazione:
 $1.155 \text{ m}^3 \times 0,55 = 635,25 \text{ m}^3$.

1.3 Determinazione del volume dei singoli cumuli

Data la planimetria dell'area impegnata, si fissa la lunghezza dei cumuli in 30 m. Si assume inoltre che le caratteristiche della pala meccanica consentono di allestire cumuli di altezza (h) pari a 2,5 m e larghezza (b) uguale a 4,5 m. L'area della sezione trasversale di detti cumuli viene calcolata applicando la formula $A = 2/3 \times b \times h$.

$$\text{Volume del cumulo: } (2/3) \times 4,5 \times 2,5 \times 30 = 225 \text{ m}^3$$

1.4 Determinazione del numero di cumuli necessari

$$\frac{\text{volume totale (corretto) del materiale}}{\text{volume del singolo cumulo}} = \frac{635,25 \text{ m}^3}{225 \text{ m}^3} = 2,8$$

In pratica, si considerano 3 cumuli.

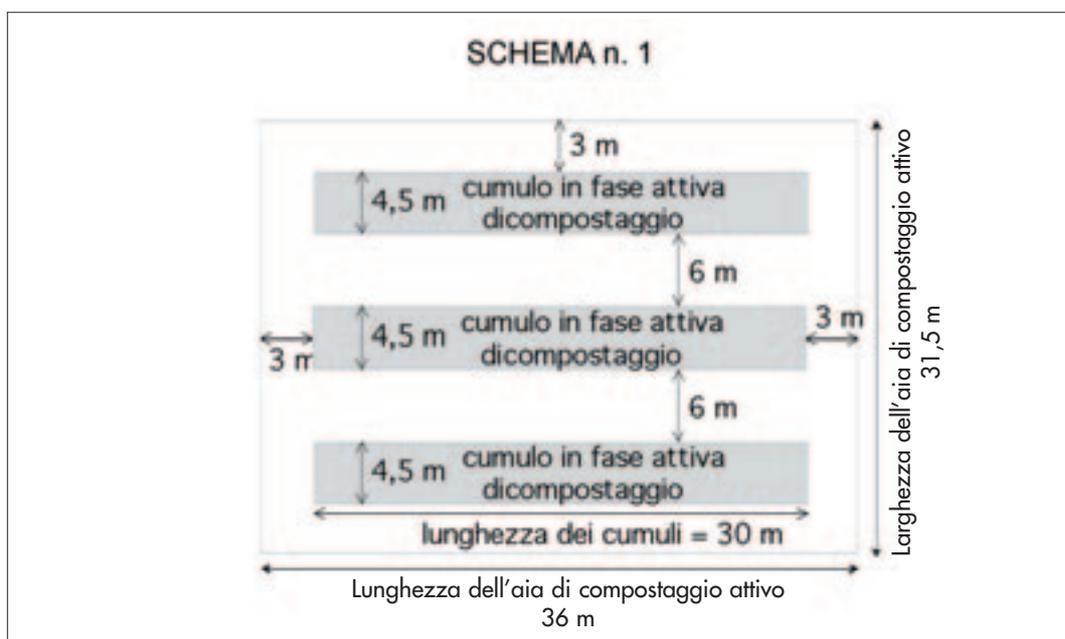
1.5 Considerazioni relative agli spazi di manovra

Quando è previsto il rivoltamento per mezzo di pala meccanica, la larghezza della fascia perimetrale libera intorno ad ogni cumulo, sia lungo i fianchi che nelle testate, viene pruden-

(*) Durante la fase attiva di compostaggio, il materiale subisce una contrazione in volume ed i cumuli sono, di volta in volta, accorpati consentendo un recupero di spazio. Viene qui assunto come fattore di contrazione il valore 0,55.

segue

temente considerata di 3 m. In questo modo, i corridoi tra i cumuli dovranno risultare larghi almeno 6 m per consentire le manovre durante le fasi di movimentazione del materiale (cfr. SCHEMA n. 1)



1.6 Calcolo delle dimensioni complessive dell'area di compostaggio attivo

Sulla base delle assunzioni fatte, le dimensioni dell'area di compostaggio attivo per trattare i materiali considerati, secondo le modalità indicate, risultano le seguenti:

$$\text{Lunghezza } 36 \text{ m} \times \text{Larghezza } 31,5 = 1.134 \text{ m}^2$$

2. Calcolo delle superfici per l'area destinata alla fase di finissaggio

Vengono considerati cumuli di altezza media intorno a 1,7 m e di larghezza pari a 5 m. Tra i cumuli, non essendo previsto alcun rivoltamento durante la fase di finissaggio, vengono lasciati corridoi di 1 m per il solo accesso del personale di controllo.

2.1 Stima del volume del materiale stabilizzato stazionante nell'area di finissaggio

1.155 m^3 (volume totale di materiale fresco immesso nell'area di compostaggio attivo nell'arco di 7 settimane)/49 giorni (periodo di stabilizzazione) = $23,5 \text{ m}^3$ (volume giornaliero di materiale stabilizzato da trasferirsi nell'area di finissaggio).

Considerando un periodo di finissaggio di 35 giorni ed un fattore di contrazione del materiale

segue

stabilizzato di 0,60 , con la moltiplicazione

$$23,5 \text{ m}^3 \times 35 \text{ giorni} \times 0,60 = 493,5 \text{ m}^3$$

si ottiene il volume complessivo del materiale presente nell'area di finissaggio.

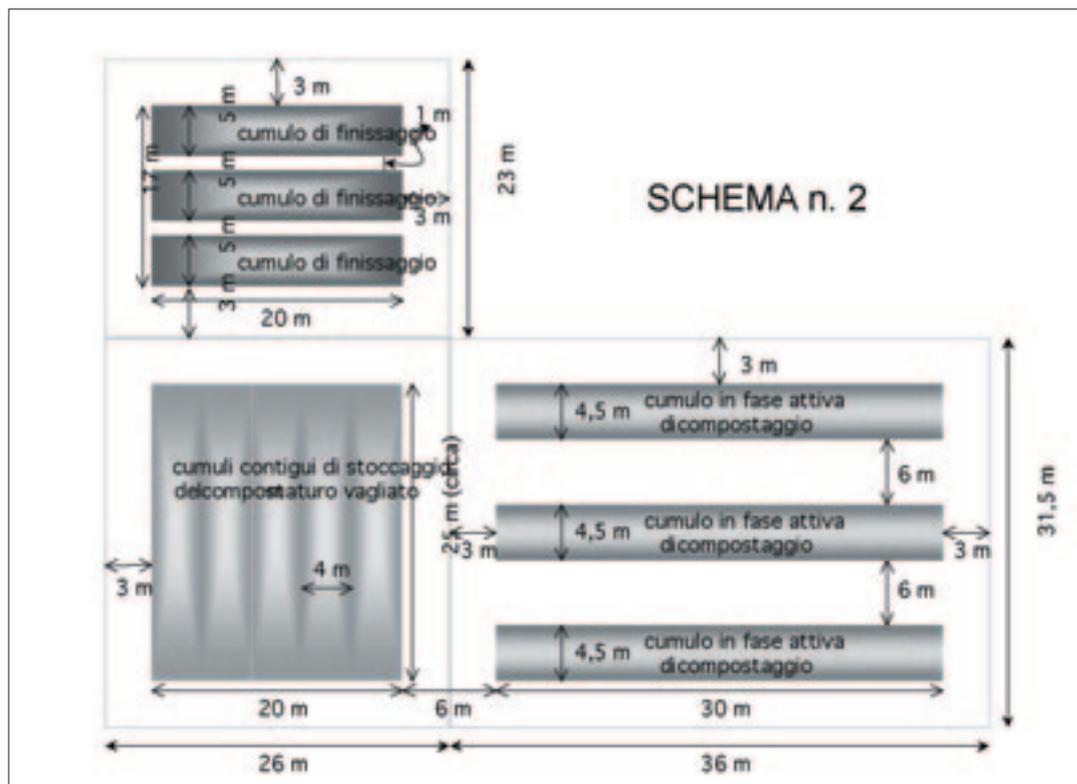
2.2 Calcolo della superficie occupata dai cumuli in area di finissaggio

$$\frac{\text{Volume totale del materiale in finissaggio}}{\text{altezza media dei cumuli}} = \frac{493,5 \text{ m}^3}{1,7 \text{ m}} = \text{ca. } 290 \text{ m}^2$$

Tenuto di conto della larghezza delle andane assunta in 5 m, 3 cumuli di lunghezza pari a ca. 20 m sono sufficienti per ospitare il volume del materiale stabilizzato, per l'intero periodo di finissaggio stabilito.

2.3 Considerazioni relative agli spazi di servizio e di manovra

Per la fascia perimetrale intorno all'area in cui insistono i cumuli di finissaggio, viene considerata una larghezza di 3 m (cfr. SCHEMA n. 2).



segue

3. CALCOLO DELLE SUPERFICI PER L'AREA DI STOCCAGGIO DEL COMPOST MATURO E RAFFINATO

Viene fatta l'assunzione che il prodotto finito sia stoccato, per un massimo di 3 mesi, in cumuli paralleli, adiacenti (senza corridoi intercalari), di altezza pari a 2,5 m. Prima di essere trasferito all'area di stoccaggio, il compost maturato nell'area di finissaggio viene sottoposto a vagliatura per il recupero dell'agente di supporto ligno-cellulosico (cippato di ramaglie). Questa operazione porta ad una ulteriore contrazione del volume di un fattore 0,55.

3.1 Stima del volume di compost maturo nell'area di stoccaggio

Volume giornaliero di compost vagliato destinato allo stoccaggio:
 $23,5 \text{ m}^3 \times 0,55 = \text{ca. } 13 \text{ m}^3$

Volume complessivo occupato dal compost nell'area di stoccaggio:
 $13 \text{ m}^3 \times 90 \text{ giorni} = 1.170 \text{ m}^3$

3.2 Calcolo della superficie occupata dai cumuli in area di stoccaggio

$$\frac{\text{Volume totale del compost raffinato da stoccare}}{\text{altezza media dei cumuli}} = \frac{1.170 \text{ m}^3}{2,5 \text{ m}} = 468 \text{ m}^2$$

3.3 Considerazioni relative agli spazi di servizio e di manovra

Per la fascia perimetrale intorno all'area in cui insistono i cumuli di stoccaggio, viene considerata una larghezza di 3 m (cfr. SCHEMA n. 2).

Nota: Le aree sopra calcolate non comprendono gli spazi aggiuntivi destinati allo stoccaggio dell'agente di supporto ligno-cellulosico, alla eventuale triturazione dello stesso, alla vagliatura del materiale stabilizzato, alla piccola officina e rimessa per le macchine, ai locali per il personale, etc.

4. CALCOLO DELLE RESE DI PROCESSO

La filiera di compostaggio rappresentata nell'esempio qui riportato, quando considerata in termini di riduzione complessiva del volume, tra la miscela di partenza ed il materiale in uscita dall'area di finissaggio, mostra un calo netto di ca. il 70%. D'altra parte, la stessa, se valutata in termini di resa ponderale in prodotto finito rispetto al substrato iniziale trattato, evidenzia un rendimento del 35-36%, come compost maturo prima della vagliatura (densità apparente: 700 kg/m³), il quale si riduce al 21-22%, quando si consideri il solo compost vagliato (densità apparente: 700 kg/m³). In quest'ultimo caso, però, viene recuperato ca. il 15% in peso di agente di supporto da reimpiagare in un nuovo ciclo di stabilizzazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

RYNK R., a cura di (1992). *On-Farm Composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES) - Cooperative Extension, Ithaca, NY.

US COMPOSTING COUNCIL (1991). *Compost Facility Planning Guide*. Washington, DC.

8. I costi economici del compostaggio

I costi da imputare al compostaggio variano in misura considerevole a seconda dei materiali trattati, del metodo di stabilizzazione adottato, delle attrezzature impiegate e dell'uso finale del prodotto ottenuto. Per una valutazione corretta ed affidabile, altri elementi, non strettamente legati agli aspetti tecnologici (es. condizioni ambientali e situazione logistica), devono comunque essere considerati.

8.1 L'analisi costi/benefici

Gli oneri per l'attuazione di una filiera di compostaggio, alla maniera di una qualsiasi altra attività industriale, comprendono, da un lato, i costi di investimento, dall'altro, quelli di gestione e manutenzione. A queste voci, vanno aggiunti, laddove previsti, i costi per le attività di raccolta dei materiali organici e di trasporto degli stessi presso la stazione di compostaggio, i costi derivanti agli eventuali enti pubblici gestori dalla amministrazione del programma ed, infine, i costi di commercializzazione del prodotto finito. È importante comunque che gli amministratori pubblici abbiano ben presenti tutti i fattori di generazione ovvero di abbattimento dei costi, strettamente dipendenti dalle scelte inerenti l'organizzazione della filiera di compostaggio. In effetti, il compostaggio, se correttamente interpretato nell'ambito della gestione complessiva dei rifiuti, può offrire reali vantaggi economici alle comunità coinvolte, i quali possono riassumersi come segue:

- risparmio sui costi di smaltimento in discarica o per incenerimento
- minore impatto ambientale derivante dal più contenuto ricorso a sistemi di smaltimento quali la discarica e l'incenerimento
- estensione dei tempi di vita delle discariche a servizio del territorio interessato
- eliminazione ovvero riduzione dei costi derivanti dall'acquisto di ammendanti per la cura del verde pubblico
- introiti derivanti dalla vendita del prodotto finito
- incentivazione alla raccolta di materiali riciclabili da reimmettere sul mercato
- creazione di nuovi posti di lavoro.

Il costo netto di un programma di compostaggio può essere stabilito attraverso la stima complessiva sia degli oneri di investimento che dei costi di gestione e manutenzione, al netto degli eventuali introiti e/o dei costi non sostenuti grazie all'attuazione del programma stesso. Sia in ambito pubblico che nel settore privato, questo tipo di valutazione economica, indicata come analisi costi/benefici, è largamente impiegata per determinare l'efficacia dell'investimento. Perché sia affidabile, l'analisi costi/benefici deve essere quanto più comprensiva e dettagliata ed in questo senso, il ricorso ad analisti esperti del settore è fortemente consigliabile.

Le amministrazioni pubbliche, per sviluppare i propri programmi di compostaggio, possono scegliere tra una moltitudine di sistemi di raccolta, di soluzioni progettuali di allestimento delle stazioni di trattamento e di tecnologie impiantistiche. Per esempio, attivare un programma di compostaggio per i residui del giardinaggio domestico e della gestione dei parchi pubblici richiederebbe, fatta salva la collaborazione dei cittadini per il conferimento dei rifiuti in oggetto, oneri di investimento e di gestione molto contenuti. D'altra parte, un progetto che preveda il compostaggio dell'organico proveniente dal flusso complessivo dei rifiuti solidi urbani impone importanti impegni finanziari, sia per la realizzazione che per la conduzione della stazione tecnologica, la quale, in questi casi, viene posta solitamente a servizio di un'area più vasta.

In definitiva, il grado di complessità del progetto, che un qualsiasi soggetto promotore - pubblico o privato che sia - può prevedere per la propria attività di compostaggio, dipenderà, prima di tutto, dal livello di impegno del capitale stabilito e, nel caso degli enti pubblici, anche dalle risorse già disponibili in termini di attrezzature e di manodopera, da destinare completamente o in parte alla nuova attività.

8.2 Le voci di costo

8.2.1 I costi di investimento

Rientrano nei costi di investimento tutte quelle voci che concorrono alla realizzazione delle strutture impiantistiche ed alla acquisizione delle attrezzature necessarie per la trasformazione in compost dei materiali organici di interesse.

Progettazione. In primo luogo, dovranno rendersi disponibili le risorse per la progettazione dell'impianto. Al tempo stesso, tuttavia, data la particolare sensibilità delle popolazioni (cfr. Cap. 7, 7.1) nei confronti degli insediamenti industriali legati alle filiere di trattamento dei rifiuti, dovranno trovare copertura economica anche le azioni di informazione e di promozione dell'iniziativa. Successivamente, dovrà essere individuata ed acquisita un'area adeguata sia per le specifiche esigenze di processo, sia per i requisiti di compatibilità ambientale (cfr. Cap. 7, 7.2 e 7.3). Una volta disponibile, il sito dovrà essere sistemato per il compostaggio mediante realizzazione di strutture impiantistiche fisse e l'acquisto di attrezzature e macchine.

Acquisizione del sito. Laddove l'area compatibile con l'insediamento della stazione di compostaggio non sia già di proprietà del soggetto pubblico o privato interessato alla realizzazione del progetto, questa dovrà essere acquistata.

Il costo del terreno dipenderà grandemente dalla tipizzazione in base agli strumenti urbanistici del luogo. In molti casi, un sito più remoto dagli insediamenti civili avrà un minor valore di mercato e, quindi, potrà essere acquistato a condizioni economicamente più vantaggiose. Aree lontane però, se da una parte richiedono minor impegno di capitale, dall'altra influenzeranno negativamente i costi di trasporto dei materiali sia in entrata che in uscita dall'impianto.

Qualora l'impianto fosse realizzato su terreno di proprietà della pubblica amministrazione, il costo d'uso dell'area destinata al compostaggio dovrebbe essere calcolato sulla base del prezzo di mercato eventualmente dovuto per l'affitto della stessa.

Allestimento e sviluppo infrastrutturale dell'area di insediamento. I costi di preparazione del sito possono variare sensibilmente a seconda della dimensione delle strutture impiantistiche e della naturale conformazione del terreno.

La maggior parte dei siti destinati alla realizzazione di una stazione di compostaggio richiederanno la sistemazione idraulica del terreno in modo tale da conferire all'area le giuste pendenze per lo scolo delle acque. In taluni casi, potrebbe rendersi necessaria la costruzione di una vera e propria rete fognante, in modo da fronteggiare efficacemente, date le condizioni climatiche del luogo, l'evacuazione delle acque ed il controllo dei fenomeni di corrivazione superficiale.

Altra importante voce di costo è rappresentata dalla pavimentazione dell'area. Per evitare i rischi di contaminazione del terreno ed, eventualmente, delle acque sotterranee, non è infatti auspicabile organizzare le operazioni di compostaggio su piazzali realizzati in semplice terra battuta (cfr. Cap. 7, 7.2.2). A questo proposito, oltre alla regimazione delle acque meteoriche, dovrà essere assicurata un'accurata captazione dei percolati provenienti dalle superfici di stabilizzazione dei materiali organici.

Impianti di grandi dimensioni richiederanno altresì la realizzazione di un'adeguata rete viaria interna. Non di meno, dovranno prevedersi edifici di servizio per il controllo e l'amministrazione dell'impianto, per le esigenze logistiche del personale e per il ricovero delle attrezzature. Il perimetro della stazione di compostaggio dovrà infine essere appositamente recintato. Per motivi di maggior accettabilità da parte dei residenti, anche una curata sistemazione a verde degli spazi intercalati tra le strutture impiantistiche e di servizio, dovrà auspicabilmente rientrare negli investimenti previsti.

Il collegamento alla rete elettrica ed idrica potrà incidere in maniera più o meno consistente a seconda della distanza dell'impianto dalle stazioni di allacciamento.

Qualora, per ragioni climatiche, si decida di coprire le aree destinate alla biostabilizzazione ed allo stoccaggio dei materiali o, addirittura, per motivi legati al controllo delle emissioni di odori, si debba ricorrere al confinamento di tutte le operazioni in strutture chiuse, i costi di allestimento del sito risulteranno necessariamente più elevati.

Acquisto delle forniture elettro-meccaniche e delle macchine operatrici. Una volta ultimate le opere di sistemazione e le strutture architettoniche, dovranno essere acquisiti i macchinari ed i veicoli necessari per le operazioni di trasformazione e movimentazione dei materiali trattati.

Di nuovo, le stazioni di compostaggio impostate secondo filiere di trattamento a bassa tecnologia si troveranno ad affrontare costi minimi di avviamento. Secondo stime contenute in alcuni documenti di fonte statunitense, trasferibili con gli opportuni correttivi al contesto nazionale italiano, per impianti basati sulla stabilizzazione in cumuli rivoltati mediante semplice pala meccanica a caricamento frontale (*cf.* Cap. 4, 4.2.1), potrebbe essere sufficiente un impegno di 75.000-150.000 Euro, a seconda della potenza della macchina utilizzata (APPELHOF & MCNELLY, 1988; UCONN - CES, 1989). Indipendentemente dal metodo di stabilizzazione adottato, nella maggior parte dei casi, si renderanno necessarie macchine per la triturazione e dilacerazione delle matrici di partenza (*cf.* Cap. 5, 5.1.2). Queste attrezzature richiedono un'ulteriore impegno quantificabile intorno a 50.000-100.000 Euro (UCONN - CES, 1989; WIRTH, 1989), sempre in relazione alla capacità di lavoro. Se è prevista la produzione di compost di elevata qualità, non si potrà rinunciare ad una fase di vagliatura finale del prodotto stabilizzato (*cf.* Cap. 5, 5.3.3). In questo caso, l'acquisizione di un vaglio inciderà per circa 30.000-65.000 Euro, a seconda si tratti di una macchina trasportabile ovvero di una unità fissa (APPELHOF & MCNELLY, 1988).

Stazioni di compostaggio di grandi dimensioni, impostate secondo lo schema di processo in cumuli rivoltati, potrebbero essere tuttavia interessate ad operare con macchine più complesse quali i rivoltatori semoventi cavalca-cumulo (*cf.* Cap. 4, 4.2.1). Queste macchine, se da una parte consentono una maggiore efficienza delle operazioni, hanno tuttavia costi che superano sensibilmente i 250.000 Euro.

Quando la stazione di compostaggio è destinata al trattamento di matrici che obbligano a operazioni preliminari di selezione meccanica delle diverse frazioni merceologiche (es. rifiuti solidi urbani raccolti con il sistema dei cassonetti stradali non differenziati), l'investimento per macchinari diventa molto cospicuo. Separatori magnetici, classificatori balistici, cicloni, vagli di varia foggia, trituratori, mulini, nastri trasportatori e quant'altro possono infatti incidere sui costi di realizzazione dell'impianto per svariate migliaia fino ad alcuni milioni di euro, a seconda della potenzialità della stazione di trattamento.

Tornando al compostaggio di matrici intrinsecamente pulite, con l'adozione dei cumuli statici ad aerazione forzata, che richiedono speciali sistemi di ventilazione, o, addirittura, con il ricorso ai bioreattori, i costi di investimento sono decisamente più alti rispetto alla stabilizzazione in cumuli rivoltati.

Agli oneri per attrezzature e macchinari, devono infine aggiungersi, laddove previsti, i costi relativi ai sistemi di abbattimento e trattamento degli odori.

Formazione del personale. Per l'attivazione di impianti a tecnologia complessa, dovrà prevedersi una voce iniziale di spesa relativa alla preparazione del personale destinato alle operazioni più critiche. In tutti i casi, anche nella gestione di stazioni di compostaggio di piccole o medie dimensioni, la cosa fondamentale è che gli addetti abbiano piena coscienza del processo e degli obiettivi di qualità del prodotto che devono essere raggiunti. Ciò rappresenta uno strumento estremamente valido per prevenire gravi e costosi errori operativi.

8.2.2 I costi di gestione e di manutenzione

Sono costi di gestione e manutenzione tutte le spese necessarie al funzionamento ed al mantenimento dell'attività produttiva presso l'impianto di compostaggio. Tipiche voci che concorrono a questi costi sono la manodopera, i consumi energetici sia in termini di elettricità che di carburanti, l'acqua per il processo ed i servizi, le polizze assicurative, gli interventi di riparazione dei macchinari e la manutenzione dei veicoli. Ai suddetti oneri dovranno aggiungersi i costi di approvvigionamento di alcuni residui organici, laddove la stazione di compostaggio, per l'attuazione dei cicli di stabilizzazione, necessita di materiali (es. matrici ligno-cellulosiche) reperibili a solo titolo oneroso. Questi costi devono essere correttamente stimati in fase di progettazione perché costituiscono l'elemento fondamentale per determinare la fattibilità del programma di compostaggio, sia in termini di servizio pubblico che di attività imprenditoriale privata.

Costi di raccolta. Per quanto riguarda gli impianti di compostaggio operanti come strutture di servizio, solitamente a gestione pubblica, finalizzate allo smaltimento dei rifiuti di una determinata comunità, uno dei principali fattori che vanno a incidere sui costi globali di funzionamento è rappresentato dal sistema di raccolta dei residui organici adottato.

È evidente che in comprensori caratterizzati da una popolazione distribuita in centri abitati di dimensioni piccole o medie, il ricorso a sistemi basati sulla raccolta presso apposite isole attrezzate (*drop-off collection*) per il conferimento dei rifiuti organici di origine domestica, ivi compresi i residui del giardinaggio, può rappresentare un'opzione dai costi contenuti. L'attuazione di un programma di asporto di questo tipo è possibile però soltanto in presenza di condizioni urbanistiche compatibili (es. disponibilità di spazi adeguati per le stazioni di conferimento). Per soddisfare la gestione del rifiuto urbano nel suo complesso, resta comunque, in questi casi, la necessità di assicurare anche l'allontanamento delle frazioni non compatibili con la biostabilizzazione, il cui onere, anche se non imputabile direttamente al compostaggio, dovrà però essere considerato come voce di costo del servizio generale di smaltimento. Altro sistema di asporto dell'organico è rappresentato dalla raccolta porta-a-porta (*curbside collection*), in contenitori differenziati per tipologia o colore da quelli contenenti le frazioni non compostabili. Questo metodo è certamente più costoso del precedente, anche se, d'altra parte, consente un recupero più spinto dei rifiuti organici non contaminati da materiali indesiderati. Resta, infine, il sistema di raccolta basato sull'asporto del rifiuto non differenziato (*commingled waste collection*), tradizionalmente usato dalle municipalità per l'allontanamento dei rifiuti sia dalle utenze private che da quelle commerciali. La raccolta del rifiuto tal quale, attraverso il sistema dei cassonetti, anche se risulta più economica dal punto di vista dell'attuazione e, di certo, meno impegnativa per gli abitanti serviti, non consente tuttavia di ottenere una frazione organica compatibile con la produzione di compost di qualità, senza contare gli alti costi di investimento e di funzionamento relativi alla filiera di separazione meccanica a valle della raccolta.

Passando alle stazioni di compostaggio a gestione privata, finalizzate soprattutto alla produzione di ammendanti di elevate specifiche qualitative piuttosto che alla funzione di servizio e smaltimento dei rifiuti, il problema dei costi di raccolta dell'organico va considerato in un'ottica assai diversa. Dati gli obiettivi di qualità prefissati, questi impianti, di solito, trasformano rifiuti organici di natura agro-industriale, limitando spesso l'ingresso di matrici di derivazione urbana ai soli residui provenienti dalla gestione dei giardini e del verde pubblico. In questi casi, il costo di raccolta delle matrici organiche necessarie per la filiera produttiva dovrebbe risultare nullo o riconducibile al solo costo di trasporto dalla fonte all'impianto. Ciò in ragione del fatto che, nella maggior parte delle situazioni, i soggetti produttori di residui organici compostabili sono disponibili a conferire gratuitamente, o dietro riconoscimento di un contributo per le spese di trasporto, materiali che altrimenti dovrebbero smaltire a titolo oneroso. Queste condizioni risultano di sicuro vantaggio sia per i soggetti industriali produttori di rifiuti putrescibili o di scarti ligno-cellulosici, sia per i soggetti inte-

ressati alla produzione di compost, i quali possono così contare sull'approvvigionamento delle materie prime a costo limitato o addirittura nullo.

Costi per manodopera. La quantità di lavoro richiesta per il funzionamento di una stazione di compostaggio dipende sia dal volume e dalla tipologia di rifiuti organici trattati, sia dal livello tecnologico impiegato per l'attuazione del processo. La totalità degli impianti necessita, come minimo, di personale per la ricezione dei materiali, la preparazione delle matrici di partenza, l'allestimento dei cumuli ovvero l'alimentazione dei reattori e la gestione del prodotto finito. In molti casi dovrà essere considerato anche il personale addetto alla manutenzione ed alle funzioni amministrative. Un impianto di compostaggio a bassa tecnologia, destinato alla biostabilizzazione di una quantità variabile da 2.500 a 3.500 m³/anno di residui organici del giardinaggio e della manutenzione del verde pubblico, potrebbe funzionare con due persone a tempo parziale, l'una destinata ad operare con la pala meccanica per l'allestimento dei cumuli ed il rivoltamento degli stessi, l'altra adibita alla preparazione del substrato di partenza, al controllo del processo ed ai piccoli interventi di manutenzione. È stato stimato che un'impianto con queste caratteristiche richieda dalle 135 alle 150 ore lavorative per produrre compost (MA - DEP, 1991).

Come la complessità delle strutture impiantistiche e del programma operativo della stazione di compostaggio cresce, di pari passo aumenta il numero degli addetti necessari per lo svolgimento delle varie attività previste dalla filiera produttiva. Così, per esempio, una stazione di compostaggio basata su uno schema di processo ad elevato contenuto di tecnologia (es. cumuli statici con insufflazione forzata o rivoltati con macchine speciali), applicato al trattamento di rifiuti organici da raccolta differenziata, per quantità uguali o superiori ai 50.000-60.000 m³/anno, avrà certamente bisogno di un direttore d'impianto per la supervisione, di operatori specializzati per le varie tipologie di macchine e veicoli, di operai addetti alla ricezione ed alla preparazione delle matrici in entrata all'impianto, alla gestione del prodotto finito (es. insaccamento) ed alla manutenzione, nonché di impiegati con funzioni amministrative.

In assoluto, i costi di manodopera raggiungono la massima incidenza presso le stazioni di compostaggio dell'organico da rifiuti urbani le quali prevedono anche la fase di selezione meccanica del rifiuto in entrata.

Costi energetici. Si tratta dei costi derivanti dal consumo di energia elettrica. Questa voce costituirà una frazione importante dei costi di gestione della stazione di compostaggio nei casi in cui la filiera di trattamento preveda un ricorso consistente ad apparecchiature elettro-meccaniche. Ancora una volta, gli impianti di compostaggio che operano la selezione del rifiuto urbano evidenziano, anche sul fronte energetico, oneri di gestione molto elevati, a fronte delle stazioni di trattamento di matrici organiche selezionate alla fonte, di solito basate su schemi di trattamento meno energivori. Vagli, trituratori, mulini, separatori magnetici o balistici e nastri trasportatori incidono fortemente sulla bolletta elettrica. Allo stesso modo, i sistemi basati sull'impiego di cumuli statici ad aerazione forzata ovvero sul ricorso a bioreattori consumeranno più elettricità dei sistemi in cumuli rivoltati meccanicamente. È importante tuttavia considerare il fatto che, in questi casi, può aversi una sorta di compensazione dovuta ad un minor consumo di carburanti per autotrazione. Secondo quanto riportato da Glaub e collaboratori (GLAUB *et al.*, 1989) con riferimento al compostaggio della frazione organica dei rifiuti solidi urbani, il processo basato sul sistema dei cumuli rivoltati richiede energia in misura di ca. 21,5 kWh/t di matrice iniziale trattata, a fronte di ca. 25 kWh/t e di ca. 30 kWh/t, rispettivamente, per quanto riguarda i sistemi a cumuli statici con aerazione forzata ed i sistemi che utilizzano bioreattori.

Carburanti, pezzi di ricambio ed altri materiali di consumo. L'approvvigionamento di carburanti e lubrificanti sarà funzione dei veicoli e dei tempi di utilizzo degli stessi nell'ambito della stazione di compostaggio.

Per evitare eventuali antieconomiche soste prolungate a seguito di guasti alle macchine operatrici od alle componenti elettro-meccaniche, è importante disporre presso l'impianto di un'adeguata dotazione di pezzi di ricambio, relativamente alle componenti maggiormente soggette ad usura e rottura, per le quali non sia possibile l'immediata acquisizione dai rivenditori di zona. I costi per il magazzino ricambi saranno tanto più elevati quanto più sofisticata, in termini di macchinari ed autoveicoli, risulterà la stazione di compostaggio. È evidente, peraltro, che il grado di utilizzo e, quindi, di usura dei macchinari sarà determinato dalle quantità di matrici organiche trattate nell'unità di tempo (dimensione e capacità dell'impianto). Con un'attenta programmazione degli interventi di manutenzione dei macchinari e dei veicoli è comunque possibile ridurre al minimo i rischi di fermo-macchina.

Tra i costi per materiali di consumo, laddove la stazione di compostaggio sia dotata di un sistema di abbattimento degli odori con torri di lavaggio delle emissioni, i reagenti chimici possono costituire una voce importante di spesa.

Altri costi di gestione. Nella normale gestione dell'impianto di compostaggio, dovranno prevedersi anche i costi per le analisi di laboratorio necessarie al corretto monitoraggio del processo ed alla caratterizzazione dei materiali.

Nel caso di impianti destinati alla selezione dei rifiuti urbani ed alla successiva biostabilizzazione della frazione organica ottenuta, costituirà voce di costo per il funzionamento complessivo della filiera produttiva anche lo smaltimento appropriato delle componenti merceologiche non compostabili.

8.3 I vantaggi

8.3.1 I costi mancati

Come già accennato, nell'analisi costi/benefici alla base del progetto per una stazione di compostaggio, si dovrà tenere debito conto dei costi evitati grazie al mancato ricorso ad altre forme di trattamento. Ciò vale soprattutto per gli impianti a gestione pubblica o comunque, ancorché privata, a servizio di una comunità sulla quale finirà per essere caricata la tariffa di trattamento e/o smaltimento dei rifiuti.

Tra i costi mancati, al primo posto si collocano gli oneri non sostenuti per smaltimento in discarica o per incenerimento delle matrici organiche, dirottate invece verso la biostabilizzazione. Il conferimento in discarica o all'incenerimento delle sole componenti del rifiuto compatibili con queste forme di trattamento, consente, di riflesso, una maggiore durata dei suddetti impianti di smaltimento massivo e, quindi, sostanziali risparmi sui costi di investimento per nuove strutture. Il mancato interrimento della componente putrescibile del rifiuto urbano, riduce inoltre drasticamente i costi di esercizio delle discariche, legati soprattutto al trattamento del percolato ed alla gestione del biogas.

8.3.2 I proventi

Se il ricorso al compostaggio rappresenta per una comunità la scelta finalizzata non solo al mero smaltimento di parte del rifiuto urbano ma, al tempo stesso, anche la possibilità di recuperare la frazione organica a fini economici, ciò si dovrà tradurre nella produzione e nella commercializzazione di un prodotto finito di elevate caratteristiche qualitative. I proventi derivanti dalla vendita del compost andranno a bilanciare parte dei costi associati all'attuazione dell'intero programma di compostaggio. È peraltro impensabile che gli impianti di compostaggio inseriti nei piani complessivi di gestione pubblica dei rifiuti dei comprensori di riferimento possano pareggiare i costi di investimento ed esercizio con la sola commercializzazione del prodotto finito. Altrettanto evidente

è comunque il fatto che, per trovare uno sbocco commerciale, il compost ottenuto dovrà rispondere a precisi parametri qualitativi, il cui raggiungimento rimane fortemente legato alle caratteristiche delle matrici in entrata all'impianto. Ciò fa della raccolta differenziata un presupposto irrinunciabile per le prospettive di apprezzamento del prodotto da parte del mercato.

Se i proventi derivanti dalla vendita del compost sono calcolati come prezzo pagato dall'acquirente per tonnellata di prodotto finito, ai fini del computo dei costi di trattamento dei materiali in entrata alla stazione di compostaggio, dovrà essere tenuto presente il rapporto tra tonnellate di ammendante ottenuto a fronte delle tonnellate di substrati di partenza necessari per produrre quel determinato quantitativo di compost. Così, se il prodotto finito viene venduto a ca. 40 Euro/t e la filiera di compostaggio adottata consente di ottenere 1 t di compost partendo da 4 t di matrice iniziale, ciò significa che il rientro sarà pari a ca. 10 Euro/t di rifiuti organici.

Per le stazioni di compostaggio a conduzione privata, finalizzate alla produzione di ammendanti ad uso specialistico e per le quali l'aspetto di servizio è spesso del tutto secondario rispetto alle esigenze produttive, i proventi derivanti dalla vendita del prodotto finito dovranno, invece, coprire tutti i costi sostenuti ed assicurare un congruo guadagno.

8.4 Analisi di casi esemplificativi

Dal momento che, per il compostaggio, risulta ad oggi ancora assai difficile quantificare, in maniera tabellare, i costi medi da applicare nelle situazioni più disparate, la descrizione di alcuni modelli per il dimensionamento e l'ottimizzazione di filiere di trattamento largamente rappresentative di casi reali può costituire un utile strumento di valutazione.

In *Appendice 2*, vengono presi in considerazione due tipi di stazioni di compostaggio, l'una attrezzata per la produzione di compost a partire dalla frazione organica dei rifiuti urbani da raccolta secco/umido con cassonetti stradali, l'altra destinata alla stabilizzazione dei residui organici da raccolta differenziata alla fonte, presso gli utenti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

APPELHOF M. & McNELLY J. (1988). Yard waste composting guide. Michigan Department of Natural Resources, Lansing, MI.

GLAUB J, DIAZ L. & SAVAGE G. (1989). Preparing MSW for cpmposting. *In*: The BioCycle Guide to Composting Municipal Wastes, JG Press Inc., Emmaus, PA.

MA – DEP (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION) (1991). Leaf and yard waste composting guidance document. Division of Solid Waste Management, Boston, MA.

UConn - CES (UNIVERSITY OF CONNECTICUT - COOPERATIVE EXTENSION SERVICE) (1989). Leaf composting: A guide for municipalities. State of Connecticut Department of Environmental Protection, Local Assessment and Progress Coordination Unit – Recycling Program, Hartford, CT.

WIRTH R. (1989). Introduction to composting. Minnesota Pollution Control Agency, St. Paul, MN.

9. La raccolta differenziata alla fonte come strumento di ottimizzazione del recupero di matrici organiche destinate al compostaggio

A causa della eterogeneità – determinata soprattutto dalla estrema varietà dei flussi di materiali attraverso il sistema delle famiglie e delle imprese – il rifiuto urbano può essere considerato come un materiale ad elevata entropia.

Fin tanto che nei servizi di cosiddetta igiene urbana prevarrà l'aspetto sanitario, cioè il problema del pronto allontanamento del rifiuto dall'ambito domestico, in maniera del tutto indipendente dalle esigenze connesse con i successivi trattamenti, l'eterogeneità dei consumi si trasferirà, giocoforza, al flusso dei rifiuti, consegnando alla fase di trattamento un materiale indistinto. Quest'ultimo, assieme ai materiali suscettibili di valorizzazione, comprenderà materiali indesiderati, sia inerti sia, talvolta, potenzialmente inquinanti in quanto in grado di rilasciare elementi xenobiotici cioè estranei ai cicli biogeochimici naturali.

I sistemi di selezione meccanica sono solitamente caratterizzati da un rendimento specifico che, pur aspirando al 100%, ossia alla completa separazione delle singole componenti del rifiuto, denunciano, in realtà, rendimenti molto più bassi. In *Tabella 9.1*, sono riportati alcuni dati tipici relativi alla capacità di separazione, espressa come percentuale delle diverse frazioni merceologiche del rifiuto urbano, passanti attraverso vagli con fori di diametro, rispettivamente, di 60 ed 80 mm. Una separazione ideale dovrebbe consentire il passaggio nel sottovaglio del solo flusso di materiali organici (100% di passaggio), relegando nel sopravaglio le componenti non compostabili (0% di passaggio), o viceversa.

Alcuni sistemi per l'ulteriore incremento del processo di separazione (es. affinamento dimensionale, separazione densimetrica), pur mirando a migliorare lo stato qualitativo dell'organico recuperato, non riescono tuttavia ad assicurarne una separazione assoluta dalle altre frazioni. Si avrà, perciò, da un lato, un organico ancora piuttosto contaminato da materiali non desiderati (macro-e micro-inquinanti), dall'altro, un flusso di frazioni non compostabili, commiste a quantitativi non trascurabili di organico putrescibile.

Tabella 9.1 - Frazionamento del rifiuto urbano passato attraverso vagli con diverso diametro dei fori

Frazione	Passaggio al vaglio di ø 60 mm	Passaggio al vaglio di ø 80 mm
Carta e cartone (%)	12,7	21,5
Plastica in film (%)	18,9	27,7
Plastica dura e gomma (%)	23,7	34,2
Tessili (%)	7,7	27,0
Legno (%)	39,3	50,0
Metalli (%)	22,7	48,0
Vetro (%)	56,6	80,2
Altro (%)	38,5	53,6
Frazione organica putrescibile (%)	63,3	83,4

Nei sistemi intesi alla produzione di compost di qualità, è dunque assolutamente necessario consegnare alla filiera di processo un flusso di matrice organica con il minimo di contaminazione da materiali indesiderati.

La modellizzazione di cui alle tabelle successive servirà ad una più nitida percezione del concetto. In *Tabella 9.2* viene rappresentata la composizione del rifiuto urbano non intercettato dalla raccolta differenziata in uno scenario tipico di molti distretti socio-economici italiani, assumendo una situazione comune per la maggior parte delle raccolte differenziate di tipo "tradizionale", ossia l'adozione di contenitori stradali (tipo campana o cassonetto) distribuiti sul territorio.

Tabella 9.2 - Quadro delle frazioni di rifiuto urbano non intercettato con il sisema della raccolta tradizionale dei contenitori stradali.

Frazione	Rifiuto residuo (kg/ab/anno)	%
Carta e cartone	90,3	24,5
Plastica in film	32,4	8,8
Plastica dura e gomma	10,15	2,8
Tessili	20,25	5,5
Legno	16,2	4,4
Metalli	14,175	3,8
Vetro	21,45	5,8
Altri inerti	14,175	3,8
Frazione organica putrescibile	149,85	40,6
Totale	368,95	100

I quantitativi non intercettati dalla raccolta differenziata corrispondono a quelli riportati nella seconda colonna. La separazione di parte delle frazioni secche (carta, plastica e vetro) consente una leggera concentrazione dell'organico all'interno del rifiuto residuo. Tuttavia, questo contiene ancora in prevalenza materiali non compostabili.

Se al rifiuto residuo, una volta avviato all'impianto di compostaggio, applichiamo le percentuali di separazione di cui alla *Tabella 9.1*, otteniamo la composizione del flusso di sottovaglio, così come evidenziato in *Tabella 9.3*.

Per facilitare la lettura dei dati, sono state evidenziate in neretto le righe relative alle frazioni potenzialmente suscettibili di compostaggio (carta e cartone, legno, scarto alimentare), restituendo poi la quantità complessiva di materiali compostabili, in termini percentuali di sottovaglio.

In sintesi, anche nella situazione più favorevole, vale a dire con vagliatura a 60 mm, è possibile ottenere soltanto il 78,5% di materiale compostabile all'interno del flusso di sottovaglio. Ciò signifi-

Tabella 9.3 - Composizione del flusso di sottovaglio ottenibile dal rifiuto residuo, dopo raccolta differenziata con cassonetti e campane stradali.

Frazione	al passaggio al vaglio di		SOTTOVAGLIO (kg/ab/anno)		SOPRAVAGLIO (kg/ab/anno)		SOTTOVAGLIO (%)		SOPRAVAGLIO (%)	
	ø 60 mm	ø 80 mm	ø 60 mm	ø 80 mm	ø 60 mm	ø 80 mm	ø 60 mm	ø 80 mm	ø 60 mm	ø 80 mm
Carta e cartone	12,7	21,5	11,4	19,4	78,9	70,9	8,0	9,6	35,0	42,4
Plastica in film	18,9	27,7	6,1	9,0	26,3	23,4	4,3	4,4	11,7	14,0
Plastica dura e gomma	23,7	34,2	2,4	3,5	7,7	6,7	1,7	1,7	3,4	4,0
Tessili	7,7	27,0	1,6	5,5	18,7	14,8	1,1	2,7	8,3	8,9
Legno	39,3	50,0	6,4	8,1	9,8	8,1	4,4	4,0	4,4	4,9
Metalli	22,7	48,0	3,2	6,8	11,0	7,4	2,2	3,4	4,9	4,4
Vetro	56,6	80,2	12,1	17,2	9,3	4,2	8,5	8,5	4,1	2,5
Altro	38,5	53,6	5,5	7,6	8,7	6,6	3,8	3,8	3,9	3,9
Frazione organica putrescibile	63,3	83,4	94,8	124,9	55,1	25,0	66,1	61,9	24,4	14,9
Percentuale complessiva dei materiali compostabili							78,5	75,5		

fica che si ha ancora la presenza del 21,5% di materiali indesiderati e/o contaminanti. Di questi, quelli responsabili di una mera contaminazione fisica del prodotto finale (es. frammenti vari di vetro e plastica, cocci, ecc.) potranno essere in buona parte allontanati attraverso vagliatura a fine processo; gli altri, in grado di rilasciare sostanze tossiche (es. metalli pesanti, microinquinanti organici), finiscono invece per rappresentare una contaminazione *permanente* del compost. Si tratta di percentuali di materiali estranei ben più elevate di quelle generate da sistemi di raccolta differenziata alla fonte (anche di media efficacia).

La raccolta differenziata non può dunque essere trascurata da chi deve pianificare la gestione dei rifiuti finalizzata al recupero di materia, di cui il compostaggio è un aspetto. Quanto sopra, al fine di promuovere la qualità dei flussi avviati al sistema di riciclaggio, in modo da:

- semplificare le operazioni di pre- e post- trattamento, migliorando la gestione complessiva dei materiali presso le stazioni di trattamento.
- diminuire i rischi di contaminazione della matrice organica, influenzando in maniera sostanziale sulla qualità del compost finale;
- contribuire agli obiettivi di raccolta differenziata, secondo le indicazioni del D.lgs. 22/97

9.1 Sviluppo e prospettive della raccolta delle frazioni compostabili in Italia

In Italia, la recente normativa ha dato un forte impulso alla ridefinizione delle strategie di gestione dei rifiuti. Il già citato D.lgs. 22/97 stabilisce un obiettivo di raccolta differenziata del 35%, a medio termine. Questa disposizione di legge ha fortemente promosso lo sviluppo della raccolta differenziata dei rifiuti organici, i quali, costituendo una frazione importante del rifiuto, contribuiscono in maniera sostanziale, una volta intercettati, al raggiungimento degli obiettivi. L'attivazione di raccolte differenziate "secco-umido", ossia basate sulla separazione alla fonte della frazione "umida" - quella alimentare - del rifiuto urbano, ha introdotto in Italia criteri operativi già da tempo attuati in numerosi Paesi europei. In particolare, negli Stati centrali dell'Unione Europea, la valorizzazione degli scarti organici mediante compostaggio costituisce la regola, non certo l'eccezione.

Questi Paesi hanno da tempo introdotto, progressivamente ma diffusamente, la separazione dei residui organici come priorità nei sistemi integrati di gestione dei rifiuti. La Germania, per esempio, ha introdotto in maniera sistematica la separazione alla fonte del "rifiuto biologico" fin dalla metà degli anni '80, allo scopo di trovare una soluzione al problema della contaminazione della frazione organica a causa dei microinquinanti. Ciò, a seguito del contenuto elevato in elementi potenzialmente pericolosi riscontrato nel flusso di organico ottenuto con i primi tentativi di recupero della frazione putrescibile dei rifiuti urbani mediante processi di selezione meccanica a valle della raccolta. (GRUENEKLEE, 1997).

I dati relativi al *Rapporto Rifiuti 2001* ANPA-ONR, riferiti all'anno 1999, mostrano che la capacità complessiva degli impianti di compostaggio di qualità nel Paese assommava a ca. 2.175.155 t/anno. Di questa potenzialità, soltanto una quota, equivalente a 1.360.604 t/anno, risultava effettivamente utilizzata. Tale capacità, concentrata soprattutto al Nord (1.715.218 t/anno potenziali, contro 1.145.884 t/anno effettivamente utilizzate), corrisponde, a ca. 37,7 kg/ab/anno di capacità potenziale e 23,6 kg/ab/anno di effettivo utilizzo, con riferimento alla popolazione nazionale totale (tabelle 9.4-9.7). Giova qui considerare il fatto che la potenzialità operativa viene sfruttata spesso in "coabitazione" con il trattamento di altre biomasse compostabili, quali fanghi biologici e scarti agroindustriali, che non rientrano nel computo dei rifiuti urbani (RU). D'altra parte, l'ammontare complessivo delle raccolte differenziate di scarti organici di derivazione urbana (in sintesi, scarti alimentari e residui di manutenzione del verde ornamentale) è stata computata, sempre con riferimento al

Tabella 9.4 - Impianti di compostaggio di rifiuti selezionati (anno 1999)

Provincia	Comune	Potenzialità totale (t/anno)	Rifiuto trattato (t/anno)	Frazione organica selezionata	Verde	Fanghi	Altro
AL	Tortona	33.000	32.700		8.300	21.400	3.000
AL	Alessandria	40.000	14.330	12.700	1.630		
AL	Casal Cermelli	12.000	11.400	3.500	3.000	4.900	
AT	Asti	1.000	1.000		1.000		
BI	Biella	2.550	2.550		2.550		
BI	Cavaglià	200	200		200		
BI	Ponderano	1.000	92		92		
BI	Vigliano Biellese	1.000	1.000		1.000		
CN	Bagnasco	3.000	745		745		
CN	Caraglio	1.000	962		962		
CN	Cavallermaggiore	1.000	1.000		1.000		
CN	Costigliole Saluzzo	15.000	2.000		2.000		
CN	Magliano Alfieri	13.000	5.000		4.000	1.000	
CN	Racconigi	1.000	1.000		1.000		
CN	Saluzzo	37.140	30.600		4.500	19.000	7.100
CN	Sommariva Perno	27.000	25.902	122	5.060	20.720	
NO	Bellinzago Novarese	4.000	3.627		3.627		
NO	Ghemme	20.000	2.554		2.154	400	
NO	Novara	25.000	13.494	3.461	10.033		
NO	San Nazzaro Sesia	20.000	20.000		20.000		
NO	Varallo Piombia	10.000	10.000		10.000		
TO	Albiano d'Ivrea	1.000	1.000		1.000		
TO	Borgaro T.se	53.700	12.970	5.170	7.800		
TO	Carmagnola	1.000	1.000		1.000		
TO	Carmagnola	1.000	75		75		
TO	Castagnole	1.500	1.456		1.456		
TO	Chieri	1.000	800		800		
TO	Chieri	500	70		70		
TO	Collegno	11.000	4.450		4.450		
TO	Osasco	1.000	1.000		1.000		
TO	Osasio	1.000	237		237		
TO	Pragelato	100	100		100		
TO	Rivarolo Cse	1.000	2		2		
TO	Torino	8.000	6.000		6.000		
TO	Torino	2.600	2.600		2.600		
VB	Omegna	1.000	1.000		1.000		
VB	Verbania	1.000	1.000		1.000		
	Totale Piemonte	354.290	213.916	24.953	111.443	67.420	10.100
BG	Calcinante	57.000	45.936	17.419	28.517		
MI	Garbagnate	400					
BG	Ghisalba	27.300	43.683		26.724	16.959	
BG	Grassobio	6.900	5.081	5.081			
BG	Montello	65.000	38.707	33.914	4.793		
BS	Bagnolo Mella	80.000	14.499	13.228	1.271		

segue Tabella 9.4

Provincia	Comune	Potenzialità totale (t/anno)	Rifiuto trattato (t/anno)	Frazione organica selezionata	Verde	Fanghi	Altro
BS	Chiari	4.000	3.895		301	3.594	
BS	Orzinuovi	21.000	23.563		2.391	21.172	
CO	Anzano al Parco	11.000	2.463		2.463		
CO	Cirimido	20.000	9.529		9.529		
CO	Vertemate	5.000	995		995		
CO	Villa Guardia	10.000	6.426		6.426		
LC	Ballabio	2.000	40		40		
MI	Arconate	400	400		400		
MI	Cernusco sul Naviglio	1.000	999		999		
MI	Corbetta	4.600	3.286		3.286		
MI	DESIO	5.000	4.990		4.990		
MI	Milano Muggiano	43.000	2.283	1.370	913		
MI	Novate Milanese	5.000	4.999		4.999		
MI	Robecchetto con Induno	400	399		399		
MI	Seveso	400	400		400		
MI	Tainate di Naviglio	9.000	27.790		27.790		
MI	Triuggio	400	395		395		
MI	Vimercate	5.000	5.625		5.625		
MN	Castiglione di Stiviere	8.800	4.503	1.469	3.034		
MN	Ceresara		1.283		1.283		
MN	Mantova	9.000	2.569	85	2.266	218	
PV	Corte Olona	15.000	7.465		7.465		
PV	Ferrara Erbognone	20.000	8.119		8.119		
PV	Vidigulfo	25.000	32.165		4.737	27.428	
SO	Cedrasco	18.000	2.319	1.043	1.276		
VA	Besano	7.300	3.098	1.500		1.598	
VA	Castel Seprio	6.000	4.023		3.828		195
VA	Gallarate	8.000	3.045		3.045		
VA	Gorla Minore	1.000	1.000		1.000		
VA	Luino	400	393		393		
VA	Origgio	12.000	11.500		11.500		
VA	Travedona Munate	350	135		135		
VA	Velmaio Arcisate	400	66		66		
	Totale Lombardia	515.050	328.067	75.109	181.793	70.969	195
BZ	Aldino	5.500	4.711	110	2.101		2.500
BZ	Appiano	4.500	791		83		708
BZ	Brunico	4.500	1.291	834	457		
BZ	Campo Tures	4.000	476	400	76		
BZ	Cortaccia	500	313	225	88		
BZ	Glorenza	300	200		75	125	
BZ	Naturno	4.400	3.690	1.890	1.800		
BZ	Natz-Sciaves	3.000	1.549	852	697		
BZ	Prato allo Stelvio	750	100		50	50	
BZ	S. Martino in Passiria	500	200		100	100	

IL RECUPERO DI SOSTANZA ORGANICA DAI RIFIUTI
PER LA PRODUZIONE DI AMMENDANTI DI QUALITÀ

segue Tabella 9.4

Provincia	Comune	Potenzialità totale (t/anno)	Rifiuto trattato (t/anno)	Frazione organica selezionata	Verde	Fanghi	Altro
BZ	Silandro	900	465	440	25		
BZ	Tires	300	204	104	100		
TN	Levico Terme	14.245	10.745		1.745	9.000	
TN	Monclassico	160	159	79	79		
TN	Trento	53.013	12.023	1.651	2.255	7.967	150
	Totale Trentino Alto Adige	96.568	36.917	6.585	9.731	17.242	3.358
PD	Este	62.000	51.017	31.736	17.173	1.740	368
PD	Vigonza	21.000	19.762	2.671	7.925	5.956	3.210
PD	Vigonza	28.000	18.486		12.658	5.166	662
RO	Rovigo	32.000	53.004		8.743	43.001	1.260
VE	Mira	45.000	42.436	16.633	21.339	4.085	379
VR	Cerea	35.000	35.949	5.471	3.560	25.998	920
VR	Isola della Scala	35.000	31.084	6.168	9.547	7.184	8.185
VR	Isola della Scala	35.000	34.034	34.034			
VR	S. Bonifacio	37.000	34.622		4.745	16.372	13.505
VR	Villa Bartolomea	40.000	28.034	18.984	4.762	4.262	26
	Totale Veneto	370.000	348.428	115.697	90.452	113.764	28.515
GO	Staranzano	1.250	1.723		1.723		
UD	S.Giorgio di Nogaro		5.065		5.065		
TS	Trieste	1.000	470		470,0		
	Totale Friuli Venezia Giulia	2.250	7.258	-	7.258	-	-
IM	Taggia	10.000	2.909		2.909		
IM	Taggia	16.000	8.000		8.000		
	Totale Liguria	26.000	10.909	-	10.909	-	-
BO	Ozzano	9.000	8.780	2.000	6.780		
BO	S.Agata Bolognese	21.000	15.266	8.812	3.644	215	2.595
FO	Cesena	60	50		50		
FO	Cesenatico	4.000	2.581		2.228	348	5
FO	Cesenatico	11.000	7.005	4.093	70		2.842
FO	S.Sofia	15.000	4.833		119		4.714
MO	Carpi - Loc Fossoli	70.000	30.961	8.730	19.317	181	2.733
MO	Castelvetro	30.000	25.985	532	7.205	3689	14.559
MO	Sassuolo	2.500	-				
MO	Soliera	8.500	2.444		143		2.301
PC	Sarmato	85.000	51.076				51.076
RA	Faenza	25.000	25.000	3.000	4.000	3.750	14.250
RA	Faenza	20.000	8.867	3.800	204	4.863	
RA	Ravenna	20.000	2.737		1.367	1.370	
RN	Rimini	30.000	14.804	9.623	5.181		
	Totale Emilia Romagna	351.060	200.389	40.590	50.308	14.416	95.075
FI	Campi Bisenzio	20.160	18.790	1.031	16.534		1.225
FI	Empoli	14.000	35.617	20.372	3.870	43	11.332
FI	Sesto Fiorentino	14.600	6.425	3.708	2.623		94
LI	Piombino	4.000	1.303	195	1.108		

segue Tabella 9.4

Provincia	Comune	Potenzialità totale (t/anno)	Rifiuto trattato (t/anno)	Frazione organica selezionata	Verde	Fanghi	Altro
LU	Camaione	10.070					
LU	Viareggio	15.318	15.318	380	12.891		2.047
MS	Massa Carrara	15.000					
MS	Massa Carrara	3.000	10.298	6.101	4.197		
SI	Monteroni d'Arbia	9.000	4.228	2.531	1.288	194	215
Totale Toscana		105.148	91.979	34.318	42.511	237	14.913
AN	Moie di Maiolati	15.000	6.849		3.486	3.363	
PS	Mondavio	50.000	36.012	2.652	2.019	31.054	287
Totale Marche		65.000	42.861	2.652	5.505	34.417	287
CH	Cupello	1.539	1.539	1.012		527	
TE	Notaresco	72.000	9.660	1.530	5.420	2.710	
Totale Abruzzo		73.539	11.199	2.542	5.420	3.237	-
NA	Pomigliano d'Arco	3.000	3.000	2.400	600		
Totale Campania		3.000	3.000	2.400	600	0	0
BA	Modugno	192.000	63.431	17.893	224	44.346	968
BA	Molfetta	21.250	2.250		2.250		
Totale Puglia		213.250	65.681	17.893	2.474	44.346	968
Totale Italia (137 impianti)		2.175.155	1.360.604	322.740	518.405	366.048	153.411

Tabella 9.5 - Impianti di selezione e compostaggio (anno 1999)

Provincia	Comune	Potenzialità (t/a)	Rifiuto trattato (t/a)	Tipologia d'impianto
AL	Alessandria	80.000	60.941	S+C
NO	Ghemme	36.000	12.000	C, S presso discarica Ghemme
Totale Piemonte		116.000	72.941	
BG	Montello	165.000	44.293	S+C
MI	Milano	600.000	381.444	S+C
MI	Sesto S. Giovanni	47.600	27.769	S+C
MN	Ceresara	55.000	71.564	S+C+CDR
MN	Pieve di Coriano	55.000	49.852	S+C+CDR
PV	Parona	146.000	11.878	S+C+CDR
Totale Lombardia		1.068.600	586.800	
BZ	Castelrotto	8.000	5.000	S+C
BZ	Natz-Sciaves	11.000	9.000	S+C
Totale Trentino Alto Adige		19.000	14.000	
RO	S. Martino di Venezze	78.000	62.713	S+C
VI	Grumolo delle Abbadesse	92.000	18.200	S+C
VR	Legnago	108.000	93.858	S+C
VR	Legnago	150.000	31.243	C, S presso altro impianto (150 t/d)

segue Tabella 9.5

Provincia	Comune	Potenzialità (t/a)	Rifiuto trattato (t/a)	Tipologia di impianto
	Totale Veneto	428.000	206.014	
UD	S. Giorgio di Nogaro	75.000	1.868	S+C
UD	Udine	65.520	28.051	S+C+CDR
	Totale Friuli Venezia Giulia	140.520	29.919	
BO	San'Agata Bolognese	94.500	90.164	S+C
MO	Carpi-Loc Fossoli	70.000	39.676	S+C
	Totale Emilia Romagna	164.500	129.840	
FI	Sesto Fiorentino	91.250	46.909	S+C+CDR
LI	Porto Azzurro	27.000	16.608	S+C+CDR
MS	Massa Carrara	104.400	79.773	S+C
PT	Pistoia	42.000	24.055	S+C
	Totale Toscana	264.650	167.345	
PG	Foligno	62.000	62.000	S+C+CDR
PG	Perugia	150.000	150.000	S+C+CDR
TR	Orvieto	113.000	84.097	S+C+ frazione secca a incenerimento
	Totale Umbria	325.000	296.097	
AP	Ascoli Piceno	63.000	9.000	S+C
AP	Fermo	54.000	8.000	S+C
MC	Tolentino	80.000	58.979	S+C, CDR a partire da anno 2000
	Totale Marche	197.000	75.979	
FR	Colfelice	187.200	178.000	S+C+CDR
RM	Albano Laziale	156.000	65.500	S+C+CDR
VT	Viterbo	156.000	150.000	S+C+CDR
	Totale Lazio	499.200	393.500	
AQ	Castel di Sangro	24.000	10.758	S+C
CH	Cupello	50.000	38.044	S+C
TE	Notaresco	50.000	23.090	S+C
	Totale Abruzzo	124.000	71.892	
CS	S. Maria Capua Vetere	75.000	34.618	S+C
	Totale Campania	75.000	34.618	
MT	Matera	36.000	22.000	S+C
	Totale Basilicata	36.000	22.000	
CZ	Catanzaro	73.000	41.656	S+C+CDR
CZ	Lamezia Terme	115.000	5.340	S+C
RC	Reggio Calabria	42.000	2.166	S+C
	Totale Calabria	230.000	49.162	
NU	Macomer	48.000	35.000	S+C+CDR
SS	Tempio Pausania	42.000	23.938	S+C+CDR
	Totale Sardegna	90.000	58.938	
	Totale Italia (41 impianti)	3.777.470	2.209.045	

S = Selezione; C = Compostaggio; CDR combustibile derivato da rifiuto

Tabella 9.6 - Altri impianti di trattamento biologico (anno 1999)

Provincia	Comune	Potenzialità (t/a)	Rifiuto trattato (t/a)	Tipologia di impianto
BG	Bergamo	60.000	44.921	B+CDR
PV	Corteolona	80.000	79.709	B+CDR
PV	Giussago	40.000	30.142	B
Totale Italia (3 impianti)		180.000	154.772	

B = bioessiccazione; CDR = combustibile derivato da rifiuto

Tabella 9.7 - Impianti di selezione e produzione di combustibile derivato da rifiuto (anno 1999)

Provincia	Comune	Potenzialità (t/a)	Quantità trattata 1999	Tipologia di impianto
RA	Ravenna	180.000	3.960	S+CDR
MS	Aulla		1.890	S+CDR
VR	Verona	155.000	5.767	S+CDR
Totale Italia (3 impianti)		335.000	11.617	

S = Selezione; CDR combustibile derivato da rifiuto

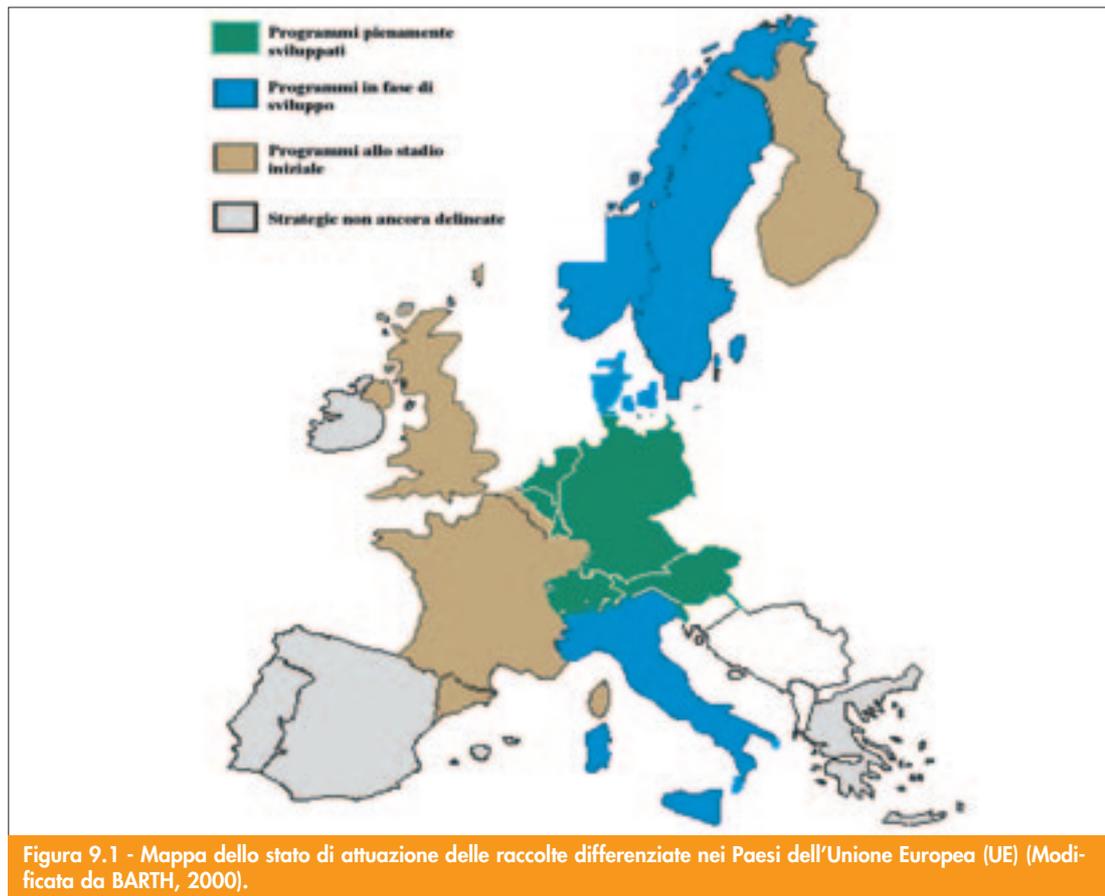
1999, intorno a 1.112.562 t/anno, ossia ca. 19,3 kg/ab/anno. Avremo modo di valutare più oltre questo dato, alla luce del contributo potenziale dei diversi residui organici alle raccolte differenziate in situazioni già consolidate.

È, a questo punto, estremamente utile paragonare la capacità specifica di intercettazione dei rifiuti organici del sistema italiano (in kg/ab/anno) con quella di altri Paesi europei. I dati riguardanti l'Italia sono ancora ben lontani dai ca. 80 kg della Germania o dagli oltre 100 kg di Olanda, Danimarca ed Austria. La situazione italiana è comunque coerente con un contesto in fase di sviluppo, peraltro decisamente sostenuto. Ciò pone l'Italia (Figura 9.1) alcuni gradini sopra altri Paesi, da considerarsi invece nella "fase potenziale", quali Inghilterra, Francia e Spagna (dove comunque la Catalogna già prevede l'adozione obbligatoria della raccolta secco-umido in tutti i Comuni sopra i 5.000 abitanti).

L'entrata in vigore del D.lgs 22/97 ha segnato, indubbiamente, un punto di svolta per la crescita del compostaggio in Italia. La definizione degli obiettivi di riciclaggio ha, infatti, evidenziato la necessità di attivare in forma estesa le raccolte differenziate delle frazioni compostabili. In conseguenza di ciò, crescente risulta il numero di Regioni e Province che inseriscono la strategia della differenziazione secco/umido nei piani locali di settore. Allo stesso modo, molti sono i Comuni ed i Consorzi che attivano le raccolte, perfino in anticipo sulle previsioni dei Piani Regionali e Provinciali.

La strategia è stata attuata principalmente nelle Regioni del Centro-Nord. Alla fine del 1998, sono stati censiti in quest'area ca. 600 Comuni, che avevano intrapreso raccolte secco-umido, a servizio di una popolazione complessiva intorno ai 5 milioni di cittadini. Più recentemente, questa tendenza, si è diffusa anche nei comprensori centro-meridionali.

Va sottolineato che, se da una parte la crescita della raccolta secco-umido rappresenta l'aspetto più innovativo ed importante dell'evoluzione del recupero delle frazioni organiche di scarto, allo stesso modo stanno guadagnando importanza i circuiti di raccolta dei residui verdi da manutenzione di parchi e giardini. Ormai queste raccolte sono attive in maniera significativa non solo in Lombardia, Piemonte e Veneto (dove la raccolta differenziata dei residui del giardinaggio è obbligatoria, rispettivamente, dal 1994, dal 1998 e dal 2000) ma anche in altre aree della Penisola come l'Emilia e la Toscana.



9.1.1 Il contributo delle frazioni compostabili agli obiettivi complessivi di raccolta differenziata

Come già accennato in precedenza, la raccolta differenziata delle frazioni compostabili, oltre a garantire la predisposizione di flussi di matrici organiche a bassa contaminazione e, dunque, fortemente vocate alla valorizzazione agronomica mediante compostaggio, contribuisce in maniera decisiva al conseguimento di elevati tassi di raccolta differenziata in quanto tale. A questo proposito, vale ricordare che il D.lgs. 22/97, oltre ad individuare come prioritarie le azioni volte alla riduzione ed al riciclaggio dei rifiuti rispetto a quelle di smaltimento indifferenziato, pone impegnativi obiettivi di raccolta differenziata nel breve e medio termine. Vengono infatti fissati i traguardi del 15, 25 e 35% di raccolta differenziata in ogni ambito territoriale nazionale entro, rispettivamente 2, 4 e 6 anni dall'emanazione del decreto stesso. In vero, questi obiettivi non sono conseguibili se non tramite l'estensione generalizzata dei sistemi di raccolta alla fonte delle frazioni compostabili a livello nazionale.

Con l'esame di alcune situazioni-tipo, è possibile valutare appieno il contributo fondamentale della separazione alla fonte degli scarti compostabili al fine del conseguimento di una sostanziale contrazione del ricorso allo smaltimento indifferenziato.

Nel Rapporto preliminare sulla raccolta differenziata e sul recupero dei rifiuti di imballaggio 1998-1999 ANPA-ONR aggiornato a tutto il 1998, la Lombardia era individuata come regione leader a livello nazionale, con un dato aggregato del 30,8% di raccolta differenzia-

ta sul territorio complessivo regionale. Anche nel 1999 (*Rapporto Rifiuti 2001*, ANPA-ONR) la Lombardia con il 33,3%, si è confermata la regione con un tasso di raccolta ampiamente superiore all'obiettivo fissato per il 2001 e vicino a quello del 2003. Il Veneto con il 23,9% ha superato l'obiettivo fissato per il 1999 e si è avvicinato a quello del 2001; seguono una serie di regioni che hanno aggiunto ampiamente l'obiettivo fissato per il 1999 quali il Trentino Alto Adige (19,12%), l'Emilia Romagna (19,1%), la Toscana (16,8%), il Friuli Venezia Giulia (16,1%). Il Piemonte ha raggiunto l'obiettivo del 15%. Da un esame puntuale dei quantitativi censiti, è possibile evidenziare il contributo determinante ai risultati conseguiti dalla Lombardia giocato dalla raccolta differenziata delle frazioni compostabili. Disaggregando il dato regionale 1998 a livello provinciale (*Tabella 9.8*), si individuano, in particolare, tre situazioni (Bergamo, Lecco e Milano) con livelli di raccolta già al di sopra dell'obiettivo del 2003 fissato dal D.lgs. 22/97. Ciò appare tanto più interessante, se si considera il raggiungimento di un tale livello ad appena un anno dalla emanazione del D.lgs. 22/97. Da notare è pure la buona correlazione tra tassi di raccolta differenziata e contributo specifico delle frazioni organiche. Quest'ultimo può essere assunto come indice della diffusione dei sistemi di differenziazione rivolti specificatamente, a livello di singoli Comuni, verso il recupero dei residui organici. In *Figura 9.2*, tale correlazione viene restituita graficamente ed è ben evidente lo stretto nesso tra aumento delle raccolte specifiche delle frazioni organiche e tassi complessivi medi di raccolta differenziata a livello di singole province.

Tabella 9.8 - Percentuale di raccolta differenziata e contributo relativo delle frazioni organiche nelle diverse Province Lombarde (dati 1998).

Provincia	Abitanti	Totale RU t/anno	Racc. Diff. %	Residui org. t/anno	Organico kg/ab/anno
Bergamo	956.181	364.477	42,3	55.505	58,0
Brescia	1.088.346	546.899	18,9	27.042	24,8
Como	537.090	227.070	25,5	15.432	28,7
Cremona	333.079	149.731	28,2	13.027	39,1
Lecco	307.507	130.492	36,4	17.454	56,8
Lodi	194.272	84.287	32,0	8.311	42,8
Mantova	372.021	175.333	23,2	15.695	42,2
Milano	3.752.956	1.727.106	35,7	255.628	68,1
Pavia	496.409	233.492	15,8	10.539	21,2
Sondrio	177.466	63.516	23,8	1.609	9,1
Varese	813.586	354.869	30,8	45.184	55,5
Lombardia	9.028.913	4.057.272	30,8	465.426	51,5

Ancora più significativo appare il dettaglio dei dati su base comunale. Prendendo in considerazione i dati disaggregati relativi alla Provincia di Lecco (*Tabella 9.9*), è possibile notare come i tassi di raccolta differenziata siano particolarmente elevati (sopra il 50% e fino al 70%). Il conseguimento di questi risultati è dovuto al decisivo sviluppo delle raccolte differenziate delle frazioni compostabili in molti dei Comuni considerati. Si tratta di percentuali in grado di incidere profondamente sulla struttura complessiva del sistema di gestione integrata dei rifiuti urbani, conferendo alla differenziazione ed al recupero un ruolo tutt'altro che marginale.

Ancora una volta, è preponderante il contributo delle frazioni compostabili, le quali, in generale, rappresentano quantitativi nell'intervallo di 100-150 kg/ab/anno tra scarto di cucina e scarto di manutenzione del verde ornamentale, ossia, mediamente, dal 25 al 30% sul totale del rifiuto.

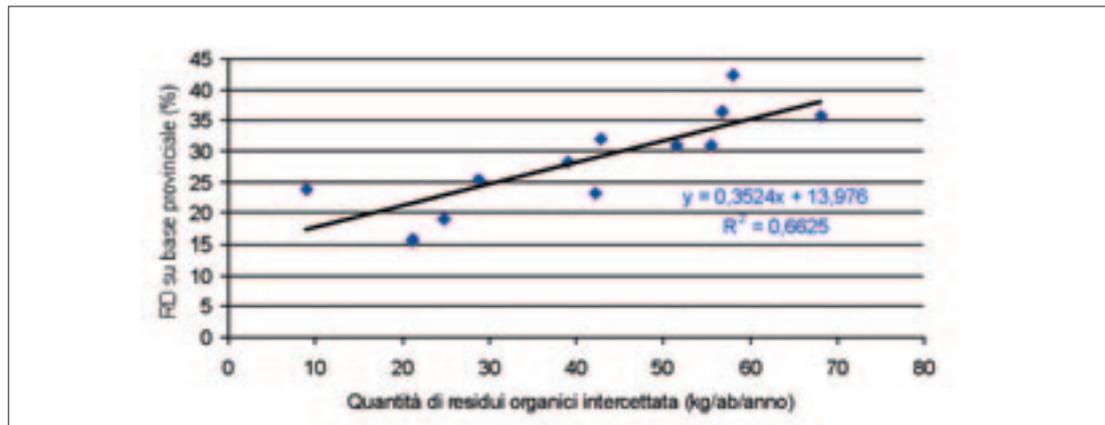


Figura 9.2 - Correlazione tra livelli percentuali di raccolta differenziata (RD) nelle provincie lombarde e contributo a queste stesse derivante dal recupero dei residui organici.

Le medesime considerazioni possono essere fatte sui dati riferiti al Premio “Comuni Ricicloni 1999” (Tabella 9.10). Confrontando i risultati riferiti alla parte alta della classifica (Comuni con oltre il 50% di RD) con quelli relativi ai Comuni con raccolte meno spinte (10-15% di RD), si ha la conferma del ruolo decisivo che le frazioni organiche giocano nel far lievitare i risultati complessivi di raccolta differenziata.

Tabella 9.9 - Dati relativi alla raccolta differenziata (RD) nei Comuni della Provincia di Lecco (riferimento 1999).

Comune	Popolazione	RD %	Scarti di cucina (kg/ab/anno)	Residui verdi (kg/ab/anno)
Sirtori	2.571	71,9	53,6	291,6
Monticello B.za	4.192	70,9	64,2	114,5
Torre De' Busi	1.758	68,5	13,4	77,2
Cassago B. za	3.936	67,6	41,3	65,1
Verderio Inf.	2.170	61,8	51,8	54,4
Paderno D'Adda	3.131	61,1	62,3	50,9
Casatenovo	11.897	61,1	67,0	36,4
Lomagna	4.079	60,8	47,9	76,2
Montevecchia	2.458	59,7	50,2	53,1
Carenno	1.436	59,6	39,3	78,2
Lierna	1.902	59,5	10,8	192,5
Verderio Sup.	2.388	59,3	62,0	53,4
Annone B.za	1.996	59	43,2	124,2
Cremella	1.490	57,9	43,2	51,2
Merate	14.071	57,7	79,8	30,9

Come è possibile notare, i contributi specifici delle intercettazioni di scarti di cucina tendono a collocarsi - nel caso di sistemi ad alta capacità di intercettazione come quelli a domicilio - in un intervallo compreso tra 55 e 80 kg/ab/anno. D'altra parte, i residui della manutenzione del verde risultano recuperabili separatamente in maniera più o meno spinta a secon-

da sia delle condizioni urbanistiche (incidenza percentuale delle abitazioni con giardino), sia dei sistemi di raccolta (recapito all'interno del rifiuto urbano, nel caso di sistemi con cassonetti, ad eccessiva facilità di consegna).

Tabella 9.10 - Obiettivi di raccolta differenziata (RD) raggiunti e contributo delle frazioni organiche relativi ad alcuni Comuni.

Comune	Abitanti	RD %	Residui verdi (kg/ab/anno)	Scarti di cucina (kg/ab/anno)
MASATE	2.296	79,6	196	55
VILLA DI SERIO	5.742	76,2	87	68
PRESEZZO	4.512	71,7	77	57
MESERO	3.430	70,8	106	66
FARA GERA D'ADDA	6.533	70,1	41	43
GAMBELLARA	3.166	69,0	-	42
ALBAIRATE	4.062	68,8	44	69
CASSAGO BRIANZA	3.936	67,7	65	41
ARCORE	16.495	67,3	43	66
USMATE VELATE	8.252	67,3	70	62
AICURZIO	1.947	66,9	116	70
FUMANE	3.736	66,1	37	52
BARIANO	3.923	66,0	45	55
TREZZO SULL'ADDA	11.425	66,0	55	82
GUDO VISCONTI	1.307	65,5	87	56
AZZANO SAN PAOLO	6.786	65,4	37	58
CASTIGLIONE D'ORCIA	2.570	15,0	-	-
FIGLINE VALDARNO	16.356	15,0	-	-
MONTAIONE	3.451	15,0	11	-
INCISA VAL D'ARNO	5.608	14,4	-	-
POJANA MAGGIORE	4.235	13,9	6	-
ROVERETO	34.376	13,8	15	5
CASTELFRANCO S.pra	2.724	12,7	-	-
SANDRIGO	7.821	12,7	16	-
CELLE LIGURE	5.381	12,5	-	-
CORIANO	8.199	11,3	2	-
POGGIO BERNI	2.773	10,4	1	-
MONTEGALDELLA	1.700	10,1	-	-

Fonte: Comuni Ricicloni 1999

Tuttavia, è realistico, in situazioni mature, assumere un contributo medio tendenziale dell'ordine di 30-80 kg/ab/anno, con un contributo complessivo delle frazioni compostabili che tipicamente si colloca nell'intervallo di 90-150 kg/ab/anno. Il dato assume, senza dubbio, notevole importanza, a livello previsionale, in sede di programmazione dei circuiti di raccolta differenziata e di dimensionamento preliminare dell'impiantistica a questa dedicata.

In Figura 9.3 viene rappresentata, mediante un diagramma a torta, l'incidenza delle diverse frazioni differenziate del rifiuto urbano - ivi compresi i flussi indifferenziati e dei materiali ingombranti - rapportata al totale dei rifiuti relativi a cinque Comuni della Provincia di Milano che, nel 1998, hanno superato il 70% di raccolta differenziata. Le frazioni compostabili, nel loro complesso (scarti alimentari + residui del verde ornamentale), contribuiscono anche in

questo caso per ca. il 27%. È importante segnalare che, grazie alla estensione generalizzata delle raccolte differenziate dell'organico e, in particolare, degli scarti di cucina, ben 88 Comuni su 188 hanno superato nel 1998, in Provincia di Milano, il 50% di raccolta differenziata.

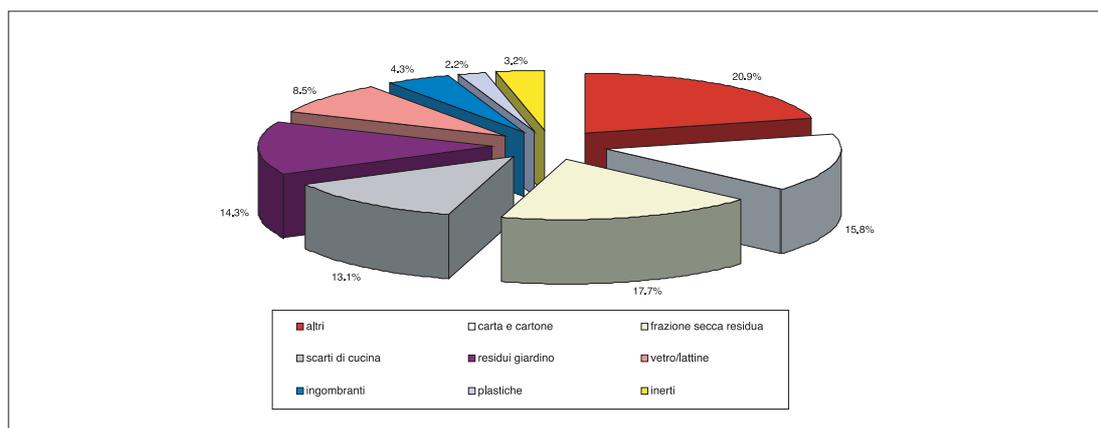


Figura 9.3 - Contributi specifici alla raccolta differenziata nei cinque Comuni della Provincia di Milano con livelli più alti di intercettazione dei diversi flussi merceologici (riferimento 1998).

Un'ultima considerazione resta da fare circa l'opinione – in vero abbastanza diffusa – che le strategie volte alla separazione dello scarto alimentare trovino un limite alla propria diffusione nella dimensione demografica dei contesti di riferimento. In realtà già diversi sono i casi – in Italia come all'Estero – di aree metropolitane con larga estensione dei circuiti di raccolta secco-umido. Un esempio è Torino, con una popolazione coinvolta nei programmi di raccolta differenziata stimabile attorno ai 500.000 abitanti. Diversi Comuni ad elevata densità demografica dell'area metropolitana di Milano costituiscono un'altra testimonianza di come sia possibile conseguire importanti obiettivi di raccolta differenziata specifica (ossia delle sole frazioni putrescibili) e complessiva (con riferimento a tutti i flussi di materiali recuperabili). Valgono per tutti i dati riferiti alla città di Monza, (terzo insediamento urbano della Lombardia per popolazione), riportati in *Tabella 9.11*. È qui possibile operare un confronto tra i dati complessivi di raccolta differenziata ed il contributo specifico delle frazioni organiche, prima e dopo l'introduzione generalizzata della raccolta secco-umido, avvenuta nel luglio 1998 dopo un periodo di prova esteso ad un solo quartiere-pilota.

È inoltre importante sottolineare già sin da adesso quanto, con riferimento ai contesti ad elevata urbanizzazione, sia destituita di ogni fondamento l'opinione diffusa secondo la quale, comunque, le dimensioni dei bacini di utenza non garantirebbero la qualità delle frazioni raccolte.

Tabella 9.11 - Risultati della raccolta differenziata nella città di Monza (120.000 abitanti) riferita all'anno 1998.

Periodo di riferimento	Residui di giardino (t/mese)	Proiezione (kg/ab/anno)	Scarti di cucina (t/mese)	Proiezione (kg/ab/anno)	RD %
febbraio	83,69	8,369	27,94	2,794	34
marzo	56,51	5,651	21,31	2,131	32
novembre	178,24	17,824	576,22	57,622	50
dicembre	153,41	15,341	654,34	65,434	49

9.2 I sistemi italiani di raccolta differenziata: specificità e risultati

Le esperienze di raccolta differenziata degli scarti organici compostabili già attive in Italia hanno ampiamente dimostrato la possibilità di applicare efficacemente anche nel nostro Paese strategie e sistemi già sviluppati in altri contesti europei. Questo sia sotto l'aspetto dei risultati quantitativi e qualitativi, sia per quanto concerne il contenimento dei costi. Va addirittura sottolineato che la specificità delle scelte operative adottate nei modelli di raccolta diffusi in Italia ha consentito di intervenire su l'affinamento ed il miglioramento di alcuni aspetti affermatasi tradizionalmente nelle raccolte d'oltralpe.

In particolare, è stato raggiunto un più alto livello di intercettazione degli scarti di cucina, con conseguente minore fermentescibilità della frazione residua del rifiuto, in tal modo, meno problematica da smaltire. Sono stati inoltre ottenuti importanti risultati circa il contenimento dei costi di esercizio dei circuiti di raccolta. Infine, i residui del giardinaggio sono stati, in molti casi, distolti dal flusso normale del rifiuto urbano, con comprensibili ricadute positive sulla gestione complessiva dei rifiuti.

L'attenzione nei confronti di materiali organici fermentescibili, e più precisamente verso i flussi di scarti alimentari (raccolte "secco-umido"), rappresenta un ottimo motivo per l'introduzione di modelli di raccolta differenziata integrata. Questi danno l'opportunità per una profonda modificazione della natura, della cadenza e della attuazione del servizio complessivo di raccolta. Ciò finisce per influire sulla gestione complessiva sia delle altre frazioni riciclabili che dei RU indifferenziati.

9.2.1 La definizione degli obiettivi della raccolta

In Italia, vengono raccolti a domicilio soltanto "scarti di cucina", spesso definiti semplicemente come "umido". In Germania, Austria ed altre nazioni del Nord-Europa, si raccoglie "bioabfall" (rifiuto biologico). In Olanda "GFT" o "VGF" ("Groen- Fruit-, Tuinavfal" o "Vegetable, Garden, Fruit"), ossia una miscela di residui del giardinaggio e della porzione cruda dello scarto alimentare). Come è evidente, in tutti questi Paesi, accanto allo scarto di cucina, vi è generalmente una larga prevalenza di residui del giardino, di cui viene consentita - ed anzi stimolata - la consegna al servizio di raccolta, mediante il posizionamento, presso le villette con giardino, di bidoni di volume sufficientemente grande.

La distinzione tra i diversi "bersagli" dei sistemi di raccolta non è influente ai fini delle filiere di trattamento. Quando, da un lato, si considera lo scarto di tipo alimentare (umido in senso stretto) e, dall'altro, il materiale ligno-cellulosico di cui sono costituiti prevalentemente i residui del giardinaggio, alla diversità merceologica corrisponde una sostanziale specificità in termini di reattività biologica. Tale diversità si traduce anche in procedure specifiche per l'articolazione del sistema di raccolta.

La densità apparente caratteristica dei materiali dei due flussi di scarti, in quanto assai diversa l'una dall'altra, impone l'impiego di veicoli-compattatori per la raccolta dei residui verdi, mentre consente l'impiego di veicoli normali per lo scarto alimentare. Il compattamento, pur necessario a garantire il pieno utilizzo delle capacità di trasporto dei mezzi nel caso di materiali voluminosi, è un'operazione costosa. La introduzione di circuiti dedicati al solo "umido", con veicoli privi di compattatori, è un potente strumento di razionalizzazione del servizio e di contenimento dei costi.

D'altra parte, la problematicità della gestione dello scarto alimentare deriva dalla spiccata fermentescibilità ed dall'elevato contenuto in acqua. Ciò impone di individuare mezzi, sistemi e frequenze di raccolta che si traducano in condizioni di assoluta praticità e garanzia di igiene per l'utente del servizio, stimolandone così la partecipazione.

Ma un sistema "comodo" che non distingua tra scarti di cucina e residui di giardino è un sistema

destinato a produrre una elevata intercettazione di materiali del giardinaggio, facendo dimenticare che dove ci sono residui verdi, c'è pure un giardino nel quale è possibile compostarli.

A questo proposito giova osservare il fatto che nei Paesi del Centro-Europa è normale riscontrare quote di recupero che si situano, anche in territori estesi, attorno ai 150-200 kg/ab/anno e persino oltre. Tale situazione, se da una parte è attribuibile alla maggiore incidenza delle superfici private a giardino, dall'altra risente soprattutto della relativa comodità di consegna dello scarto verde ai circuiti pubblici di asporto, mediante gli stessi bidoni adottati per la raccolta dello scarto alimentare, a domicilio. Ciò porta, di contro, a disincentivare il compostaggio domestico e ad aumentare artificiosamente le percentuali di frazione organica differenziata. In questo modo viene gonfiata la produzione complessiva di RU, della cui gestione e smaltimento si devono far carico le Amministrazioni locali. In tali situazioni non è raro imbattersi in produzioni unitarie di rifiuto dell'ordine di 600-650 kg/ab/anno. Situazioni analoghe si possono verificare anche in alcuni contesti italiani.

Prendendo le mosse dalla considerazione degli aspetti negativi delle esperienze europee, in alcune aree della Penisola, particolarmente in Veneto, Lombardia e Piemonte, sono stati sviluppati sistemi di raccolta, successivamente adottati anche in altre Regioni.

9.2.2 *La raccolta dello "scarto verde" e la via del compostaggio domestico*

I residui della manutenzione del verde costituiscono un flusso di materiali compostabili che incide in misura variabile sul totale dei RU, a seconda dell'assetto urbanistico in cui si opera. Questi residui, laddove non vengano predisposti circuiti dedicati per l'intercettazione, tendono inevitabilmente ad incrementare la produzione complessiva di rifiuto urbano, specialmente nei periodi primaverile-estivo ed autunnale. In condizioni di gestione del verde mediamente intensive, quali quelle adottate normalmente per la cura e la manutenzione dei giardini privati e dei parchi pubblici, si registra una produzione annua di alcuni chilogrammi (3-5/m²) di sfalcio erboso. Tali quantitativi sono sostanzialmente raddoppiati dalle potature e dal fogliame. Il contributo di questa frazione alla formazione complessiva dei RU domestici risulta perciò già rilevante in abitazioni con piccoli giardini.

Sulla scorta di tali considerazioni, la Regione Lombardia ha introdotto nel 1994, per la prima volta in Italia, l'obbligo della raccolta differenziata dello scarto verde. Grazie ad una messe di dati storici relativi a questo tipo di raccolta, è oggi possibile affermare che l'intercettazione unitaria dei residui da giardinaggio si colloca tra i 20-30 ed i 70-90 kg/ab/anno, sempre in dipendenza dalla tipologia abitativa prevalente nell'insediamento urbano considerato. Anche il Piemonte ha introdotto, nel 1997, il divieto di conferimento dei residui verdi in discarica, accompagnato dall'obbligo di raccolta differenziata a partire dal gennaio 1998.

In alcuni Comuni però, soprattutto dove i circuiti di raccolta non sono ancora consolidati, le rese di intercettazione registrate risultano di gran lunga più basse (15-20 kg/ab/anno). Bisogna tuttavia considerare che le rese possono essere sensibilmente influenzate da una serie di fattori:

- in senso positivo, dalla graduale introduzione ed affermazione del compostaggio domestico, il quale tende ad intercettare soprattutto gli scarti delle utenze con giardino;
- in senso negativo, dalla bruciatura o da altre attività improprie di smaltimento, gestite spesso – e soprattutto per i residui di potatura – direttamente presso le utenze o fuori dal contesto urbano

ciliarizzazione del servizio venga accompagnata dalla separazione dei circuiti di raccolta del verde e dell' "umido". Ciò è possibile ricorrendo ad un sistema di conferimento dei residui verdi centralizzato ovvero alla raccolta domiciliare degli stessi con frequenza differita rispetto all'asporto degli scarti alimentari (sistema "intensivo" con raccolta a domicilio ad elevata frequenza). Una simile strategia consente, di rimando, un corretto dimensionamento dei contenitori per la raccolta dell' "umido", adeguato alle necessità reali di intercettazione degli scarti di cucina, proprio grazie alla eliminazione del fattore di stagionalità del flusso dei residui verdi. Altri ricadute importanti derivanti dalla separazione dei flussi "umido"/"verde" sono:

- l'individuazione di criteri specifici di raccolta per l'"umido" in considerazione della fermentescibilità e della densità apparente elevate (es. adozione di sacchetti a perdere, impiego di automezzi privi di compattatore);
- l'ottimizzazione dei costi di gestione dei due circuiti di intercettazione, attraverso l'adozione di economie tarate specificatamente sullo scarto "verde" (es. semplificazione dei sistemi di raccolta, diminuzione delle frequenze nella raccolta domiciliare, impiego di automezzi-compattatori, minori tariffe praticate dagli impianti di compostaggio per il conferimento);
- l'incentivazione, se sostenuta da un programma di promozione, del compostaggio domestico nelle abitazioni con giardino.

In Lombardia, dove, come precedentemente detto, la differenziazione dei residui da giardinaggio è obbligatoria dal 1994, la grande maggioranza dei circuiti di raccolta del verde si basa sul conferimento diretto ai punti di accentramento ovvero, specialmente nei piccoli comuni, alle piazzole decentrate per il compostaggio. Analoga situazione la ritroviamo in altre aree italiane (es. Veneto e Piemonte) dove la raccolta dello scarto di cucina viene attuata a domicilio. In taluni casi, sono previste iniziative di raccolta dei rifiuti di giardinaggio presso le abitazioni ("giro verde"). Queste ultime sono tuttavia previste, di norma, con frequenze quindicinali o mensili, limitando così l'effetto perverso che la facilità eccessiva della consegna dello scarto verde al circuito di raccolta finisce per esplicare sulle iniziative di compostaggio domestico. Dove invece il sistema prevede criteri di conferimento eccessivamente agevoli per l'utenza domestica (es. alta frequenza di raccolta) si registrano aumenti - spesso anche notevoli - delle intercettazioni specifiche, con il concomitante aumento dei tassi di raccolta differenziata, che si traducono però in maggiori quantità complessive di rifiuti da gestire (Tabella 9.12).

Tabella 9.12 - Valori delle intercettazioni specifiche di residui da giardinaggio e scarti di cucina relative ad alcuni Comuni italiani.

Comune	Provincia	Residui di giardino (kg/ab/anno)	Scarti di cucina
FORTE DEI MARMÌ	LU	462,62	28,99
PIETRASANTA	LU	237,14	21,59
SIRTORI	LC	227,20	36,69
SERAVEZZA	LU	200,29	9,25
LIERNA	LC	172,34	0,00
ARESE	MI	120,49	44,38
MONTICELLO BRIANZA	LC	113,59	68,91
ROVELLO PORRO	CO	111,87	0,00
BURAGO DI MOLGORA	MI	108,39	65,08
SAN ROCCO AL PORTO	LO	102,51	38,87

Infine, nella pianura emiliana ed in diversi comprensori toscani, la raccolta dei rifiuti del giardinaggio avviene tramite cassonetti stradali (di volumetria analoga a quelli tradizionali), predisposti per ricevere sia gli scarti "umidi" che i residui "verdi".

9.2.3 La raccolta dello "scarto umido"

L'organizzazione di un circuito di raccolta differenziata degli scarti alimentari domestici deve partire dalla fondamentale considerazione di due elementi nodali, la putrescibilità e l'elevato contenuto d'umidità di questa frazione.

Nel panorama italiano, con particolare riferimento a diverse aree venete e lombarde, la risposta che è stata data a questi elementi di problematicità prevede:

- l'adozione di elevate frequenze di raccolta (generalmente una o due volte/settimana, a differenza di quelle settimanali o quindicinali preferite in Centro-Europa);
- la domiciliarizzazione della raccolta, per rendere il servizio comodo all'utente, stimolare la partecipazione ed incrementare così le rese di intercettazione;
- l'adozione di contenitori trasparenti, per l'ispezione visiva della qualità del materiale conferito, ed a tenuta (sacchetti in materiale plastico, in genere, biodegradabile).

L'uso dei sacchetti – combinato alla distribuzione di secchielli di piccola capienza per il posizionamento del sacchetto, efficacissimi al fine di obbligare una prima selezione dimensionale del materiale introdotto nel circuito – si è rivelato un importante fattore di successo ed efficacia sulla resa quali-quantitativa dei sistemi di raccolta differenziata.

I sacchetti comportano infatti numerosi vantaggi.

Prima di tutto, la praticità di gestione e una maggiore igiene dei secchielli. Si evitano, in questo senso, le situazioni di disagio possibili laddove il materiale viene raccolto sfuso nel bidone stesso. In questo modo, aumentano le rese del circuito e, quindi, le possibilità di adottare una riduzione delle frequenze di raccolta del "rifiuto residuo", operazione che costituisce uno dei principali fattori incidenti sull'economicità dei sistemi di raccolta.

Con i sacchetti, è richiesta una minore frequenza degli interventi di lavaggio dei bidoni. Oggi, in realtà, la calibrazione dei sistemi di asporto differenziato e la dotazione di sacchetti in misura adeguata consentono, nella maggior parte dei casi, l'annullamento degli interventi di lavaggio a carico del servizio pubblico. La cura dei bidoni viene infatti assegnata direttamente agli utenti.

Il sistema dei sacchetti consente infine di raccogliere anche le frazioni del rifiuto ad elevata fermentescibilità, quali scarti cotti e di origine animale (carne, pesce, pasta, ecc.). Spesso tali frazioni costituiscono, in molti Paesi del Centro-Europa, un vero e proprio problema operativo, per le difficoltà connaturate proprio alla loro putrescibilità. Così, ad esempio, in Olanda, la raccolta separata delle frazioni organiche si riduce generalmente alla separazione di scarti di frutta, verdura e di giardino (raccolte "GFT" o "VGF") e tale modello è diffusamente presente anche in Germania (raccolte "vor dem Teller" o "prima del piatto").

I risultati sono riassumibili in un 30-40 %, con punte del 50%, di scarto organico nel "rifiuto residuo" ("Restabfall") delle raccolte, a fronte del 10-25% tipico per i sistemi adottati in Italia. Proprio nei climi mediterranei questo dato distintivo è importante in quanto la riduzione della porzione fermentescibile consente – come più volte ribadito – una sostanziale riduzione delle frequenze di raccolta del "rifiuto residuo".

9.2.4 La scelta tra raccolta a domicilio e accentramento dei punti di prelievo

colta a domicilio presso le famiglie consente una razionalizzazione ed una ottimizzazione spinta del sistema di intercettazione, grazie soprattutto a:

- una migliore qualità del materiale raccolto (quindi, minori tariffe per il conferimento agli impianti);
- diversione più spinta delle frazioni organiche e dunque possibilità di gestire un rifiuto residuo "secco" a basso contenuto di materiali fermentescibili, con conseguente riduzione delle cadenze di raccolta;
- trasferimento all'utente di alcune delle funzioni operative maggiormente costose connesse con il sistema, quali la cura ed il lavaggio dei contenitori.

Quest'ultimo aspetto del contenimento dei costi si sta rivelando una delle paradossali conseguenze della domiciliarizzazione di molti dei servizi di raccolta, in antitesi a quanto comunemente sostenuto.

In alcuni comprensori la raccolta "secco-umido" è stata invece organizzata mediante la predisposizione di "punti di accentrimento", rappresentati da contenitori stradali di dimensioni da medio-grandi a molto grandi, allo scopo di diminuire i punti di prelievo e così ridurre, almeno nelle intenzioni, i costi del circuito.

È stato fatto già cenno alla diffusione in Emilia Romagna ed in Toscana di un modello specifico di raccolta, basato sul posizionamento di cassonetti di grande capienza sul suolo pubblico e sulla raccolta congiunta di scarti alimentari e da manutenzione del verde. La collocazione stradale e la volumetria dei contenitori, che non sono in grado di costringere ad una selezione dimensionale del materiale introdotto, avevano inizialmente comportato un palese insuccesso rispetto alla qualità del materiale raccolto. La messa a punto del sistema ha portato alla successiva adozione di cassonetti dotati di chiusura con apposito chiavistello in dotazione ai cittadini. In sintesi, questo modello organizzativo di raccolta, basato sul conferimento dei rifiuti organici in luoghi deputati, presuppone un notevole grado di partecipazione "volontaria" da parte di chi è interessato, a fronte di una "esclusione" di fatto degli utenti non sensibili. Ciò si traduce in evidenti ricadute positive sulla qualità del materiale conferito. Una campagna capillare di informazione e sensibilizzazione della popolazione può produrre interessanti risultati anche sul fronte della quantità dei materiali recuperati; questa risulta tuttavia, come è facile intuire, sensibilmente inferiore rispetto ai sistemi "a partecipazione obbligatoria", cioè quelli a domicilio. Inoltre, la raccolta basata sui centri di accumulo risulta fortemente sbilanciata a favore dello "scarto verde".

Sulla base di quanto sopra detto, è importante richiamare l'attenzione su due potenziali effetti negativi associati a questo tipo di raccolta:

- La minore intercettazione di scarto alimentare determina una non trascurabile fermentescibilità del rifiuto "secco" residuo. Ciò non consente di diminuire la cadenza di raccolta. Si avrà, di conseguenza, un costo "aggiuntivo" determinato dalla raccolta differenziata dell'"umido", senza peraltro poter eliminare del tutto quello relativo al rifiuto indifferenziato. È utile qui ricordare che con un sistema "integrato", l'introduzione della raccolta dell'umido dovrebbe almeno comportare una diminuzione dei turni di asporto del "secco residuo", tale da garantire una sostanziale invarianza dei costi complessivi del servizio.
- La forte prevalenza di scarti vegetali a bassa densità apparente costringe ad impiegare automezzi dotati di compattatore. Anche su questo fronte, non possono perciò essere perseguiti quei sensibili abbattimenti dei costi derivanti, nelle raccolte a domicilio, dall'impiego di macchine operatrici per il trasporto meno complesse.

In base ad analisi ergonomiche effettuate sul campo, è stato evidenziato che, con i sistemi d'asporto mediante sacchetti o secchielli, il tempo di raccolta per punto servito risulta inferiore rispetto allo svuotamento del bidone pluriutenza. Tuttavia il tempo ed il costo complessivi (e per famiglia) sono inferiori per raccolte con bidoni, in ragione del fatto che il singolo svuotamento serve più nuclei familiari.

L'uso di bidoni stradali in zone caratterizzate da villette monofamiliari o piccoli condomini, con l'eccessivo recapito di scarti di manutenzione del verde al circuito di raccolta, finisce comunque per amplificare, paradossalmente, i costi di gestione del sistema. Infine, volendo organizzare una domiciliarizzazione spinta del servizio con bidoni dedicati, posizionando un contenitore presso ogni numero civico, i tempi di svuotamento meccanizzato risultano, alla fine, più alti rispetto al caricamento manuale di sacchetti o secchielli.

Alla luce di quanto sopra, le esperienze più "mature" stanno dunque evolvendo verso: a) sistemi di raccolta con secchielli o sacchetti, nelle zone a tipologia residenziale con villette (carico manuale); b) sistemi con "secchi" o "mastelli" da 20-30 litri, per le strutture condominiali o di corte sino a 5 famiglie circa (carico manuale); c) sistemi con bidoni da 120-240 litri, per strutture condominiali più grandi (svuotamento meccanizzato).

9.3 La qualità del materiale raccolto e l'influenza delle variabili urbanistiche e demografiche

L'efficacia dei circuiti di raccolta differenziata va misurata non soltanto sulla base della quantità dei materiali recuperati ma, è il caso di dire, soprattutto, in termini di qualità del materiale raccolto. A livello internazionale, si definisce generalmente, come obiettivo di eccellenza, una purezza merceologica superiore al 93-95%, come frazione di materiali compostabili sul totale di scarto "umido" raccolto. Ciò, evidentemente, consente di ottenere un compost per la cui raffinazione sono sufficienti operazioni molto semplici.

In Germania ed in Austria si raggiungono generalmente purezze dell'"umido" dell'ordine del 95-98%. È pertanto interessante confrontare (Tabella 9.13) tali risultati con i valori delle analisi merceologiche effettuate in alcune realtà italiane, diverse urbanisticamente ma accomunate dal medesimo tipo di raccolta differenziata degli scarti alimentari a domicilio.

Il dato evidente di una qualità generalmente superiore dell'"umido" intercettato nelle esperienze italiane di raccolta domiciliare, rispetto a quello ottenuto in analoghe situazioni del Centro-Europa, rappresenta ormai una costante. Questa peculiarità, a più riprese riconosciuta anche da molti tecnici stranieri, può essere attribuita alle specificità dei sistemi di raccolta adottati in Italia. Questi, è stato detto, tendono a non generare disagio alcuno al cittadino e, di conseguenza, a stimolare la partecipazione consapevole degli utenti, anche attraverso la dotazione di mezzi specifici per il primo contenimento dello scarto (es. sacchetti).

Una notazione di grande interesse riguarda la mancanza di una relazione stretta tra dimensione demografica dei contesti in cui vengono gestiti i circuiti di raccolta differenziata e capacità degli stessi a generare un flusso di "umido" di qualità. L'impressione è, in realtà, che i risultati, in termini di purezza merceologica, dipendano molto dal tipo di sistema di raccolta adottato (domiciliare o stradale, con risultati nettamente migliori per il primo). La dimensione demografica può semmai influenzare il tipo di raccolta adottabile, al pari di altri fattori. Tra questi sono compresi la presenza tradizionale di portierato, la presenza di spazi abitativi interni e le abitudini pregresse ingenerate dai sistemi di raccolta preesistenti. Non è comunque detto che, per ognuno di questi fattori, le condizioni peggiori coincidano con le situazioni demografiche più consistenti. Ad esempio, molti Comuni, di media e piccola dimensione, a persistente economia rurale ovvero con impianto urbanistico tipicamente medioevale o rinascimentale, non presentano strutture abitative caratterizzate da cortili o giardini interni. Ciò

Tabella 9.13 - Purezza merceologica dell' "umido" in Provincia di Milano e nel Bacino "Padova 1".

Comune/Bacino	Abitanti	Materiali compostabili (%p/p)
<i>Provincia di Milano (marzo 1998)</i>		
ALBIATE	4.713	98.8
ARESE	19.230	98.1
BELLUSCO	5.971	98.4
BIASSONO	10.493	95.0
BRUGHERIO	30.800	98.8
BUCCINASCO	23.890	96.5
CASTANO PRIMO	9.652	99.3
CINISELLO BALSAMO	75.650	98.2
COLOGNO MONZESE	50.121	93.0
DESIO	34.849	99.0
MELEGNANO	16.112	98.0
MONZA	119.187	97.4
NOVATE MILANESE	20.028	94.3
PADERNO DUGNANO	44.748	93.7
ROSATE	4.332	97.4
TREZZO SULL'ADDA	11.177	98.1
VAREDO	12.720	99.7
<i>Bacino "Padova 1" (marzo 1998)</i>		
26 COMUNI	203.429	98.7

costringe al posizionamento dei contenitori su fronte stradale ("raccolte di prossimità") con conseguente leggera diminuzione della purezza merceologica.

Quanto sin qui evidenziato, può risultare ancora più manifesto se i dati relativi alla purezza merceologica dei flussi di rifiuti organici intercettati sono messi in relazione matematica con la dimensione demografica dei Comuni dove la raccolta differenziata è stata attuata. In Figura 9.4 è presentata una correlazione di questo tipo, relativamente ai valori acquisiti con significative campagne di indagine (AMIAT, 1999; BIGLIARDI, 1998; FAVOINO, 1999; LAZZARI, 1998; PROVINCIA DI MILANO, 1998).

Tuttavia, in considerazione del fatto che verosimilmente esiste una differenza più contenuta tra

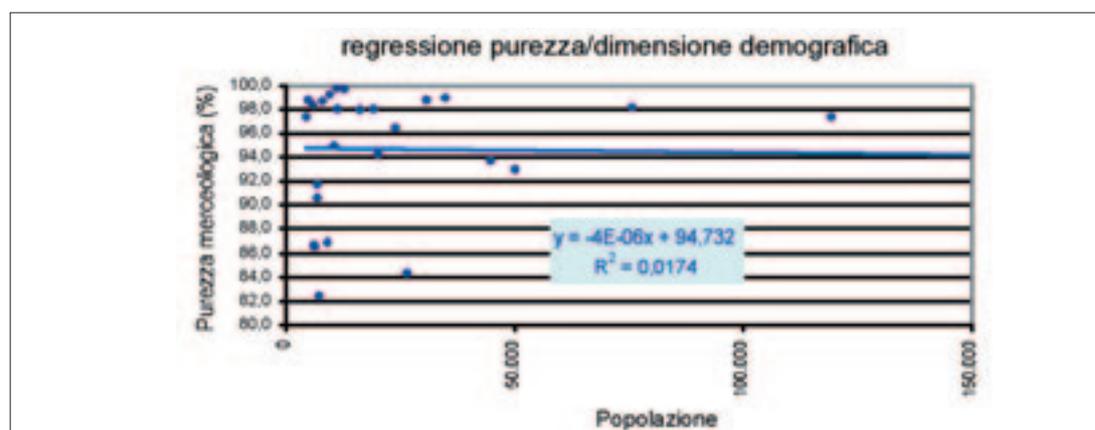


Figura 9.4 - Regressione lineare tra purezza merceologica e dimensione demografica.

le condizioni urbanistiche di due città di 100.000 o 150.000 abitanti, piuttosto che tra quelle di due Comuni, rispettivamente di 1.000 e 10.000 abitanti, è stata predisposta la presentazione degli stessi dati sulla base della successione logaritmica delle dimensioni demografiche (Figura 9.5). In questo modo, si ha una maggiore aderenza della variazione delle condizioni urbanistiche ed abitative con il crescere progressivo delle dimensioni demografiche dell'insediamento considerato.

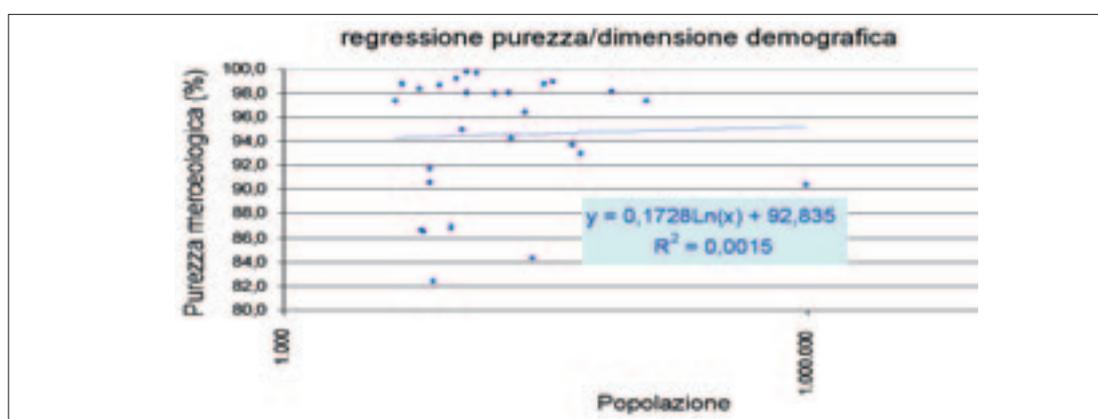


Figura 9.5 - Regressione logaritmica tra purezza merceologica e dimensione demografica.

I grafici confermano la sostanziale indipendenza della purezza merceologica dalle dimensioni demografiche del territorio servito dal circuito di raccolta. È lecito tuttavia aspettarsi che le dimensioni demografiche influiscano su altri fattori di vocazione (condizioni abitative, presenza di portierato, pendolarismo, ecc.), che finiscono per ripercuotersi sulla qualità della raccolta. La "traccia" di questa influenza indiretta si può ravvisare nella inclinazione negativa della retta di regressione lineare, la quale, in effetti, descrive una leggera diminuzione tendenziale della purezza merceologica all'aumentare della dimensione demografica.

Dalla distribuzione dei punti è possibile comunque notare immediatamente la presenza di alte purezze merceologiche anche in centri di grandi dimensioni, a fronte di purezze merceologiche relativamente basse o bassissime in diversi centri di dimensione media e piccola. Ancora una volta viene dunque ribadita la primaria influenza del sistema di raccolta sulla purezza merceologica, indipendentemente dall'ampiezza e complessità demografica del contesto di riferimento.

9.4 L'ottimizzazione operativa dei circuiti ed il contenimento dei costi

9.4.1 Una premessa metodologica: come valutare i costi di raccolta

Nelle indagini economiche sin qui condotte sui diversi sistemi di gestione dei rifiuti urbani sono state definite, oltre alle voci di costo relative alle fasi di smaltimento e/o trattamento, anche quelle concernenti le raccolte. Questo viene solitamente fatto esprimendo il costo in Euro/kg, in funzione del flusso complessivo dei rifiuti raccolti ovvero del singolo flusso di rifiuto. Tale impostazione è stata inizialmente adottata in analogia con i costi di trattamento e smaltimento, per rendere le valutazioni omogenee con queste voci di costo. Tuttavia è facile rendersi conto del fatto che la valutazione dei costi dei servizi in Euro/kg diminuisce all'aumentare del quantitativo dei rifiuti raccolti, e tale "effetto perverso" non consente di mettere in evidenza alcuni aspetti virtuosi connessi con le diverse esperienze di gestione integrata del rifiuto urbano. Questi sono:

- la diminuzione complessiva delle quantità conferite, in sintonia con le direttive di riduzione all'origine;
- il contributo del compostaggio domestico alla riduzione specifica dello scarto organico raccolto.

In particolare, la valutazione sul singolo flusso non consente di apprezzare le possibilità di integrazione operativa dei circuiti. Grazie all'intercettazione di alcune frazioni potrebbe infatti essere possibile modificare il sistema complessivo di raccolta, con diminuzione, per esempio, della frequenza di asporto ovvero la variazione della modalità di raccolta del "rifiuto residuo" indifferenziato.

Il concetto fondamentale che vale la pena sottolineare, è che un sistema di raccolta (e di trasporto) non "costa" per la quantità di rifiuti raccolti, ma per la sua configurazione operativa complessiva (unità di personale, numero e tipologia dei veicoli, cadenza dei giri di raccolta, numero dei punti di prelievo, ecc.). È proprio questo dato (il costo complessivo correlato alla configurazione operativa del servizio o, meglio, il costo complessivo "pro capite" in Euro/abitante/anno) che deve essere valutato per determinare la "competitività economica" di un sistema di raccolta, a fronte, ovviamente, della propria efficacia in termini di quantità/qualità della raccolta differenziata.

Dato un certo sistema di raccolta, con i propri costi complessivi tipici, è certamente possibile dare una valutazione positiva a fronte di una minore raccolta complessiva dei rifiuti, considerando sia le frazioni differenziate che quelle indifferenziate. Questa situazione è determinata spesso dall'effetto di esclusione di diversi flussi artigianali ed industriali dal circuito di raccolta del rifiuto urbano, con il conferimento autonomo di tali materiali a sistemi specifici di recupero. Ciò è da considerarsi un tipico effetto della "domiciliarizzazione" dei sistemi di raccolta che, adottando contenitori di piccolo volume, previene il recapito improprio di scarti artigianali/industriali, macerie ed altro nel circuito di raccolta dei RU. In questi casi, la diminuzione del rifiuto pro capite porterebbe - attraverso una semplice valutazione in Euro/kg - ad una distorsione valutativa, dovuta proprio alla diminuzione del termine al denominatore, con conseguente sovrastima dei costi per chilogrammo raccolto. La valutazione in Euro/kg andrebbe a penalizzare le situazioni "virtuose", premiando invece i sistemi con maggiore produzione pro capite di rifiuti.

Nel caso dei servizi di raccolta (e trasporto) è ragionevole e corretto sostenere che il costo per la gestione di un determinato circuito di asporto sia espresso come costo complessivo, cioè come costo della configurazione del servizio e non per il quantitativo raccolto. Il tutto verrà poi rapportato alle utenze servite (Euro/ab/anno), onde rendere confrontabili i costi tra Comuni a maggiore e minore popolazione.

9.4.2 *Il paradosso della competitività economica dei sistemi domiciliarizzati*

Sulla scorta di dati rilevati sul territorio, è indispensabile, in questa sede, portare un contributo importante alla discussione circa l'opinione, ampiamente diffusa, secondo la quale "è inevitabile che le raccolte differenziate spinte e, in particolare, lo sviluppo dei circuiti di raccolta dell'umido comportino sensibili innalzamenti dei costi". In realtà, i progettisti e/o i gestori dei sistemi di raccolta hanno, in numerose situazioni, adottato modalità in grado di incidere sensibilmente sui costi, nel senso di una riduzione, preservando, al contempo, qualità ed efficacia del circuito. Una volta individuati i principali fattori di costo, è stato possibile abbatterne o ridurne l'incidenza mediante l'integrazione operativa delle raccolte. Il risultato netto è un costo delle raccolte "secco-umido" (valutato per utenza servita, ossia in Euro/ab/anno) sostanzialmente equivalente ai circuiti tradizionali di raccolta differenziata "convenzionale" od "aggiuntiva" (ossia con disposizione di contenitori stradali per la sola intercettazione di frazioni secche).

In Figura 9.6, sono riportati i dati di costo delle raccolte, espressi in Euro/ab/anno, con riferimento a Comuni socialmente ed urbanisticamente omogenei (Comuni della Provincia di Verona), suddivisi a seconda del sistema di raccolta differenziata adottato, ossia:

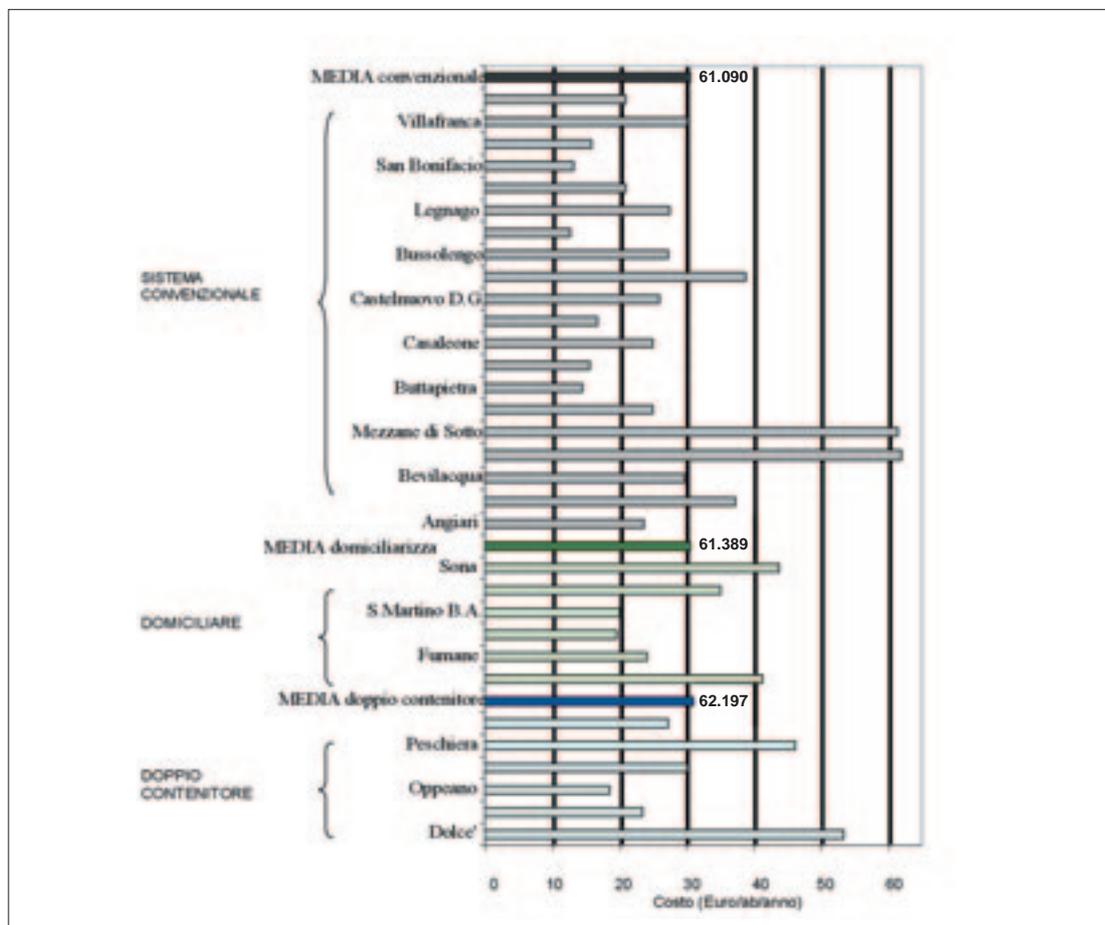


Figura 9.6 - Analisi dei costi di raccolta nei Comuni della Provincia di Verona (AMIA, 1998).

- Raccolte differenziate "convenzionali" od "aggiuntive" (solo cassonetti e campane stradali per l'intercettazione delle sole frazioni costituite da carta/cartone, plastiche e vetro; nessuna separazione dello scarto alimentare)
- Raccolte differenziate "secco-umido" con doppio contenitore stradale (uno per la frazione compostabile, generalmente inclusiva dello scarto di giardino, uno per il "secco residuo")
- Raccolte differenziate "secco-umido" con domiciliarizzazione della raccolta della frazione alimentare.

Dall'esame della figura, si evince una sostanziale invarianza dei costi nei sistemi con differenziazione dell'"umido" rispetto a quelli convenzionali.

La tendenza viene sostanzialmente confermata dalle analisi relative al Bacino "Venezia 4" (Figura 9.7) dalle quali si evidenzia un costo di raccolta mediamente più basso per i sistemi "secco-umido" domiciliarizzati rispetto alle raccolte convenzionali o a quelle a doppio contenitore stradale. Questo risultato consente di apprezzare ancora di più quegli elementi pecu-

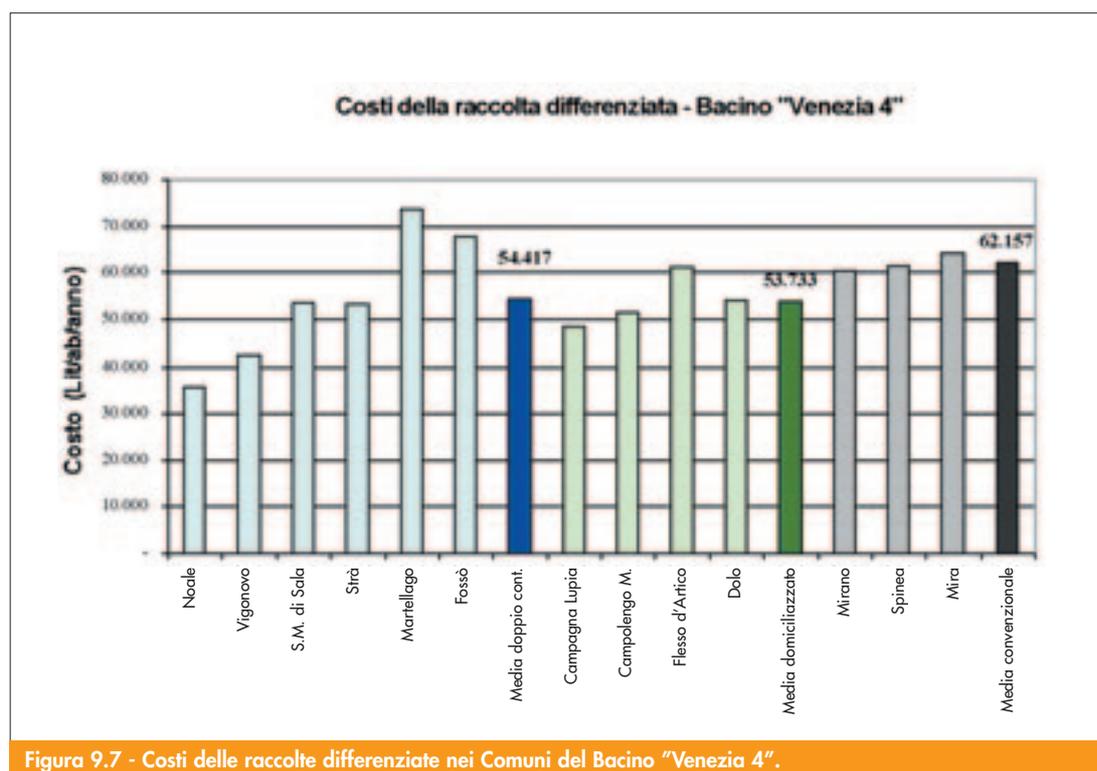


Figura 9.7 - Costi delle raccolte differenziate nei Comuni del Bacino "Venezia 4".

liari che distinguono gli schemi delle raccolte differenziate in Italia rispetto alle caratteristiche dei sistemi di raccolta tradizionalmente adottati nel resto d'Europa. Innanzitutto, uno degli elementi che emergono dal progressivo consolidamento dei sistemi di raccolta delle frazioni riciclabili dei rifiuti - in particolare a seguito dell'introduzione della differenziazione "secco-umido" - è il graduale passaggio da una operatività aggiuntiva, con maggiorazioni dei costi complessivi di gestione del servizio di ogni raccolta differenziata giustapposta allo schema operativo preesistente, ad una operatività integrata, cioè ad un sistema in cui l'introduzione di un nuovo circuito di raccolta differenziata va a modificare sostanzialmente le caratteristiche strutturali (volumi, veicoli, frequenze) degli altri circuiti, ed in particolare del flusso del rifiuto secco residuo.

Come considerazione di fondo, va segnalato che i modelli operativi adottati nei contesti con le più alte percentuali di raccolta differenziata prevedono, in generale, una domiciliarizzazione spinta dei circuiti di raccolta, allo scopo di promuovere la partecipazione efficace da parte degli utenti. Ciò porta ad un sostanziale miglioramento di qualità e quantità delle frazioni differenziate. L'aspetto quantitativo è particolarmente importante per frazioni quali l'umido e la carta, caratterizzate da una elevata "utilità marginale" (in termini di quantitativi recuperati) a fronte della domiciliarizzazione del servizio. Quest'ultima porta un contributo aggiuntivo notevole rispetto a quanto intercettato con i sistemi a contenitore stradale. Possiamo dunque passare a valutare se tale elevata intercettazione consenta di modificare anche le modalità di raccolta del rifiuto residuo, secondo il significato proprio della "integrazione" dei circuiti.

9.4.3 Tendenze emergenti per la ottimizzazione dei servizi di raccolta differenziata

Come già accennato, le condizioni operative che hanno consentito di raggiungere l'obbetti-

vo di elevati traguardi di raccolta differenziata prevedono, in generale, la *domiciliarizzazione* o, almeno, la *capillarizzazione* (nel caso delle "raccolte di prossimità") dei sistemi. Questo approccio ha dimostrato di essere valido e ricco di ricadute operative potenzialmente positive, soprattutto nel caso delle raccolte di frazioni che incidono fortemente sia in termini quantitativi che volumetrici, con possibilità di integrazione o sostanziale modifica dei circuiti complessivi di asporto dei rifiuti urbani.

In particolare, l'attivazione di circuiti domiciliarizzati di raccolta della frazione organica consente una drastica riduzione della componente putrescibile nel "rifiuto residuo". Contemporaneamente, le caratteristiche intrinseche dell'"umido" raccolto consentono di ottimizzare la tecnica di asporto con mezzi appropriati.

9.4.3.1 Diminuzione della frequenza di raccolta del "rifiuto residuo" secco

L'efficace raccolta della frazione secca riciclabile e, congiuntamente, la spinta intercettazione della componente putrescibile attraverso i circuiti "secco-umido", offrono la possibilità di diminuire il volume unitario dei contenitori dedicati al "rifiuto residuo" e, soprattutto, la frequenza di asportazione dello stesso.

È evidente che la riduzione della frequenza di prelievo del "rifiuto residuo" è possibile solo laddove si abbia un forte drenaggio di scarti di cucina, ossia una buona intercettazione della frazione putrescibile, attraverso i circuiti di raccolta differenziata specifica. Sotto questo profilo, è interessante mettere in evidenza (*Tabella 9.14*) le prestazioni assai diverse dei sistemi porta a porta o delle raccolte mediante contenitori condominiali (da 160-200, fino a 240 g/ab/giorno di scarto di cucina) rispetto a quelle raggiungibili con raccolta tramite contenitori stradali di grandi dimensioni (intercettazione media di scarto organico tra 100 e 250 g/ab/giorno, con presenza spesso cospicua, se non prevalente, di residui da giardinaggio). Nel caso delle raccolte stradali, in realtà, diminuisce sensibilmente il grado di partecipazione alla raccolta dello scarto di cucina e, dunque, diminuisce la intercettazione di questo flusso di rifiuto. I volumi ampi dei contenitori dedicati rendono, d'altra parte, più agevole il conferimento di quote, di solito importanti, di residui verdi del giardino. Ciò si manifesta, tra l'altro, con una stagionalità marcata e con un netto abbassamento della densità apparente del materiale organico raccolto.

Tabella 9.14 - Prestazioni tipiche dei diversi sistemi di raccolta dello scarto alimentare.

Sistema adottato	Intercettazione complessiva (tipico)	Residui da giardinaggio	Intercettazione dello scarto di cucina
Domiciliarizzato classico	170-240 g/ab/giorno	0% (se vietato il conferimento) 0% (max, con volumi limitati a disposizione)	160-220 g/ab/giorno
Doppio contenitore stradale	150-200 g/ab/giorno	40-70% (stagionale)	60-120 g/ab/giorno

(Fonte Cocchi, 1997; Favoino, 1999; Provincia di Milano, 1998)

Non è difficile comprendere come tassi di intercettazione specifica degli scarti di cucina inferiori a 150 g/ab/giorno non siano in grado di determinare una sensibile diminuzione della fermentescibilità del "rifiuto residuo". Questa situazione è aggravata anche in conseguenza dell'"effetto concentrazione" che si verifica a seguito della contestuale raccolta differenziata di alcune frazioni secche (es. carta, plastiche, vetro). Ne consegue che le raccolte stradali, non potendo portare ad una diminuzione sostanziale delle frequenze di raccolta del "rifiuto residuo", finiscono per trasformare il costo della differenziazione in semplice costo "aggiuntivo". Ciò si verifica anche in molti scenari centro-europei, laddove la mancata distribuzione

all'utenza di strumenti per il primo contenimento "a tenuta" degli scarti putrescibili (es. sacchetti in polimero biodegradabile) ha tradizionalmente determinato una bassa intercettazione di rifiuti "cotti" (raccolte VGF).

Il tema della riduzione delle frequenze di raccolta del "rifiuto residuo" rappresenta una buona opportunità per l'ottimizzazione delle raccolte differenziate in tutti i contesti in cui si attua una frequenza alta di asporto (tipicamente, tutta l'area mediterranea e, in particolare, Sud Italia, Spagna e Portogallo). In tali situazioni si offrono possibilità diverse di combinazione tra le frequenze di raccolta dell'"umido" e quelle del "rifiuto residuo". Al contrario, nei Paesi del Centro Europa, la adozione diffusa di basse frequenze di raccolta già all'origine, rende oggettivamente problematica una ulteriore riduzione.

9.4.3.2 Specializzazione e flessibilità del parco-macchine

L'articolazione dei circuiti di raccolta differenziata secondo le specifiche caratteristiche delle singole tipologie di materiali (densità apparente, in primo luogo) impone la revisione del parco-macchine da impiegare nelle raccolte stesse. Nel caso delle raccolte "secco-umido" domiciliarizzate - con conferimento dell'"organico" in sacchetti, mastelli o contenitori di piccolo volume - la raccolta dell'"umido" può avvenire con mezzi a vasca aperta, privi di compattatore, in ragione dell'alta densità apparente dello scarto di cucina "in purezza" (500-700 kg/m³), a fronte di quella del materiale miscelato con elevate aliquote di residui di giardino (200-350 kg/m³).

L'impiego di mezzi privi di compattatore è, ovviamente, applicabile solo se la progettazione dei vari circuiti di asporto riesce a prevenire con efficacia il conferimento congiunto della frazione di residui verdi proveniente dalla manutenzione di parchi e giardini. Al fine di evitare un conferimento eccessivo di residui da giardinaggio (sfalci d'erba e ramaglie), come ripetutamente richiamato in precedenza, si dovranno limitare i volumi dei contenitori a disposizione delle utenze monofamiliari con giardino, fornendo secchi e piccoli mastelli. Così operando, alla singola famiglia si offrono opzioni alternative per la gestione dei residui verdi:

- il compostaggio domestico (adeguatamente sostenuto e promosso);
- il conferimento ad una piattaforma ecologica;
- la raccolta a domicilio, con frequenza differita (da quindicinale a mensile) rispetto all'asporto dell'"organico" putrescibile, grazie alla possibilità di stoccaggio dei residui verdi per tempi relativamente lunghi senza l'insorgenza di fastidi causati da odori o proliferazione di insetti.

9.4.3.3 Alla ricerca di ulteriori conferme: analisi di situazioni "mature"

Nelle realtà in cui i criteri di ottimizzazione operativa dei circuiti di raccolta sono già stati adottati, gli effetti dell'integrazione dei sistemi sopra descritti sono ben percepibili.

Risulta utile, a questo punto, esaminare alcuni dati relativi a situazioni reali di offerte di appalto della raccolta "secco-umido" come quella, per esempio, di alcuni Comuni del Bacino "Padova 1". (Tabella 9.15).

Emergono, da questa analisi, elementi di estremo interesse.

- Pur nella variabilità dei dati di costo (dipendenti da condizioni urbanistiche specifiche, dalle condizioni contrattuali, ecc.), gli intervalli di costo cominciano a uniformarsi. Ciò è rappresentato dall'incidenza percentuale relativamente bassa della deviazione standard dei dati di costo. Questo fatto, accresce il significato statistico dei dati in quanto raffigura un situazione "matura" dal

punto di vista operativo, nella quale i gestori del servizio dimostrano di conoscere gli effettivi livelli di costo di esercizio del sistema.

- Il costo per utenza servita con due giri settimanali di asporto dell'“umido”, mediante automezzi a vasca aperta, è sostanzialmente analogo a quello relativo alla condizione con un solo giro di asporto settimanale del “rifiuto residuo” secco, a mezzo di autocarro con compattatore. Se la valutazione fosse effettuata il lire/kg, la comparazione sarebbe oggettivamente sfavorevole all'“umido”, essendo il quantitativo raccolto inferiore rispetto a quello del “rifiuto residuo” secco (50-70 kg/ab/anno, a fronte di 100-200 kg/ab/anno). Tuttavia, la raccolta non costa sulla mera base dei chilogrammi intercettati (questo criterio vale semmai per i costi complessivi di smaltimento) quanto per la configurazione del servizio; e raccogliere “umido” significa ridurre le frequenze di raccolta del “secco”.

Tabella 9.15 - Costi (Lit/ab/anno) per utenza servita dai circuiti di raccolta del “rifiuto residuo” secco, con compattatore, e dell' “umido”, con mezzi a vasca aperta.

Servizio	Frequenza	Media (lire)	SD (lire)	SD (%)
umido	2 volte/sett.	12.948	3.057	23,6
“rifiuto residuo” secco	1 volta/sett.	13.993	4.285	30,6
combinazione	-	26.941	5.949	22,1

Fonte: Ufficio Tecnico “Bacino PD 1” - 39 casi analizzati.

Queste evidenze trovano ulteriore conferma nel caso di alcuni Comuni della Provincia di Verona (Tabella 9.16). Anche in questa situazione, il costo di raccolta dell'“umido”, due volte/settimana, con automezzi a vasca, è sostanzialmente paragonabile alla raccolta del “secco” residuo, con cadenza unica settimanale a mezzo di compattatori.

Tali risultati sono ascrivibili all'effetto virtuoso della modificazione che la raccolta differenziata introduce nei sistemi precedentemente adottati, cioè, una riduzione dei passaggi di asporto del residuo “secco” ed il contemporaneo impiego di automezzi meno onerosi per la raccolta dell'“umido”.

Una efficace politica consortile degli appalti di gestione delle raccolte, può dunque consentire anche l'aggregazione dei percorsi di asporto su base intercomunale, determinando l'abbattimento dei costi e consentendo anche ai piccoli municipi di entrare nel circuito della differenziazione del rifiuto, indipendentemente dall'ampiezza e complessità demografica del contesto di riferimento.

Tabella 9.16 - Costo (Lit/ab/anno) per il servizio di raccolta “secco-umido” domiciliarizzato

Comune	Abitanti	Costo raccolta “rifiuto residuo” secco (1 giro/sett.)	Costo raccolta “umido” (2 giri/sett.)
Sommacampagna e Sona (VR)	26.036	14.100	17.195

9.5 Considerazioni finali su integrazione del sistema di asporto dei rifiuti e riduzione dei costi

differenziazione "spinta", mediante separazione "secco-umido". Ciò consente di individuare alcune interessanti tendenze per l'ottimizzazione dei sistemi di raccolta.

Risulta assai chiaro che l'errore principale, spesso commesso nel caso delle raccolte differenziate, è rappresentato dal fatto di conferire a quest'ultime caratteristiche, per così dire, "aggiuntive". Ciò significa la mancata revisione del sistema di raccolta del rifiuto indifferenziato, il quale rimane pressoché inalterato in termini di modalità di conferimento, di volumetrie dei contenitori a disposizione degli utenti e di frequenze di asporto. La raccolta differenziata diventa, in tal modo, solo un'ulteriore voce di costo del bilancio, senza introdurre quegli elementi positivi (cadenze di asporto e mezzi impiegati) per la riduzione dei costi di raccolta del "rifiuto residuo".

Uno dei temi da verificare in prospettiva è la possibilità di applicare i criteri operativi sin qui descritti in contesti del tutto particolari in termini di organizzazione amministrativa delle raccolte.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AMIA - VERONA (1999). *"Raccolte differenziate: Banca dati - Indagine 1997"*. Roma - marzo 1999.

AMIAT - TORINO (1999). *"Analisi merceologiche dei rifiuti organici"*. Atti delle Giornate di Studio, Torino 11-15 ottobre 1999.

BARTH J. & KROEGER B. (1998). *"Kompostierung und Qualitätssicherung von Kompost in Europa"*. Proc. Conf. "Bio- und Restabfallbehandlung II", Kassel.

BARTH J. (2000). *"European Compost Production - Sources, Quantities and Use in Selected Countries"*. Proc. SEP-Pollution, Padova - 30 marzo 2000.

BIGLIARDI P. (1998). *"Frazione umida compostabile da utenze domestiche. Esperienze e prospettive"*. Atti del Convegno "Ricicla '98", settembre 1998, Rimini.

COCCHI A. (1997). *"Risultati delle raccolte differenziate nel Persicetano"*. Comunicazione personale.

FAVOINO E. (1999). *"Criteri di approvvigionamento delle matrici compostabili: le raccolte differenziate"*. Atti del Corso Nazionale sul Compostaggio, CIC, Bari.

GRUENEKLEE E. (1997). *"Produzione, qualità e marketing del compost in Germania"*. Atti del Convegno "Manifesto del Compostaggio in Italia", Milano.

LAZZARI L. (1998). *"La raccolta differenziata della frazione organica: il progetto FORSU"*. Consorzio Azienda Intercomunale "Treviso 3".

PROVINCIA DI MILANO (1998). *"Gestione dei Rifiuti Solidi Urbani 1998 - Indirizzi Programmatici e Azioni di Approfondimento"*. Serie Quaderni della Provincia di Milano, Milano.

RICCI M. (1999). *"Evoluzione delle raccolte differenziate in Provincia di Verona: le esperienze di raccolta secco-umido"*. Atti del Convegno "Dalla raccolta differenziata alla tariffa sui RSU", aprile 1999, Sommacampagna.

10. Caratteristiche tecniche e settori di impiego del compost: importanza per l'agricoltura italiana

10.1 La progressiva diminuzione della sostanza organica nei suoli italiani: significato e conseguenze

Il contenuto di sostanza organica nei suoli italiani sta, in maniera lenta ma costante, diminuendo progressivamente. Il processo di impoverimento graduale della fertilità dei suoli è certamente uno degli effetti più vistosi di un fenomeno più generale e complesso che, soprattutto nel bacino del Mediterraneo, sta assumendo dimensioni preoccupanti: la desertificazione. A testimonianza della complessità del fenomeno e della relativa indipendenza dalla collocazione geografica, si riporta la definizione di desertificazione scaturita dalla Conferenza delle Nazioni Unite a Nairobi: *"riduzione o distruzione del potenziale biologico del terreno che può condurre a condizioni desertiche"*.

Da allora, era il 1977, molteplici sono state le iniziative finalizzate alla comprensione delle cause principali del fenomeno, allo studio dei processi in atto e alla predisposizione di mezzi per mitigare gli effetti di questo problema.

L'Italia, alla luce dei fattori considerati nella Convenzione sulla Desertificazione, rientra tra i Paesi colpiti da questa forma di degrado del territorio, in quanto molti comprensori meridionali sono citati tra le regioni direttamente colpite dalla siccità, mentre le regioni settentrionali iniziano a subire i primi effetti negativi delle piogge acide e del dissesto idrogeologico.

I dati per ora disponibili sulle condizioni del suolo indicano che circa il 27% del territorio italiano è esposto ad un elevato rischio di erosione, la quale rappresenta uno dei sintomi più significativi della desertificazione, mentre il 69% è esposto ad un rischio dello stesso tipo in misura da lieve a moderata.

Nella *Tabella 10.1* vengono riassunti i diversi fattori predisponenti ai processi di desertificazione. Tra i fenomeni di degradazione in atto, alcuni assumono un carattere di particolare rilevanza soprattutto nei territori italiani: la *salinizzazione*, la *perdita di sostanza organica* e l'*erosione del suolo*.

Tabella 10.1 – Fattori di desertificazione.

Fattori ambientali	Fattori antropici
Clima e variazioni climatiche	Utilizzo delle risorse idriche
Morfologia ed orografia del territorio	Deforestazione ed incendi
Grado di copertura vegetale	Attività agricola
	Attività zootecnica
	Urbanizzazione
	Diffusione di specie vegetali alloctone

10.1.1 Salinizzazione

In diverse zone costiere italiane (es. pianura Versiliese, Sicilia, Piana della Val di Cecina) si assiste al crescente fenomeno di intrusione di acque marine nei corpi acquiferi continentali. Questo porta ad una progressiva distribuzione e concentrazione di sali nei terreni agrari delle zone in questione.

10.1.2 Erosione

Più di un quarto del territorio italiano è soggetto a fenomeni erosivi. Ciò in conseguenza della conformazione orografica e della litologia dei contesti territoriali che favoriscono l'asportazione di terreno sotto l'azione dell'acqua (pioggia battente e scorrimento superficiale) e del vento.

10.1.3 Diminuzione del contenuto di sostanza organica

Questo fenomeno è di importanza primaria nel determinare il grado di potenziale desertifi-

cazione di un suolo. La sostanza organica garantisce la stabilità strutturale del terreno, la ritenzione idrica, la vita microbica e rappresenta la componente primaria della fertilità complessiva di un suolo coltivato (Tabella 10.2), come anche riportato nella Prima Comunicazione Nazionale alla Convenzione sulla Desertificazione (1998). Negli ultimi decenni trascorsi si è determinata una progressiva diminuzione del contenuto in sostanza organica dei terreni italiani. Ciò si è verificato soprattutto nelle regioni del versante adriatico e in alcuni comprensori dove, per cause dovute ad un eccessivo sfruttamento della "risorsa terreno", sono venuti a mancare i "ricarichi" periodici di sostanza organica (in particolare, letame), finalizzati al ripristino della dotazione di carbonio organico, il quale, in via del tutto naturale, viene di volta in volta mineralizzato.

L'European Soil Bureau (Figura 10.1) ha messo a punto una mappa del territorio europeo discriminando sulla base di un contenuto in carbonio organico dei suoli coltivati (strato 0-30 cm) maggiore o minore del 2%. Da tale mappa risulta molto chiaramente la situazione dei territori dell'Europa del Sud (area mediterranea), dove mediamente il 74,6% del territorio ha un contenuto inferiore al 2% in carbonio organico. L'Italia appartiene a questa categoria con l'86,4% circa del territorio nazionale.

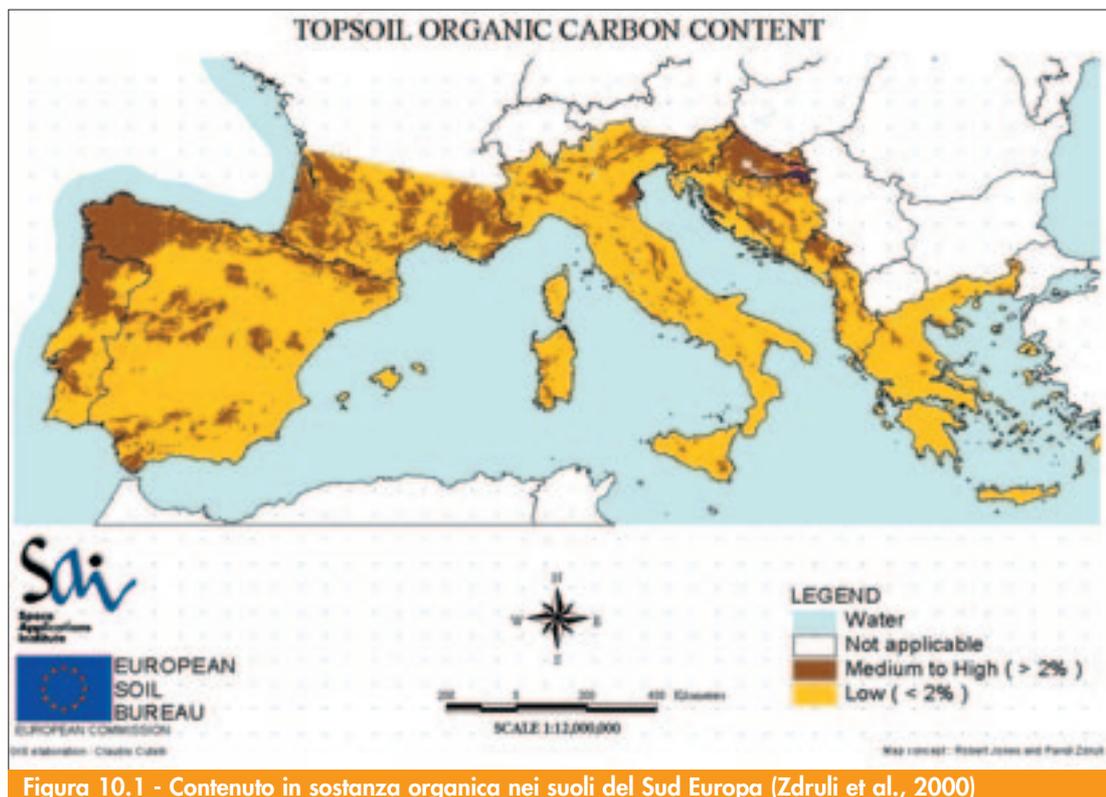


Figura 10.1 - Contenuto in sostanza organica nei suoli del Sud Europa (Zdruli et al., 2000)

Al fine di accertare il reale grado di desertificazione dei suoli in Italia e di predisporre soluzioni per mitigare l'avanzata di questo fenomeno, le azioni da intraprendere si presentano molteplici e, in buona sostanza, riconducibili ai seguenti punti:

- monitoraggio dello stato dei suoli, per definirne il tenore di sostanza organica, la suscettibilità all'erosione e il rischio di salinizzazione;

- quantificazione delle esigenze dei suoli relativamente al reintegro della dotazione in sostanza organica, quale intervento per la lotta al degrado dei terreni agrari;
- allestimento di un inventario delle fonti di sostanza organica potenzialmente destinabili ai suoli (es. biomasse agricole, frazioni organiche provenienti da raccolta differenziata alla fonte, biomasse di scarto dell'attività agro-industriale, ecc.), con relativa definizione delle quantità disponibili, delle caratteristiche chimico-fisiche e delle condizioni di valorizzazione per il riutilizzo in agricoltura.

Nel quadro degli interventi individuati dalla citata Prima Comunicazione Nazionale, al fine di contenere i processi di degrado dei suoli, si segnala il ruolo importante assegnato a pratiche finalizzate al mantenimento e all'incremento della fertilità, quali l'adozione di pratiche di ammendamento con compost.

Tabella 10.2 - Funzioni della sostanza organica nei terreni.

NATURA DELLE PROPRIETÀ INFLUENZATE	AZIONE SPECIFICA DELLA SOSTANZA ORGANICA	TIPO DI EFFETTO
PROPRIETÀ FISICHE	Miglioramento della struttura	nei terreni argillosi: mitigazione dei fenomeni di crepacciamento nei terreni sabbiosi: maggiore stabilità della struttura glomerulare nei terreni limosi: minore tendenza alla formazione di croste superficiali
	Incremento dell'intensità del colore	Aumento della temperatura del suolo
	Aumento della capacità di ritenzione idrica	Maggiore possibilità di trattenimento dell'acqua, che viene resa disponibile con gradualità
PROPRIETÀ CHIMICHE	Funzioni nutrizionali	<i>DIRETTE</i> : apporto di nutrienti (N, P, S, ecc.) dovuto ai processi di mineralizzazione <i>INDIRETTE</i> : chelazione ed adsorbimento di Fe, P, metalli pesanti, ecc.; rilascio graduale di elementi nutritivi destinati all'assorbimento radicale
PROPRIETÀ BIOLOGICHE	Azione sulla microflora tellurica	Funzione di substrato per i microorganismi coinvolti nei cicli biogeochimici; effetto di inibizione nei confronti di alcuni funghi fitopatogeni
	Azione sulla pianta	Funzione di stimolo all'accrescimento radicale dovuto all'apporto di composti biologicamente attivi (es. aminoacidi, nucleotidi, ecc.)

10.1.4 Pratiche per la conservazione ed il miglioramento della dotazione di sostanza organica nei suoli

Di seguito sono elencate alcune azioni e pratiche agricole per la gestione della risorsa "sostanza organica" nei terreni:

- Copertura vegetale
- Pacciamatura
- Lavorazioni conservative
- Letamazioni e sovesci
- Irrigazioni
- Gestione e recupero delle biomasse di scarto

Il compost di qualità, o derivato dal trattamento di scarti organici selezionati alla fonte (es. da raccolta differenziata in ambito urbano, da matrici agroindustriali, da fanghi di depurazione selezionati, ecc.), rappresenta una nuova importante fonte di sostanza organica. Esso va ad affiancare, nell'uso, altre matrici (es. ammendanti tradizionali quali letami, concimi organo-minerali, ecc.), rendendosi disponibile per operazioni di mantenimento o ricarica di sostanza organica nei suoli, insieme ai tradizionali sovesci ed alle rotazioni. Per comprendere il ruolo del compost e per definirne gli ambiti di impiego è necessario individuarne le caratteristiche agronomiche salienti. Queste notizie sono essenziali in quanto il compost, proprio per il fatto di rappresentare, tra i fertilizzanti organici, un prodotto innovativo, si colloca sul mercato con caratteristiche tecniche e commerciali assolutamente inedite.

10.2 Individuazione delle caratteristiche agro-ambientali del compost

Al fine di determinare le caratteristiche qualitative di un compost ed individuarne, quindi, il settore d'impiego più idoneo, è necessaria la considerazione di numerosi aspetti. A fronte di questo rigore da adottare per la caratterizzazione di un compost, è altrettanto importante sottolineare tuttavia che la qualità del substrato compostato di interesse può essere accertata a "fasi successive". Ciò significa che, in prima battuta, dovrà essere verificata la compatibilità tra il compost ed il sistema suolo in termini di stabilità della matrice organica. Successivamente si passerà a considerare i requisiti ambientali del compost ed infine una serie di caratteristiche generali e particolari, importanti per l'individuazione dell'ambito ottimale d'impiego. In *Tabella 10.3* è descritto questo approccio metodologico, con la specificazione degli approfondimenti analitici da attuarsi con la progressione sopra indicata.

10.2.1 Gli indici di stabilità per definire la fermentescibilità residua

Il compostaggio, come noto, è un trattamento biologico aerobico che tende, da una parte, a mineralizzare i composti organici più facilmente fermentescibili e, dall'altra, a riorganizzare le sostanze organiche meno reattive da un punto di vista microbiologico (es. cellulosa e lignina) in una matrice complessa, rappresentata dalle molecole umiche. Dal punto di vista biochimico, durante il processo di compostaggio, avviene sia una degradazione della sostanza organica, tale da ridurre drasticamente la putrescibilità della biomassa substrato iniziale (stabilizzazione), che una progressiva humificazione (maturazione), con l'accumulo di sostanze che nobilitano il compost finito. Il raggiungimento della stabilità, ovvero del momento in cui si individua il rallentamento dell'intensità dei processi biologici a carico della sostanza organica, è fondamentale per definire gli effetti potenziali del compost e, quindi, la compatibilità agronomica tra la sostanza organica compostata, il suolo e le piante che in esso sono a dimora. Diversi sono i modi attraverso i quali individuare ed esprimere la stabilità di un compost: contenuto in azoto ammoniacale, indice di mineralizzazione dell'azoto, indici legati all'evoluzione delle sostanze humiche, ecc..

Il parametro che ad oggi sembra meglio descrivere la putrescibilità residua del materiale compostato è l'*Indice di Respirazione* (LASARIDI & STENTIFORD, 1999). Questo consente di valutare la CO₂ (anidride carbonica) prodotta o l'O₂ (ossigeno molecolare) consumato (espresso in mg)

per unità di massa (kg di solidi volatili, SV) del substrato indagato, nell'unità di tempo (h). Si possono distinguere, in relazione alla fornitura di aria al campione sottoposto alla prova, un *indice statico* ed un *indice dinamico*. In Italia, accanto al metodo statico (UNI 10780, 1998), è stato messo a punto un metodo dinamico per la determinazione dell'indice respirometrico (DiPROVE, ADANI *et al.*, 2000; Regione Lombardia 1999; Scaglia *et al.* 2000.).

Anche nei metodi dell'ASTM (*American Society for Testing Materials*) ritroviamo una metodologia simile (ASTM, 1996), a conferma del sempre crescente interesse per questo tipo di analisi. Il metodo dinamico determina il consumo effettivo di ossigeno di una massa sottoposta ad aerazione continua, consentendo una valutazione più accurata e realistica del quantitativo di ossigeno richiesto dalla sostanza organica putrescibile. D'altra parte, i metodi che prevedono la determinazione della CO₂ prodotta o dell'O₂ consumato, in assenza di aerazione continua della biomassa (indice statico), non discriminano tra la produzione aerobica ed anaerobica e prescindono dalla corrispondenza non sempre univoca tra le moli di O₂ consumato e quelle di CO₂ prodotta. In generale, ancorché i metodi statici rappresentino una buona misura della stabilità biologica, i valori ottenibili risultano sempre sottostimati rispetto ai metodi dinamici (ADANI *et al.*, 1999). Diverse metodiche per la misura dell'indice di respirazione sono descritte nel manuale ANPA "Metodi di analisi del compost".

Tabella 10.3 - Parametri per la definizione della qualità di un compost.

Ordine di priorità	Obiettivo da raggiungere	Parametro analitico di riferimento
1. STABILITÀ	Verifica della stabilità, ovvero della limitata reattività biochimica del compost	Indice di Respirazione (IRS, IRD, SOUR) N-NH ₄ ⁺ o rapporto NH ₄ ⁺ /NO ₃ Humificazione
2. PARAMETRI AMBIENTALI	Limitata presenza di elementi indesiderati	Metalli pesanti Corpi estranei (vetro, plastiche, metalli) Microorganismi patogeni e parassiti
3. PARAMETRI AGRONOMICI DI BASE	Individuazione delle caratteristiche agronomiche generali che possano definire l'ambito agronomico d'impiego	Test di fitotossicità Umidità pH Salinità Sostanza organica Macroelementi della fertilità (N, P, K) Altri elementi in forma totale (Ca, Mg, Fe, ecc.) Semi di piante infestanti Fitopatogeni, nematodi, acari, ecc.
4. PARAMETRI AGRONOMICI SPECIFICI	Individuazione di caratteristiche particolari che possano qualificare e valorizzare l'ambito d'impiego	Caratteristiche fisiche (densità apparente, porosità, densità reale, grado di restringimento, ecc.) Caratteristiche idrologiche (ritenzione idrica, acqua disponibile, porosità libera, ecc.) Capacità di scambio cationico Potere tampone Potere repressivo (nei confronti dei fitopatogeni) Elementi in forma solubile

Altra interessante metodica è quella indicata con la sigla SOUR (*Specific Oxygen Uptake Rate*) (LASARIDI & STENTIFORD, 1999). Questa procedura misura la quota di ossigeno disciolto in ambiente

liquido; si tratta di un test respirometrico (espresso in $\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1} \text{ h}^{-1}$) caratterizzato da una buona affidabilità analitica e riproducibilità. Il metodo SOUR è attualmente poco applicato in Italia. La *Tabella 10.4* riporta una serie di dati relativi ai metodi analitici più diffusi a livello mondiale (USA, Italia e Germania sono i paesi che da più tempo hanno intrapreso studi sulla stabilità delle matrici sottoposte a compostaggio), confrontandoli con il *Rottegrad* ed il *Self Heating Test* (test di autoriscaldamento), indici, questi, diffusamente adottati in Centro Europa. Sia il *Rottegrad* che il *Self Heating Test* determinano la fermentescibilità residua del materiale sulla base della temperatura sviluppata quando il campione di matrice organica è incubato in ambiente termicamente isolato.

La valutazione del grado di stabilità, dal punto di vista pratico, ha conseguenze dirette sui possibili impieghi del compost. Al di sotto di determinati valori, segna il passaggio tra il "compost fresco" (*frischkompost* in Germania) e il "compost maturo" (*fertigkompost*) ovvero tra un materiale per impieghi estensivi (equiparabile al letame che, dal punto di vista biochimico, non è un altro che un prodotto semistabilizzato) ed un materiale utilizzabile a contatto con le radici delle piante (nei terricci per florovivaismo o per impieghi specialistici in arboricoltura), il quale richiede invece una stabilità elevata.

Tabella 10.4 – Tavola comparativa dei limiti di stabilità del compost secondo metodiche analitiche diverse.

Indice	Unità di misura	Matrice organica iniziale	Compost fresco	Compost fresco	Compost maturo	Compost maturo
<i>Rottegrad</i> (D, BGK, 1998)	scala organolettica I - V	I	II	III	IV	V
IRS ⁽¹⁾ (D, BGK, 1998)	$\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1}$ x 4 gg.	> 40.000	> 28.000 ≤ 40.000	> 16.000 ≤ 28.000	> 6.000 ≤ 16.000	£ 6.000
<i>Self Heating Test</i> (D, 1995)	T °C max	> 60	50-60	40-50	30-40	20-30
IRD ⁽²⁾ (USA – ASTM, 1996)	$\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1}$ x 4 gg.	n.i.	258.000	109.000	8.000-35.000	n.i.
IRD (I, Reg. Lombardia, 1999)	$\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1}$ h^{-1}	n.i.		< 1.000		< 500
IRS (I, Reg. Lombardia, 1999)	$\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1}$ h^{-1}	n.i.		< 600		< 300
IRS (I-UNI, 1998) ⁽³⁾	$\text{mg O}_2 \text{ kg SV}^{-1}$ h^{-1}	n.i.		400-600	200-400	< 200

⁽¹⁾ IRS, Indice di Respirazione Statico;

⁽²⁾ IRD, Indice di Respirazione Dinamico;

⁽³⁾ Dati presi dalla letteratura.

10.2.2 Parametri ambientali

- l'assenza di organismi patogeni per l'uomo, per gli animali domestici e per le piante;
- l'assenza o la limitata incidenza di materiali inerti quali vetro, plastiche, residui metallici, ecc.;
- il basso tenore di microinquinanti quali, soprattutto, metalli pesanti

Questi requisiti sono contemplati dalla legislazione italiana che, con la Legge n. 748/84, prevede limiti restrittivi sia per i parametri microbiologici (soprattutto per quanto riguarda Streptococchi ed Enterobacteriacee) sia per i metalli pesanti, in linea con le normative europee sulla commercializzazione del compost in agricoltura (Tabella 10.5).

10.2.3 Purezza merceologica delle biomasse di origine urbana

Il contenuto di corpi estranei nel compost costituisce certamente un grosso limite alla commercializzazione di questo prodotto in ambito agricolo. Di tale situazione è riprova lo scarso successo del compost proveniente dal trattamento dei rifiuti urbani indifferenziati e selezionati meccanicamente a valle della raccolta.

Tabella 10.5 - Limiti di riferimento per gli Ammendanti Compostati (Legge 748/84, e successive modifiche.

Metalli pesanti (ppm s.s.)	
Zinco	500
Rame	150
Piombo	140
Nichel	50
Mercurio	1.5
Cadmio	1.5
Cromo VI	0.5
Materiali indesiderati (% s.s.)	
Mat.li plastici (≤ 3.33 mm)	≤ 0.45
Mat.li plastici (> 3.33 - ≤ 10 mm)	≤ 0.05
Altri mat.li inerti (≤ 3.33 mm)	≤ 0.9
Altri mat.li inerti (> 3.33 - ≤ 10 mm)	≤ 0.1
Mat.li plastici ed inerti (> 10 mm)	Assenti
Parametri biologici	
Salmonelle	Assenti in 25 g t.q.
Enterobacteriacee totali	< 1 x 10 ² UFC/ g t.q.
Streptococchi fecali	< 1 x 10 ³ MPN/ g t.q.
Nematodi	Assenti in 50 g t.q.
Cestodi	Assenti in 50 g t.q.
Trematodi	Assenti in 50 g t.q.

In realtà, il compost che si ottiene dalla frazione organica dei RU ottenuta mediante separazione meccanica, oltre all'elevato contenuto in elementi inquinanti (es. metalli pesanti), presenta un'incidenza decisamente non trascurabile di impurità macroscopiche (vetro, plastiche ed altri inerti). Queste ultime rappresentano un serio impedimento per le applicazioni in agricoltura. D'altra parte, i sistemi tecnologici di selezione meccanica del rifiuto indifferenziato, sebbene ben dimensionati, non possono comunque garantire, anche al meglio dell'efficienza operativa, né la totale assenza delle impurità, cosa tecnicamente impossibile, né tassi di rimozione degli inerti sufficientemente elevati.

È perciò evidente come il grado di pulizia dello scarto che giunge alla stazione di compostaggio rivesta un significato estremamente importante per il successo del ciclo di recupero dei residui organici. In questo senso, i sistemi di raccolta differenziata "secco-umido" possono garantire la generazione di uno scarto compostabile con livelli di impurità molto bassi, dell'ordine del 2-5% sulla matrice organica tal quale (cfr. Cap. 9).

10.2.4 Il contenuto in metalli pesanti

Alla luce delle valutazioni precedentemente formulate, non è difficile comprendere la reale portata dell'introduzione delle raccolte differenziate sul contenuto in metalli nei prodotti com-

postati. A tale scopo è utile confrontare le concentrazioni-limite previste per ciascun elemento dalla L. 748/84, con le medie dei contenuti dei microinquinanti corrispondenti in una serie di ammendanti (compostati e no), appartenenti alle seguenti tipologie:

- Compost da selezione meccanica di RU indifferenziati (RU)
- Compost da fanghi + materiali di supporto (*bulking agents*) lignocellulosici (F+B)
- Compost da deiezioni zootecniche + materiali di supporto lignocellulosici (Z+B)
- Compost da scarti alimentari ("umido") + residui verdi del giardinaggio (A+V)
- Compost da soli residui verdi (V)
- Terricci commerciali per giardinaggio di tipo hobbistico (TH)
- Letami (L).

I dati presentati fanno parte di una banca-dati allestita dalla Scuola Agraria del Parco di Monza e dal DIFCA dell'Università degli Studi di Milano (CENTEMERO & CORTI, 2000).

Nei grafici in *Figura 10.2* si possono osservare i valori medi relativi a ca. 400 campioni. Da notare è l'inclusione dei valori relativi al Cromo totale, nonostante la non considerazione di questo limite nella L. 748/84. Ciò si giustifica alla luce delle diverse normative in forza in ambito europeo, le quali, invece, prevedono il Cromo, tra i limiti. Inoltre, questa assunzione, consente un interessante confronto tra i contenuti in Cromo nei compost di diversa origine, con particolare riferimento a compost da raccolta differenziata presso le utenze domestiche rispetto a quelli da selezione meccanica dei RU o da matrici costituite da fanghi di depurazione. Allo scopo di valutare la variabilità dei singoli dati (es. valori episodici statisticamente attesi presso gli impianti), nei grafici sono state inserite le barre di errore riferite allo scostamento dalla media di un valore pari alla deviazione standard. Una presentazione di questo tipo fornisce utili informazioni sugli intervalli dei valori più frequenti e statisticamente attendibili per i singoli inquinanti.

Dall'esame dei grafici di *Figura 10.2* è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- La ridefinizione, in sede di revisione della L. 748/84, di limiti più restrittivi per i diversi metalli pesanti tende a mettere "fuori gioco" alcune tipologie di compost, escludendole dall'ipotesi del libero impiego e commercializzazione, in mancanza di apposita autorizzazione.
- Il compost da RU indifferenziato mostra i valori più elevati anche se tende a rispettare i limiti della DCI 27/7/84, ossia del compost destinato a "spandimento controllato". I valori medi superano i valori limite delle singole specie chimiche in quattro casi su cinque (Cd, Pb, Cu, Zn). Solo nel caso del Nichel la media dei valori rispetta il limite di legge;
- Molti compost derivanti da fanghi di depurazione non riescono a rispettare i valori limite della L. 748/84, e le medie eccedono i limiti di legge in tre casi (Cd, Cu, Zn), rispettandoli invece per Pb e Ni. Anche in questo caso comunque le medie delle concentrazioni sono ampiamente al di sotto dei limiti definiti dal D.lgs. 99/92 per lo "spandimento controllato" dei fanghi di depurazione in agricoltura.
- Sorprendentemente, la media delle concentrazioni in Zn e Cu nei compost da deiezioni zootecniche supera i limiti di legge. Ciò trova però spiegazione nel largo ricorso che a questi elementi si fa nella preparazione degli integratori destinati agli allevamenti.
- Si può invece affermare che, sia nei compost da scarti alimentari ("umido") che

in quelli da residui verdi, tutte le medie delle concentrazioni di ogni singolo metallo pesante rientrano nei valori-limite della L. 748/84. Ciò consente quindi la libera applicazione e commercializzazione di queste matrici stabilizzate con l'acquisizione di un *habitus* normativo del tipo "bene commerciale" o "mezzo tecnico per la fertilizzazione" in agricoltura. In questo senso, è pertanto possibile esprimere un giudizio positivo sugli effetti della introduzione della raccolta differenziata di biomasse di derivazione urbana sulla qualità ecotossicologica dei compost prodotti.

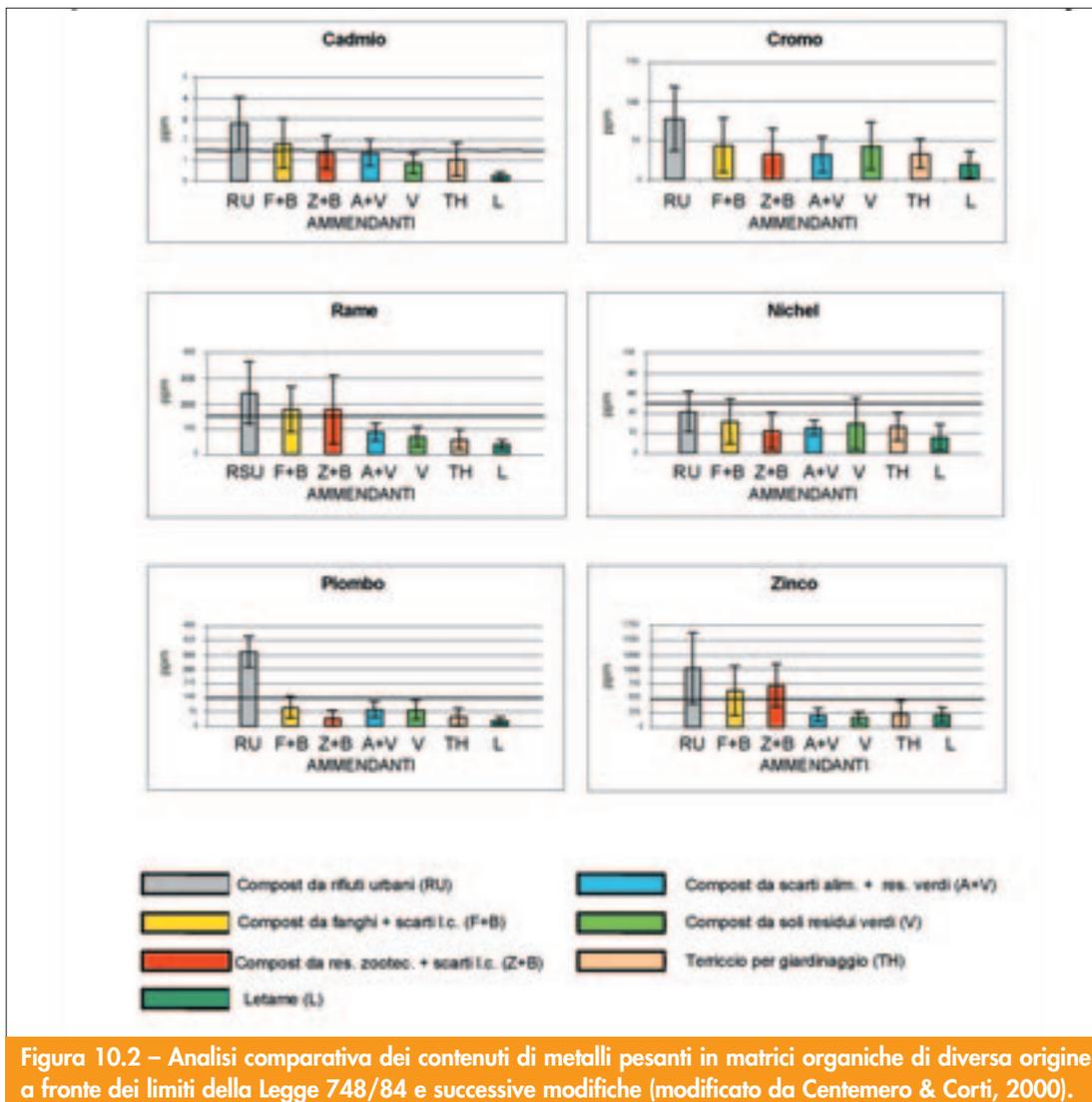


Figura 10.2 – Analisi comparativa dei contenuti di metalli pesanti in matrici organiche di diversa origine a fronte dei limiti della Legge 748/84 e successive modifiche (modificato da Centemero & Corti, 2000).

Va tuttavia attentamente considerato il problema dei "valori episodici". L'esame dettagliato dei dati rivela che per i compost da scarti alimentari, nel caso del Cadmio, e per i compost da soli residui verdi, nel caso del Nichel, l'intervallo dei valori statisticamente attendibili a seguito dell'applicazione dell'analisi della varianza e degli scostamenti dalla media, cade al di fuori del valore-limite di legge. Questo tuttavia è nell'ordine delle cose attendibili e certa-

mente dipende dalla variabilità dovuta all'errore statistico sia di campionamento che di analisi. Tanto è vero che anche nel caso dei terricci commerciali per l'hobbistica (TH) è statisticamente probabile imbattersi in valori eccedenti i limiti di legge.

Il problema della variabilità statistica, che riflette anche fattori non sempre dipendenti dalle capacità di controllo e gestione a livello di impianto di compostaggio, è ben conosciuto da tempo all'estero. Ciò ha portato, molti Paesi con più lunga tradizione di compostaggio a definire nelle norme e/o nei regolamenti applicativi specifiche "tolleranze analitiche". Questo significa l'obbligo che la media dei valori rilevati in un compost rispetti il limite di legge, mentre su singoli campioni è ammesso il superamento, con tolleranze percentuali massime (es. 20%) e su un numero di campioni comunque limitato su base annua. Il problema della mancata definizione delle tolleranze analitiche è, in conclusione, uno dei maggiori problemi del nostro sistema normativo rispetto a quello dei Paesi più avanzati nella promozione del compostaggio.

10.2.5 Caratteristiche agronomiche dei materiali compostati

In *Tabella 10.6* sono riportati i confronti analitici relativi ai principali parametri di valutazione agronomica applicati a differenti prodotti compostati e ad altri materiali organici di tradizionale impiego, al fine di evidenziarne le caratteristiche per le applicazioni a scopo ammendante in pieno campo ovvero come substrati per uso florovivaistico. Per poter valorizzare appieno un compost non sono infatti sufficienti gli accertamenti analitici fin qui considerati (es. stabilità, inerti, metalli pesanti, ecc.). In realtà, per ogni ambito d'impiego, devono essere individuate specifiche caratteristiche tecniche.

10.2.5.1 Il contenuto in nutrienti utili per le piante

Si è generalmente parlato e scritto del compost focalizzando l'attenzione sulle qualità "ambientali", con riferimento, soprattutto, al contenuto in metalli pesanti, i quali, storicamente hanno costituito una discriminante tra le varie tipologie di matrici stabilizzate. Sui limiti relativi al contenuto in metalli pesanti (pericolosi, oltre certe dosi, per la salute dell'uomo e delle piante) si sono concentrate tutte le normative riguardanti la qualità ed i possibili impieghi del compost, nonché l'istituzione dei marchi di prodotto (Ecolabel, Agricoltura biologica, ecc.) e dei marchi di settore (BGK in Germania, Vlaco in Belgio, KGVO in Austria, ecc.).

Tuttavia, trattandosi di un materiale destinato all'uso agricolo, è importante considerare di un compost anche la ricchezza in elementi nutritivi per le piante.

Da quanto riportato in *Tabella 10.6*, possono essere formulate alcune considerazioni.

Il *compost da residui verdi*, ovvero derivato dalla stabilizzazione dei materiali vegetali provenienti dalla manutenzione di parchi e giardini, possiede un basso contenuto in elementi nutritivi, con particolare riferimento ad azoto, fosforo e potassio. È possibile evidenziare, per questa tipologia di compost, una più stretta somiglianza con le torbe rispetto ad altri compost derivanti da matrici a maggior carico putrescibile e più ricche dal punto di vista del contenuto in elementi nutritivi (es. fanghi di depurazione e scarti alimentari). Le torbe, è bene ricordarlo, sono materiali ottimi per le proprietà fisico-meccaniche ma poveri dal punto di vista chimico e biologico. Per la formulazione di terricci, esse vanno opportunamente integrate con altre matrici. Il compost verde, tuttavia, qualora venga miscelato con torbe per la costituzione di substrati destinati al florovivaismo, riesce a garantire un qualche apporto in macronutrienti (N, P e K) e micronutrienti (Ca, Mg, Mn, Fe).

Negli altri substrati compostati, è possibile invece riscontrare un più elevato contenuto in elementi nutritivi. Ciò porta ad accostare i *compost da scarti alimentari* o quelli *da fanghi di depurazione* al *compost da residui zootecnici*, il quale, storicamente, in forma di *letame* più

o meno stabilizzato, ha rappresentato la principale fonte di sostanza organica per il ripristino della fertilità dei suoli. Da notare è la ricchezza in Fe del compost da scarti alimentari e la dotazione elevata in fosforo del compost da residui zootecnici.

Le valutazioni analitiche di dettaglio portano a concludere che il compost verde, in ambito florovivaistico, costituisce un ottimo integratore della torba. Il limitato contenuto in sali solubili, inoltre, garantisce una maggiore compatibilità di questo tipo di substrato con specie botaniche intolleranti per quel che riguarda la salinità. Appare infine idoneo per impieghi a diretto contatto con semi o radici. Di contro, per impieghi a carattere più estensivo, quali la fertilizzazione di fondo nella costituzione di orti, giardini o parchi, dove viene richiesto un cospicuo apporto concimante oltre ad una buona dotazione di sostanza organica, sono i compost da residui zootecnici, da scarti alimentari ovvero da fanghi di depurazione che meglio si prestano a questo tipo di applicazioni. Ciò in ragione sia del contenuto totale di nutrienti, sia per la specifica forma organicata in cui sono presenti gli elementi di fertilità, in particolare l'azoto, che conferisce al substrato le caratteristiche di un fertilizzante a cessione medio-lenta.

10.2.5.2 Il pH e la salinità

Il pH di un compost maturo (Tabella 10.6) oscilla mediamente tra i valori di neutralità e quelli dell'intervallo subalcalino o debolmente alcalino (7 – 8,5). Questi valori non limitano, in alcun modo, l'utilizzo del compost in ambiti agricoli estensivi in cui è richiesto soprattutto un buon contenuto in sostanza organica ed una stabilizzazione sufficiente.

Tabella 10.6 - Caratteristiche agronomiche relative a differenti fertilizzanti organici (valori medi).

Parametro	Letami	Pollina	Compost da scarti alimentari	Compost fanghi biologici	Compost da residui zootecnici	Compost da residui verdi	Terricci torbosi	Torbe
Umidità (% t.q.)	65-80	20-70	40-55	40-55	35-50	40-55	40-60	40-50
N (% s.s.)	2.2	4.3	1.79	1.78	3.01	1.07	/	0.86
P (come P ₂ O ₅) (% s.s.)	1.9	4.5	1.38	2.13	8.93	0.47	/	0.09
K (come K ₂ O) (% s.s.)	1.7	3.1	1.26	0.67	1.06	0.42	/	0.08
Carbonio org. (TOC) (% s.s.)	35	/	25	24	30	22	50	39.7
pH	8.3	8.9	8.15	7.21	8.01	7.81	5.9	5.6
Conducibilità (CES) (μS cm ⁻¹)	2560	6590	3730	2470	1890	980	1860	440
SV (% s.s.)	55	50	49.48	48.67	51.50	43.63	64.96	83.81
Mg (% come MgO)	/	/	1.53	1.23	1.07	1.08	/	0.16
Mn (mg kg ⁻¹ s.s.)	/	/	294.32	273.23	360.25	303.32	/	63.17
Fe (mg kg ⁻¹ s.s.)	/	/	13600	9490	3410	2690	/	1480
Densità apparente (g l ⁻¹)	/	/	400	350	/	350	250	150
Porosità totale (% vol/vol)	/	/	81.32	81.71	/	82.34	87.28	90.48
Acqua disponibile (% vol/vol)	/	/	15.84	11.97	/	13.81	18.66	23.04

n.b.: i compost da scarti alimentari e da fanghi biologici vengono prodotti a partire da miscele che contengono sempre una certa percentuale di materiali di supporto lignocellulosici, quali potature, cortecce, ecc.

Il valore del pH risulta poco influente anche nei casi d'impiego del compost negli interventi di ripristino ambientale (es. nel consolidamento di terreni dissestati o scoscesi e nelle operazioni di bonifica biologica) ovvero nella manutenzione del verde ornamentale (ove, un buon contenuto in sostanza organica humificata ed un basso tenore in umidità sono considerati requisiti primari).

D'altra parte, per quanto concerne l'impiego del compost nell'ambito florovivaistico, il pH può rivelarsi un fattore limitante. Le matrici compostate presentano, in effetti, valori di pH decisamente più elevati rispetto alle torbe ed ai terricci, i quali si caratterizzano invece per pH neutri o subacidi, normalmente richiesti dal settore. Per l'impiego del compost in florovivaismo risulta pertanto necessaria una correzione della reazione.

La salinità del compost (espressa in termini di Conducibilità Elettrica Specifica, CES), nel caso delle coltivazioni in contenitore, diventa fattore negativo se superiore a valori compresi tra 1500 e 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. I compost ottenuti da matrici prevalentemente lignocellulosiche rispettano generalmente ed ampiamente tali limiti. Di contro, i prodotti compostati a base di matrici organiche più ricche in elementi solubili di fertilità (es. compost da scarti alimentari o da residui zootecnici) presentano gradi di conducibilità più alti.

Sulla scorta dei valori riportati in *Tabella 10.6*, è possibile affermare quanto segue:

- Il compost da residui verdi presenta delle caratteristiche fisico-chimiche apprezzabili ed una limitata salinità rispetto al letame. Ciò corrisponde ad una maggior compatibilità tra la matrice organica e la pianta, rendendo l'impiego dell'ammendante meno problematico in buca di messa a dimora ed in tutte le pratiche agronomiche che prevedono un diretto contatto con la radice. Di contro, un compost da residui verdi, soprattutto se ottenuto da matrici ad elevata componente legnosa, presenta contenuti in elementi nutritivi (N, P, K) inferiori rispetto a quelli tipici dei letami. In ragione di ciò, essendo modesta la cessione di elementi nutritivi durante la mineralizzazione graduale della sostanza organica nel suolo, il terriccio compostato verde assume essenzialmente la caratteristica di integratore di sostanza organica humificata, in grado di migliorare le proprietà fisico-strutturali e biologiche del terreno agrario.
- Il compost da scarti alimentari, fanghi di depurazione e residui zootecnici è invece in grado di garantire, oltre all'apporto in sostanza organica humificata (azione ammendante), anche un apporto non trascurabile di macronutrienti e microelementi, con azoto, fosforo e potassio, in rapporto equilibrato tra loro. Degna di nota è la ricchezza in magnesio e ferro del compost da scarti alimentari e la dotazione elevata in fosforo del compost da residui zootecnici. Ciò garantisce elevate prestazioni derivanti dall'uso di questo materiale. In particolare, le attività specializzate consumatrici di cospicue quantità di sostanza organica, come l'orticoltura ovvero le colture da rinnovo ed i reimpianti in viticoltura e frutticoltura, si avvalgono fortemente del potere fitonutritivo di questi prodotti compostati.

Tali prodotti trovano nell'agricoltura "organica" o "biologica" un altro settore di applicazione specificatamente vocato. Le pratiche biologiche prevedono, di norma, il solo ricorso alla concimazione organica, la cui ricchezza fitonutritiva diventa dunque in tal caso fattore essenziale della gestione agro-ecologica dell'ordinamento colturale aziendale.

Altri settori, in grado di valorizzare molto bene il compost come fonte di sostanza organica e di elementi di fertilità, sono il giardinaggio e le operazioni di valorizzazione paesaggistica specie in aree di recente insediamento abitativo. Per contro, l'elevato contenuto in sali solubili, limita la possibilità di impiego massiccio del compost nell'ambito del florovivaismo in contenitore.

10.2.5.3 Le caratteristiche fisico-idrologiche

I parametri fisico-idrologici sono di fondamentale importanza per la messa a punto di substrati per la vivaistica in contenitore. In effetti uno dei principali requisiti ai quali deve rispondere un buon substrato colturale è costituito da un'elevata capacità di ritenzione idrica nonché da una

soddisfacente facilità di imbibizione e drenaggio. Non a caso i valori più elevati in termini di acqua disponibile (*Tabella 10.6*) sono attribuibili alle torbe che rappresentano i materiali, di gran lunga, più impiegati per la costituzione di terricci per la capacità di imbibire e trattenere l'acqua. I compost presentano una capacità di ritenzione idrica molto più bassa rispetto a quella delle torbe ed ai terricci in commercio. Tuttavia, le indagini analitiche e le prove d'impiego hanno più volte dimostrato la generale validità dei materiali compostati dal punto di vista delle caratteristiche fisico-idrologiche.

Poiché le colture in contenitore sono particolarmente esigenti per quanto riguarda la porosità del substrato e le dimensioni dei pori, la matrice posta nel contenitore deve garantire un'adeguata presenza di aria, di acqua e di spazio per la crescita delle radici, lungo tutto l'arco della coltivazione. Ciò può essere assicurato da materiali che presentino valori di porosità totale $\geq 85\%$ in volume ma, nel contempo, abbiano alta affinità per l'acqua. Il materiale maggiormente rispondente a tali requisiti è ancora la torba, la cui idoneità è evidenziata dai valori di porosità totale riportati in *Tabella 10.6*. I compost presentano invece livelli di porosità decisamente più bassi, ed anche questa carenza ne può limitare l'impiego.

Il tentativo di integrare le torbe con materiali di diversa origine, quali i compost, comporta, inevitabilmente, uno studio approfondito sulle miscele al fine di ottimizzare il comportamento del terriccio nei confronti dell'acqua.

10.3 Caratteristiche specifiche del compost per i diversi ambiti d'impiego

10.3.1 Impieghi in ambito agricolo

Tradizionalmente, l'impiego di ammendanti (letami ed altre matrici) in agricoltura è finalizzato all'apporto di sostanza organica nell'agro-ecosistema. Ciò allo scopo di garantire, attraverso la reintegrazione della componente humica gradualmente mineralizzata a livello del suolo, la conservazione della *fertilità fisica* (lavorabilità, porosità, areazione, drenaggio, ecc.), *chimica* (adeguato ambiente trofico per le piante) e *biologica* (varietà ed intensità dei processi biogeochimici) del terreno. Una caratteristica accessoria degli ammendanti, ma decisamente apprezzabile, è rappresentata dalla dotazione in elementi della fertilità chimica (soprattutto azoto, fosforo e potassio) che sono gradualmente resi disponibili per le colture attraverso la lenta degradazione della sostanza organica.

L'impiego estensivo tradizionale delle matrici organiche humificate (*agricoltura di pieno campo*) si configura come classico esempio di apporto della componente organica alla matrice suolo, proprio allo scopo di migliorarne le caratteristiche edafiche. Le matrici organiche tradizionalmente impiegate sono rappresentate dai letami, utilizzati, a diverso grado di "maturazione" a seconda delle esigenze specifiche e delle disponibilità, nel corso delle operazioni principali che precedono la semina. Da tempo l'agricoltura tradizionale ha iniziato a scontare la separazione tendenziale tra attività zootecniche e coltivazioni, sicché queste ultime si trovano spesso, e soprattutto in comprensori a forte specializzazione (es. viticola, frutticola, ecc.), in deficit di sostanza organica.

Proprio il settore dell'agricoltura tradizionale di pieno campo potrebbe garantire, nel contesto italiano, la naturale collocazione del compost, in virtù della dimensione della domanda (10.000.000 di ettari di superficie arabile), della limitata articolazione delle prestazioni aggiuntive necessarie e delle caratteristiche analitiche richieste ad un ammendante, cui il compost da matrici organiche differenziate alla fonte risponde perfettamente (PINAMONTI, 1997).

Ciò che viene richiesto al compost infatti si riassume essenzialmente in:

- un buon contenuto in sostanza organica;

- una *maturazione soddisfacente*, (anche se non sempre necessariamente completa, come ad esempio nel caso di concimazione organica intercalare in orticoltura o nella preparazione di fondo di un impianto frutticolo o arboreo);
- un *grado di raffinazione non elevatissimo* (vaghiature comprese tra 10 e 20 mm, assicurano una buona omogeneità).

Gli investimenti di compost potranno essere stabiliti in base al bilancio humico del suolo, tenendo conto della dotazione originale in sostanza organica, della tessitura, del tasso di mineralizzazione, ecc.. Nell'agricoltura italiana le dosi agronomiche più comuni si attestano, indicativamente, tra 10 e 15 t ha⁻¹ di s.s.

10.3.2 Impieghi in ambito florovivaistico

Il settore florovivaistico, in generale, e la costituzione di terricci per la vivaistica hobbistica e professionale, in particolare, rappresentano interessanti ambiti di collocamento e valorizzazione commerciale dei materiali compostati di qualità. Le dimensioni del mercato, l'odierna dipendenza da massicce importazioni di materiali dall'estero (il che fa lievitare i prezzi sul luogo di impiego e rende economicamente interessante la proposta concorrenziale di terricci alternativi), la remunerazione dei mezzi tecnici ivi impiegati costituiscono alcuni dei fattori che rendono attuale la prospettiva di impiego del compost in questo settore.

Nel 1997, il florovivaismo assorbiva una porzione cospicua del compost (50% del totale) presente sul mercato. Attualmente, i quantitativi di compost utilizzati per costituire terricci sono sempre elevati (ca. 150.000 m³) ma, con l'aumentare delle produzioni di compost e con lo sviluppo di mercati in altri settori, l'incidenza relativa è in effetti diminuita.

10.3.2.1 Terricci per il florovivaismo: dimensioni e fisionomia del mercato

Non esistendo dati ufficiali sui consumi complessivi di terricci in Italia, da alcune stime indirette si può desumere a livello nazionale una richiesta totale intorno a 4-4,5 milioni di m³ (CENTEMERO, 2001). Ciò corrisponde ad un consumo unitario (espresso per abitante e per anno) di ca. 70 litri di terriccio del tutto in sintonia con il quadro dei Paesi del Centro Europa (Tabella 10.7).

In Italia è diffuso sia l'impiego di terricci importati o confezionati da grandi aziende specializzate, per i quali la composizione è differenziata a seconda dei settori d'impiego, sia l'uso di substrati formulati in azienda.

Questi ultimi sono messi a punto dal vivaista in funzione delle esigenze della/e specie vegetale/i coltivata/e, delle disponibilità del materiale di base (essenzialmente torba bionda) e dell'esperienza acquisita.

La specializzazione dell'indirizzo produttivo e delle tecniche di produzione hanno contribuito alla definizione di substrati diversificati ed alla proposta di terricci mirati anche da parte dei circuiti commerciali tradizionali (es. consorzi agrari, vendite per rappresentanza, ecc.). Mediamente, le ditte produttrici di terricci per il vivaismo professionale commercializzano una decina di tipi di substrati diversi, raccomandati per ambito d'impiego, ai quali vanno aggiunti i terricci universali per il consumo amatoriale (hobbistica).

Tabella 10.7 - Consumi unitari di terricci torbosi in Italia, Germania e Regno Unito.

Nazione	Consumo unitario (l/ab/anno)
Germania	83,4
Regno Unito	78,9
Italia	69,9
Media	77,4

La torba, in particolare quella bionda, rappresenta generalmente il costituente di base dei terricci per la coltivazione in contenitore.

Caratteristiche commerciali del compost che possono contribuire ad aumentare la richiesta di questa matrice nel settore florovivaistico sono:

- facile reperibilità
- bassi costi
- pezzatura definita
- caratteristiche fisiche definite

In realtà, il compost già rappresenta uno degli ingredienti impiegati nella formulazione di terricci per il florovivaismo, all'interno dei quali rappresenta una percentuale variabile, in media, dal 20 al 30% (HEIDI & STOPPLER-ZIMMER, 1999), con punte fino al 70% per i terricci compostati idrologicamente migliori (CORTI *et al.*, 1998).

Le caratteristiche tecniche che differenziano i materiali compostati dai terricci torbosi e, in particolare, dalle torbe di sfagno, risultano essere di norma:

- più elevato pH;
- più alta salinità;
- quantità di acqua disponibile inferiore rispetto ai terricci torbosi;
- maggiore densità apparente;
- capacità di scambio cationico (CSC) più elevata.

Miscelando opportunamente il compost con altri substrati è comunque possibile ottenere terricci dotati di proprietà fisiche ed idrologiche compatibili per una vasta gamma di impieghi.

10.3.2.2 Quanto compost è possibile aggiungere ai terricciati?

Il quantitativo di compost ammissibile nei terricci per il florovivaismo dipende da alcuni fattori:

- la specie vegetale coltivata (arborea, arbustiva, ecc.);
- la fase fenologica della pianta al momento del trattamento (semina, ripicchettamento, ecc.);
- la durata del ciclo colturale;
- le dimensioni del contenitore;
- le caratteristiche fisico-chimiche del compost;
- le caratteristiche fisico-chimiche degli altri ingredienti (torba, pomice, perlite, ecc.);
- la tecnica colturale adottata.

In *Tabella 10.8* sono elencate alcune specie botaniche con le quali sono stati saggiati terricci ottenuti miscelando compost ad altri substrati, in percentuali di miscela diverse, tali da garantire risultati comparabili con la coltivazione delle stesse piante su matrice torbosa.

Come è possibile notare, le quote di compost sono molto variabili e, ad eccezione di piante acidofile come l'azalea, per le floricole annuali, l'aliquota media di compost risulta compresa tra il 30 e il 50% sul volume totale del terriccio.

In alcuni casi (es. trapianto di essenze forestali o di piante perenni) l'aliquota di compost che ha dato i migliori risultati è stata addirittura del 70%.

Tabella 10.8 - Individuazione delle quote di compost (% volume) che in formulazione con altri substrati hanno consentito, a parità di specie vegetale trattata, risultati comparabili con un terriccio torboso adottato come testimone.

Specie da vaso	Compost (% in volume)
Lauroceraso	30
Olivo cv Frantoio e leccino	25
Pesco cv. Armking	25
Peperone, Melanzana	25
Pomodoro, Lattuga, Cavolo	25-50
Cetriolo, Anguria	25
Geranio, <i>Impatiens</i> , Fuchsia, Verbena	25-50
Petunia, <i>Lilium</i> spp.	25
Carpino, Frassino, Acero, Viburno	50
<i>Ficus elastica</i> , <i>Philodendron</i> "Emerald red", <i>Spathiphyllum</i> "Mauna loa"	50
Pomodoro, Cetriolo	30
<i>Arabis caucasica</i> , <i>Armeria hybrida</i> , <i>Dianthus deltoides</i> , <i>Myosotis palustris</i>	50-70
<i>Nicotiana sanderae</i> , Dalia	30
Viburno, Evonimo, Biancospino	50-70
Ligustro, Gelso	70
Azalea	20
Begonia, Geranio	30

10.3.2.3 Il problema della maturità

La verifica del grado di maturazione di un compost (assenza di fitotossicità residua, spesso associata alle trasformazioni biochimiche ancora in atto nei prodotti stabilizzati "giovani") costituisce un elemento chiave per la definizione della qualità del substrato.

La mancanza di un'adeguata maturità appare essere il fattore maggiormente condizionante l'applicazione specialistica di compost nel settore della costituzione dei terricci per il florovivaismo.

Per valorizzare appieno le caratteristiche tecniche offerte dai materiali compo-

stati, risulta pertanto di primaria importanza che sia garantito, innanzi tutto, un buon controllo del processo di stabilizzazione e maturazione (cfr. Cap. 2) delle matrici di partenza. Ciò evita l'instaurarsi di reazioni anaerobiche le quali sono responsabili dell'accumulo nel prodotto finale di metaboliti ridotti, tossici per le piante (es. acidi grassi, H₂S, ecc.). Alla gestione ottimale dei parametri di processo, deve inoltre affiancarsi il monitoraggio della qualità del compost ottenuto, mediante l'adozione di test routinari per la rilevazione della stabilità/maturità del substrato stabilizzato.

10.4 Impieghi in ambito paesaggistico e di gestione del territorio

Altro settore di grande interesse per l'uso del compost è rappresentato dalle attività finalizzate alla costruzione e manutenzione del verde ornamentale, con particolare riferimento agli interventi su vasta scala urbana e territoriale.

L'ambito paesaggistico, data la molteplicità degli interventi, può richiedere materiali compostati di differente qualità agronomica. Si passa infatti dall'arricchimento in sostanza organica delle terre da coltivo impoverite, alla costituzione di letti di semina per tappeti erbosi, al ricarico di sostanza organica per i manti già inerbiti, alla piantumazione di essenze arboree. Tutto questo presuppone la disponibilità di compost con caratteristiche specifiche di stabilità, maturità, pezzatura e contenuto in elementi nutritivi, in funzione dell'impiego.

L'uso di compost nel settore della paesaggistica si deve intendere soprattutto come strumento

di fertilizzazione organica. Infatti, nella costruzione del verde, ai substrati organici è richiesta essenzialmente una funzione ammendante per costruire la fertilità in terreni vergini e nelle terre da coltivo di riporto. Un buon contenuto in sostanza organica, un basso tenore in umidità e una pezzatura adeguata, sono i requisiti dei compost destinati a questo impiego.

Per l'uso del compost a contatto diretto con semi o radici, come normalmente avviene nella costituzione dei letti di semina per tappeti erbosi ovvero nelle operazioni di messa a dimora di piante arboree a radice nuda, in apposita buca d'impianto, viene richiesto un materiale sottoposto ad una maturazione prolungata. Altro requisito inderogabile per il compost è, anche in questo caso, una bassa salinità.

Per gli impieghi a carattere "estensivo" (es. nelle concimazioni di fondo), non è invece richiesta al compost una maturazione spinta, trattandosi di interventi di apporto di sostanza organica simili alla "letamazione". In queste applicazioni, assume invece importanza fondamentale il contenuto in elementi di fertilità ed il loro reciproco rapporto (es. C/N). È, in tali circostanze, preferibile il ricorso alle prestazioni agronomiche di compost da scarti organici di mensa, assimilabili, per tenore fitonutritivo e grado di organicazione dell'azoto, ad un buon concime organico ad effetto medio-lento. Al contrario, nei ricarichi su terre vergini, riportate o

sterili, poiché la funzione ammendante per lo stimolo della fertilità biologica richiede investimenti molto elevati di compost, si preferiscono matrici humificate più povere in elementi nutritivi, per evitare eccessivi carichi del suolo.

Nella *Tabella 10.9* è riportato il quadro degli interventi che prevedono l'impiego di compost nei vari ambiti paesaggistici e di gestione del territorio.

Tabella 10.9 - Possibili destinazioni del compost in attività di tipo paesaggistico e di gestione del territorio.

Ambito d'impiego	Contesto d'intervento
Attività legate alla progettazione e gestione del verde urbano pubblico e privato	Parchi cittadini Giardini privati Verde territoriale Verde sportivo
Recupero di aree degradate e contaminate	Discariche Aree oggetto di bonifica biologica
Recupero di aree degradate non contaminate	Cave dismesse Scarpate stradali Scarpate ferroviarie
Ripristino di aree degradate non contaminate	Piste da sci Strade forestali Fronti di frane

10.4.1 Ruolo del compost nel risanamento di siti degradati

La particolare ricchezza in microorganismi, dotati di elevata attività metabolica di tipo degradativo nei confronti di una pletera di composti organici tossici (es. idrocarburi policiclici aromatici, solventi clorurati, pesticidi, ecc.), rende il compost idoneo per alcuni impieghi non convenzionali, legati alle operazioni di disinquinamento e bonifica ambientale (*bioremediation*).

Ai fini di valutare l'efficacia del compost in simili applicazioni, sono state da tempo intraprese numerose prove, sia in scala pilota che in scala reale (USEPA, 2000)

L'apporto di compost, in particolare se ad elevato grado di maturazione, a suoli contaminati, accelera, in effetti, la degradazione di contaminanti organici, contribuendo al ripristino della qualità originale di molti terreni, in tempi relativamente brevi (VALLINI, 1997).

La funzione del compost nel determinare un positivo effetto sulle condizioni generali del suolo e di agire su alcune proprietà specifiche è da ricercarsi nella ricchezza della popolazione micro-

Tabella 10.10 - Descrizione delle operazioni che sfruttano la reattività microbologica del compost.

Operazione	Descrizione
Bonifica di suoli contaminati da sostanze organiche tossiche	Apporto di compost al terreno, per accelerare la degradazione progressiva dei composti xenobiotici quali: solventi organici, idrocarburi derivati dal petrolio, fitofarmaci, esplosivi, ecc.
Trattamento di flussi aeriformi	Impiego del compost in miscela con altri materiali per la costituzione di un letto filtrante (biofiltro) capace di abbattere sostanze odorigene e contaminanti organici bassobollenti in flussi gassosi (cfr. Cap. 6).
Bonifica di cave e miniere	Impiego di compost per la ricostituzione di uno strato humico sui detriti di cave e miniere a cielo aperto, al fine di favorire il ripristino delle condizioni di fertilità biologica e, quindi, la formazione di una copertura vegetale pioniera.

bica che, vivendo a carico della sostanza organica, trova nel compost un substrato idoneo alla crescita e allo sviluppo, contribuendo così alla degradazione microbica delle sostanze tossiche. Ad integrazione di questa breve nota sull'impiego del compost in operazioni di ripristino e decontaminazione ambientale, si riporta in *Tabella 10.10*, un quadro sinottico delle specifiche situazioni possibili.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

ADANI F., GENEVINI P.L., GASPERI F., TAMBONE F. (1999). Composting and humification. *Compost Science & Utilization*, 7(1):24-33.

ADANI F., GENEVINI P.L., TAMBONE F. (1995). A new index of organic matter stability. *Compost Science & Utilization*, 3:25-37.

CENTEMERO M. (2001). Il compost nei terricci per il florovivaismo. *Fertilizzanti*, 3(1):24-29.

CENTEMERO M. & CORTI C. (2000). Caratteristiche tecniche del compost per l'agricoltura sostenibile. *L'Informatore Agrario*, 6:31-42.

CORTI C., CRIPPA L., GENEVINI P.L., CENTEMERO M. (1998). Compost use in plant nursery: Hydrological and physico-chemical characteristics. *Compost Science & Utilization*, 6(1).

HEIDI H. & STOPPLER-ZIMMER H. (1999). Compost based products: History, recent activities, chances. In: *Organic Recovery & Biological Treatment*, vol. 2, pp. 363-369, Proc. ORBIT '99 Conference, Weimar, 2-4 September 1999.

LASARIDI K. & STENTIFORD E.I. (1999). Compost stability: A comparative evaluation of respirometric techniques. In: *Organic Recovery & Biological Treatment*, vol. 2, Proc. ORBIT '99 Conference, Weimar, 2-4 September 1999.

PINAMONTI F. (1998). L'impiego del compost sui terreni agricoli. *L'Informatore Agrario*, 44 (supplemento):45-48.

USEPA (1998). An analysis of composting as an environmental remediation technology. Composting. EPA Document n. 530-R-98-008.

VALLINI G. (1997). Microbiology of solid-phase treatments in soil bioremediation: The composting option. ICS-UNIDO Report, *Training Course in Soil Environmental Assessment and Biodegradation Technologies*, Budapest, 2-14 June 1997.

ZDRULI P., JONES R., MONTANARELLA L. (2000). Organic matter in the soils of Southern Europe. *European Soil Bureau*, Expert Report, JRC Ispra, Italy.

11. Il mercato del compost: situazione attuale, prospettive ed elementi per la promozione tecnica e commerciale

11.1 Lo scenario europeo

La produzione di compost a livello europeo ha subito negli ultimi anni un costante incremento. Ciò è riconducibile all'estendersi della separazione dello scarto organico, come priorità operativa, nei sistemi integrati di gestione dei rifiuti. Il caso più emblematico è costituito dalla Germania che, estendendo la separazione alla fonte del "rifiuto biologico" a partire dalla metà degli anni '80, rappresenta il Paese che conta il maggior numero di impianti di compostaggio, una situazione di mercato consolidata e una certificazione del compost che sta spingendo gli operatori ad adeguarsi ai criteri di qualità imposti al processo e al prodotto.

Tabella 11.1 - Percentuale di superficie agricola arabile (SAA) potenzialmente interessata all'applicazione di compost nei paesi dell'Unione Europea (EU).

Paese	Abitanti 1995 (x1.000)	Superficie agricola arabile (SAA) (10 ³ ha)	Produzione potenziale di compost da residui verdi da scarto "umido" (10 ³ t)		SAA potenzialmente interessata all'applicazione di compost (10 ³ ha) (%)	
			s.f.	s.s.	(10 ³ ha)	(%)
Austria	8040	1500	321	161	16.1	1.07
Belgio	10131	700	405	203	20.3	2.90
Danimarca	5216	2500	208	104	10.3	0.41
Finlandia	5099	2500	204	102	10.2	0.41
Francia	58027	18000	2321	1160	116.1	0.65
Germania	81553	12000	3262	1631	163.1	1.36
Grecia	10063	3000	402	201	20.1	0.67
Italia	57248	10000	2290	1144	114.5	1.15
Irlanda	3577	1000	143	72	7.1	0.71
Lussemburgo	407	60	16	8	0.8	1.35
Paesi Bassi	15423	900	616	308	30.8	3.43
Portogallo	9912	3000	396	198	19.8	0.66
Spagna	39170	16000	1566	783	78.3	0.49
Regno Unito	58276	7000	2331	1165	116.5	1.66
Svezia	8816	3000	352	176	17.6	0.58
EU	370958	81200	14833	7416	741.6	0.91

In *Tabella 11.1* sono riportati i dati europei, suddivisi per Nazione, relativi alla produzione di compost di qualità. I dati riguardano soltanto il compost da scarti alimentari e residui verdi del giardinaggio e della manutenzione dei parchi pubblici. A questo quadro, sono da aggiungere i quantitativi di compost derivato dal trattamento dei fanghi di depurazione in miscela con altre matrici di supporto (es. scarti lignocellulosici, scarti agroindustriali, ecc.). È interessante notare (cfr. *Figura 11.1*), come è stato sopra accennato, che dei ca. 6 milioni di tonnellate totali di compost commercializzato in Europa, più del 40% proviene dalla Germania, la quale, con Olanda ed Austria, produce il 70% del compost dell'UE (Unione Europea).

11.2 Potenzialità di collocazione del compost

La tendenza attuale ad incrementare il numero di impianti di compostaggio e, quindi, la pos-

sibile disponibilità di compost, pone l'interrogativo se ci sia spazio per collocare tutto il compost potenzialmente ottenibile.

Tentiamo di rispondere al quesito seguendo il seguente criterio di computo.

Supponiamo di:

- impiegare il compost prodotto dal trattamento di biomasse derivanti dalla raccolta differenziata - limitatamente ai residui della manutenzione del verde e allo scarto di origine alimentare - estesa all'intera popolazione dei paesi dell'UE (ca. 370 milioni di abitanti);
- intercettare quote di scarti organici pari a 100 kg/ab/anno;
- ottenere rese del compostaggio pari al 40%;
- collocare tutto il compost in "pieno campo" ovvero sulla superficie agricola arabile;
- distribuire 10 t/ha di sostanza secca da compost (ovvero ca. 20-25 t di compost tal quale).

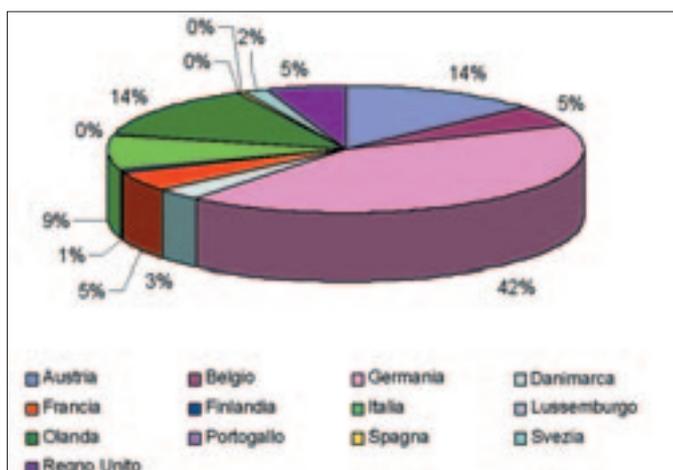


Figura 11.1 - Produzione di compost nell'UE e contributo relativo degli Stati membri.

Con tali dosi di applicazione (dosi agronomiche mediamente valide per l'intero territorio europeo) potrebbero essere interessati ca. 750.000 ha coltivati degli 81 milioni di ha di superficie arabile europea. In questo modo si andrebbe a "coprire" una superficie pari all'1% della superficie coltivata e tradizionalmente fertilizzata (Tabella 11.1). Se scorporiamo tale dato nei diversi Stati europei, ci accorgiamo che la percentuale non varia molto ed oscilla dal 3,4% dei Paesi Bassi a 0,49% della Spagna.

Pur con le cautele suggerite

dalla semplificazione del metodo di calcolo, si può dunque esprimere una valutazione positiva circa gli sbocchi potenziali per il compost, già riferendosi alla sola agricoltura di pieno campo. È possibile comunque fin da ora affermare che esistono altri settori di sbocco per il compost, quali il florovivaismo ed il giardinaggio.

11.3 Il compost di qualità in Italia: impieghi e destinazioni commerciali

La produzione annuale di compost in Italia (stime riferite agli anni 1999 e 2000) si attesta tra le 500- e le 600.000 t/anno. Il dato è ricavato dall'ammontare complessivo di scarti organici trattati negli impianti di compostaggio attivi sul territorio nazionale. Tali quantitativi sono interamente collocati sul mercato dei fertilizzanti, in modo diversificato.

Passiamo quindi ad analizzare alcuni settori di collocazione del prodotto e gli aspetti salienti che caratterizzano la commercializzazione.

- *Il settore del florovivaismo.* Si tratta, in questo caso, della cessione di compost sfuso all'industria dei fertilizzanti che confeziona il prodotto, previa miscelazione con torbe o altri sub-

strati, vendendolo all'utenza hobbistica presso la grande distribuzione ed i centri specializzati per il giardinaggio. Questo settore è da sempre considerato lo sbocco più appetibile sia per i prezzi spuntati dai prodotti offerti sia perché grande è l'interesse per i materiali nazionali alternativi alle torbe.

- *La vendita al minuto presso l'impianto.* Interessa quantitativi di compost non rilevanti. Il prodotto viene consegnato sfuso all'hobbista o al giardiniere che trova comodo approvvigionarsi di ammendante in vicinanza dei siti d'impiego.
- Uno sbocco commerciale che sta assumendo un'importanza sempre crescente (nel 1997, la quota di mercato era del 20%, mentre nel 2000 si è attestata sul 33%) è rappresentato dal *conferimento di compost presso aziende agricole* per l'utilizzo come ammendante al fine di ripristinare la fertilità ordinaria delle colture di pieno campo (CENTEMERO, 1997).

11.4 Recettività potenziale del mercato e collocazione attuale del compost

Anche per l'Italia, la possibilità di impiegare compost in pieno campo su una porzione della superficie arabile disponibile riguarda una quota di territorio in linea con quanto verificato negli altri Paesi europei.

La superficie potenzialmente interessata rappresenta l'1,15 % della superficie arabile nazionale. Se si considerano altri risvolti agronomici quali le dosi di impiego normalmente in uso per quel che riguarda gli ammendanti organici, il bilancio annuale della sostanza organica nei terreni italiani ed il carico massimo ammissibile di compost sul suolo, le quantità di compost ipotizzate come assorbibili in questo ambito subiscono un lieve incremento rispetto ai calcoli precedentemente fatti. In effetti, da una stima della potenzialità di impiego del compost nei diversi settori dell'agricoltura italiana (Figura 11.2), su dati relativi al 1998, si desume come l'ambito con le maggiori possibilità di sviluppo sia rappresentato dall'agricoltura di pieno campo (orticoltura, foraggicoltura, frutticoltura, ecc.), dove l'impiego di compost "copre" solo il 6,2% delle potenzialità effettive, mentre per il florovivaismo hobbistico la quota di mercato "coperta" è già sensibile (45% delle potenzialità).

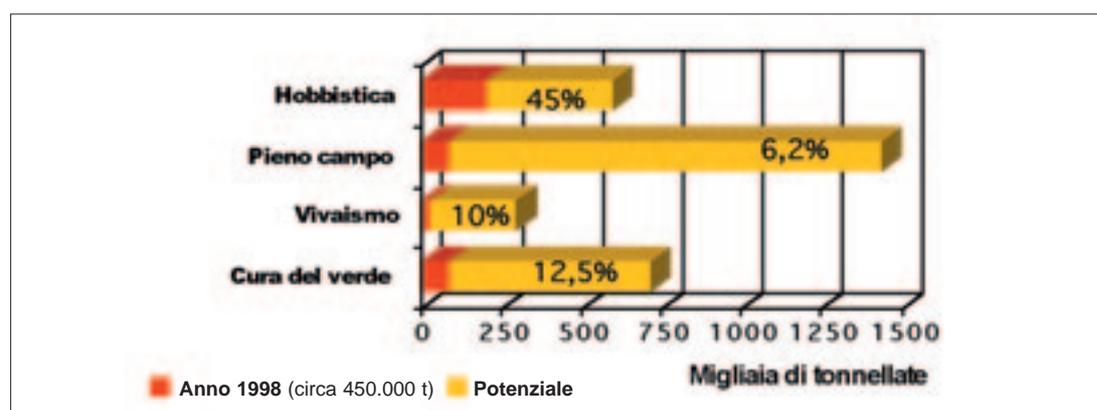


Figura 11.2 - Relazione tra i quantitativi di compost potenzialmente collocabili nei diversi comparti agricoli ed i quantitativi effettivamente collocati (da Centemero & Perelli, 1999).

11.4.1 L'agricoltura di pieno campo

La potenziale recettività dell'agricoltura tradizionale di pieno campo nei confronti del compost non costituisce di per sé una garanzia di collocazione certa ed immediata del prodotto. Le ragioni di questo possono essere ricercate tra i seguenti punti:

- La collocazione del compost presso le aziende agricole a prezzi meno remunerativi rispetto a quelli spuntati in altri settori.
- Il “prodotto compost” è relativamente nuovo nel panorama dei fertilizzanti. Non è abbastanza conosciuto dalle aziende agricole e l’agricoltore (ma anche il tecnico agrario) non possiede sufficienti informazioni sul grado di sostituibilità del compost rispetto ai fertilizzanti tradizionali.
- Non sempre l’agricoltore ha la garanzia della qualità del prodotto.
- L’azienda che produce compost (il compostatore) non sempre è in grado di gestire dal punto di vista tecnico e commerciale il prodotto destinato all’azienda agricola. Ciò in ragione del fatto che chi trasforma i rifiuti organici è spesso un’azienda specializzata nel ritiro e nel trattamento, senza competenze di tipo agronomico.

Come è possibile notare, esiste, in primo luogo, un problema di informazione capillare presso i soggetti attivi della filiera del compostaggio. In buona sostanza, gli utilizzatori del compost possono valorizzare un materiale organico alternativo solo dopo averlo conosciuto ed averne apprezzato le caratteristiche. A questo proposito, si stanno sviluppando in Italia prove dimostrative riguardanti l’applicazione del compost, le quali hanno il preciso scopo di studiare l’introduzione di questo ammendante organico nell’azienda agricola. Queste iniziative sono finalizzate alla valutazione sia degli effetti colturali che delle problematiche operative accessorie (es. trasporto, stoccaggio, valutazione del grado di maturazione e di raffinazione, meccanizzazione dello spandimento, ecc.).

Approfondimenti di questo tipo sono essenziali in quanto il compost rappresenta, tra i fertilizzanti organici, un prodotto di introduzione relativamente recente, il quale deve per altro scontare gravissimi errori d’impiego commessi in anni non lontani, senz’altro anche a causa di una qualità allora scadente del prodotto.

11.4.2 Altri segmenti di mercato

Le possibilità di applicazione del compost ottenuto da residui verdi e scarti alimentari sono estremamente variegata. Anche la dimensione dell’azienda produttrice influisce sulla estensione di impiego del compost. In questo senso, esistono impianti a scala industriale che possono contare su mercato professionale, grazie anche ad una eventuale diversificazione del prodotto, ed impianti rurali che approvvigionano un’utenza prevalentemente locale (autoconsumo).

In Austria, ad esempio, ca. 350 agricoltori hanno intrapreso l’attività di compostaggio: il compost prodotto è impiegato presso le loro aziende agricole in accordo con le autorità locali.

Nelle Fiandre, invece, dato l’alto numero di allevamenti e, di conseguenza, la notevole disponibilità di deiezioni zootecniche, normalmente destinate all’agricoltura di pieno campo, i settori d’impiego privilegiati per il compost sono soprattutto in ambito paesaggistico, del giardinaggio e delle attività hobbistiche.

Un altro fattore che può determinare la nicchia di mercato del compost è rappresentato dalla percezione con la quale questo materiale viene, di volta in volta, sentito dai potenziali utilizzatori; vale a dire, come semplice ammendante (*soil improver*) ovvero come terriccio per il florovivaismo (*growing medium*).

In Italia e in altri paesi del Sud Europa, la ricerca di materiali alternativi alla torba d’importazione ha determinato, negli ultimi anni, una richiesta crescente di compost per la costituzione di terricci per il florovivaismo. Inoltre, sempre nei Paesi del bacino del Mediterraneo, la carenza di sostanza organica, unita allo sfruttamento a scopi produttivi dei suoli, implica la necessità di reperire sempre più cospicue quantità di materiali organici alternativi al letame,

ormai insufficiente, per il reintegro della dotazione in humus dei terreni. Tra questi materiali, il compost può certamente giocare un ruolo primario.

Come è possibile vedere in Figura 11.3, le quote di compost commercializzate nei diversi Paesi europei hanno destinazioni diversificate:

- in Danimarca e Belgio la quota di compost destinata al pieno campo è molto bassa (12-13%);
- in tutti i Paesi la quota impiegata per ripristini ambientali è relativamente modesta (max 13% in Danimarca);
- in Belgio, Italia e Danimarca si assiste ad un'cospicua utilizzazione di compost nel settore del florovivaismo hobbistico; ciò a fronte della sostituzione dei terricci torbosi d'importazione;
- in Austria, Germania e nei Paesi Bassi si registrano invece le più importanti applicazioni di pieno campo;

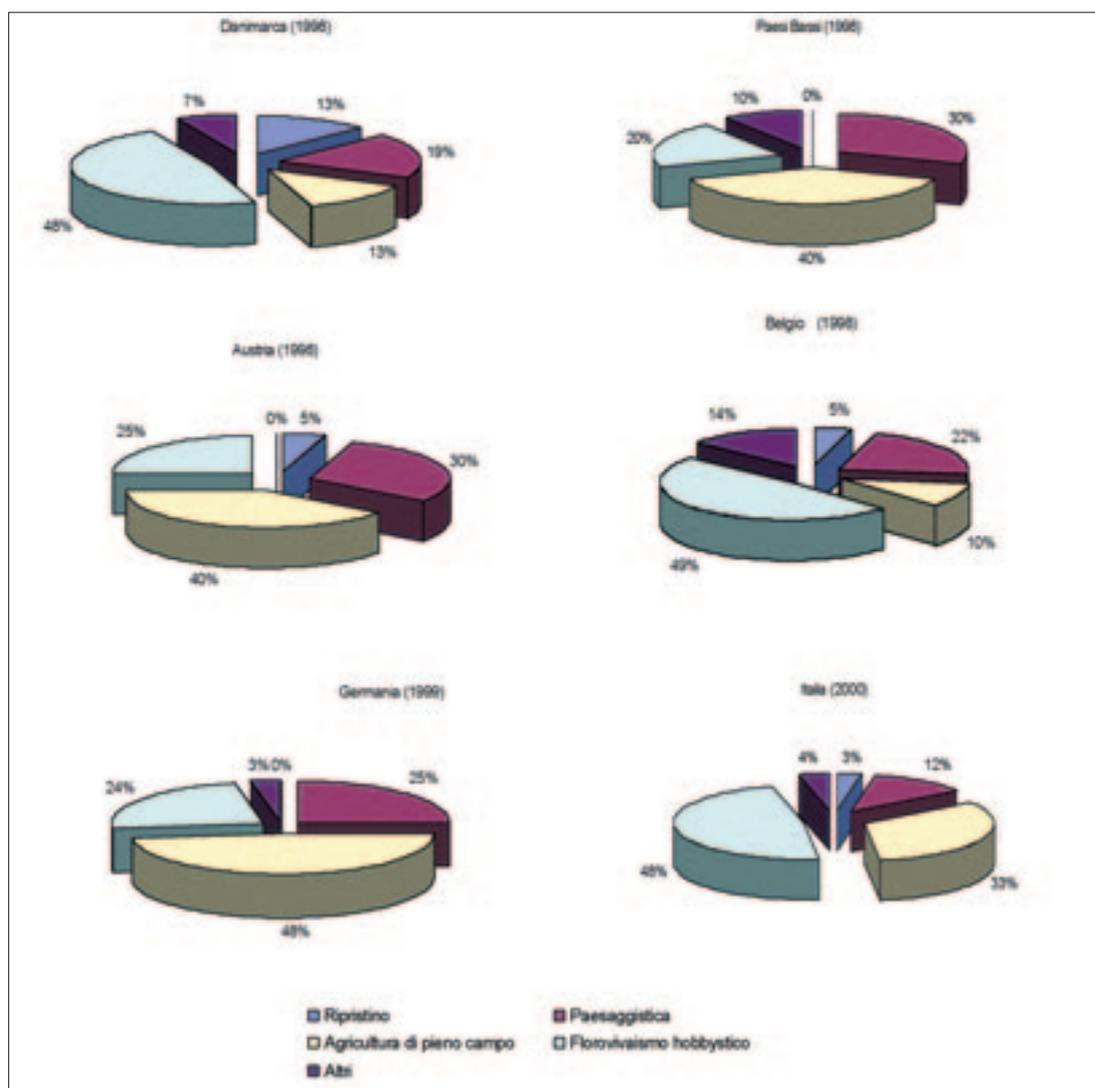


Figura 11.3 - Quote di mercato del compost in alcuni Paesi europei.

- in tutti i Paesi gli impieghi del compost ad uso paesaggistico coinvolgono quantità non trascurabili (dal 12% dell'Italia al 30% di Paesi bassi e Austria).

11.5 Le tendenze in atto

Sulla scorta delle considerazioni sopra riportate, è possibile affermare che, allo stato delle cose, molte stazioni di compostaggio, ai fini di collocare più facilmente il prodotto, stanno guardando con sempre maggiore interesse alla diversificazione dell'offerta. Questo significa la proposta di materiali con caratteristiche diverse, mirate per i differenti ambiti d'impiego. È ormai noto, ad esempio, come la produzione di compost fresco (*frishkompost*) in Germania e nei Paesi Bassi sia una opzione interessante per l'impiego di questo materiale nell'agricoltura estensiva di pieno campo. Tale tecnica produttiva prevede l'impiego di compost stabilizzato, ma con un basso grado di maturazione, in grandi quantità, fornite agli agricoltori senza particolari investimenti sulla promozione commerciale, anche se con minori ritorni economici derivanti dalla vendita del prodotto.

Tabella 11.2 - Settori d'impiego: limiti, condizioni e prezzi rilevati sul mercato.

Settore	Aspetti di mercato favorevoli	Limitazioni allo sviluppo del mercato	Prezzi (*) spuntati (Lit./t) e Potenziali acquirenti
Recupero ambientale	- tolleranza a caratteristiche subottimali - impiego di grandi quantità	- date le dosi impiegate, possibile eccessivo rilascio di nutrienti (es. azoto) nel terreno - limitata remunerazione	0-5.000 Tecnici paesaggisti
Agricoltura di pieno campo	- impiego di rilevanti quantità - impiego di "compost fresco" - impiego nei concimi organo minerali - creazione di servizi di distribuzione in p.c.	- limitata conoscenza del compost - basso prezzo dei materiali surrogabili (es. letame) - necessità di attrezzature per la distribuzione - contenuto in elementi nutritivi relativamente basso - sviluppo di servizi di distribuzione	5.000-20.000 Agricoltori
Paesaggistica	- alto valore aggiunto - vicinanza operativa tra paesaggista e impianto - possibilità di modulare la qualità per differenti usi	- necessità di attrezzature specifiche per la distribuzione	20.000-40.000 Tecnici paesaggisti
Florovivaismo hobbystico e professionale	- alto valore aggiunto - necessità di surrogati innovativi delle torbe - vendita al dettaglio - possibilità di differenti impieghi	- necessità di partite omogenee ed uniformi nel tempo - necessità di compost con bassa salinità e elevata stabilità - richiesta di proprietà specifiche	20.000-40.000 Produttori di terricci Garden Centers Vivai 60.000-80.000 Privati (**)

(*) il prezzo è riferito al compost vagliato e sfuso (non confezionato)

(**) ai privati cittadini, il compost è venduto al dettaglio, preferibilmente confezionato e miscelato con altre componenti

L'evoluzione delle conoscenze sul prodotto e le risposte degli utilizzatori sembrano confermare la necessità di diversificare sempre più il fronte di collocazione del compost sul mercato. Mentre il compost da residui verdi è universalmente accettato come condizionante del suolo e come valido ingrediente dei terricci per il florovivaismo hobbistico, d'altra parte, il compost da scarti alimentari ha grandi potenzialità su due linee di sviluppo principali:

- da un lato esistono produttori di compost da scarti alimentari che, al fine di minimizzare i costi di trattamento e gli impegni per la promozione commerciale, optano per la produzione di compost fresco, di basso prezzo, per destinazioni estensive;
- dall'altra, alcune aziende produttrici di compost da scarti alimentari avviano invece programmi di valorizzazione agronomica di questo materiale, intervenendo sia nella fase di produzione (sul processo) che in quella di promozione, al fine di proporre un prodotto di qualità, appetibile per i diversi settori agricoli.

Questi scenari si ritrovano un po' in tutti i Paesi europei, compresa l'Italia, dove il compost sempre più assume lo status di mezzo tecnico per l'agricoltura, a fronte di quantitativi prodotti in rapida crescita.

11.6 I prezzi di vendita

Per meglio comprendere le condizioni tecniche e commerciali per la collocazione del compost nei diversi settori di mercato, è necessario analizzare i segmenti attualmente coperti da materiali che i substrati compostati possono surrogare (es. letami, terricci, ecc.) e/o integrare (es. torbe, concimi organo-minerali).

Le considerazioni agronomiche alla base dell'impiego del letame in pieno campo possono essere direttamente applicate al compost da biomasse selezionate.

La recettività di questo settore nei confronti del compost è certamente funzione della concorrenziale disponibilità e reperibilità di deiezioni presso gli allevamenti zootecnici (letami e liquami). Il prezzo, in questo caso, è determinato dal valore di surrogazione del letame (5-20.000 Lit/t) o dei fertilizzanti organici tradizionalmente impiegati.

Per ogni contesto pedo-agronomico, è necessario tuttavia verificare le situazioni al contorno che possono determinare le condizioni tecnico-economiche per il ricorso al compost in pieno campo. In particolare, si dovrà tenere di conto delle caratteristiche dei materiali tradizionalmente impiegati, della sostituibilità tecnica con il compost dei materiali in uso, la logistica legata al trasporto intra-aziendale, la cantieristica legata alla distribuzione del compost.

Il compost, tuttavia, può spuntare prezzi diversificati in relazione al settore d'impiego. Mentre per il compost destinato al florovivaismo si raggiungono prezzi di 15.000-25.000 Lit/m³ (20-40.000 Lit/t), nel caso della destinazione agricola di pieno campo, i prezzi variano indicativamente da 10.000 a 15.000 Lit/t (*Tabella 11.2*).

11.7 Elementi per il consolidamento del mercato

11.7.1 Importanza del controllo della filiera di compostaggio

Diverse indagini di mercato condotte a livello europeo tra i produttori e gli utilizzatori di compost hanno permesso di mettere a fuoco alcune esigenze:

- la qualità ed il mercato del compost sono tra loro strettamente legate;
- per il recupero dei rifiuti organici sono necessarie regole che individuino il tipo di materiali realmente utilizzabili;
- l'origine e la qualità delle matrici compostabili nonché il processo di trasformazione devono essere rigorosamente controllati;
- sono auspicabili programmi seri di certificazione della qualità del compost, i quali, peraltro, contribuirebbero ad incrementare il recupero degli scarti organici.

Le analisi di mercato degli ultimi anni, condotte in diversi Paesi europei hanno mostrato che tutti gli utilizzatori di compost richiedono un prodotto di qualità standardizzato e supervisionato da organizzazioni esterne agli impianti di compostaggio.

L'assicurazione della qualità del "sistema compost" (impianti, processi e prodotti) ha un valore di gran lunga superiore rispetto alla presenza di leggi più o meno restrittive (es. indicazione dei limiti sul contenuto in metalli pesanti). La presenza di un controllo della qualità del "sistema compost" garantisce infatti la presenza di verifiche in tutti gli stadi del trattamento dei rifiuti organici, dalla raccolta differenziata alla vendita del compost.

11.7.2 Il Sistema di Assicurazione della Qualità (SAQ)

Lo sviluppo di strategie di valorizzazione del compost sta avendo un discreto successo nei paesi del Centro Europa laddove si sono sviluppati Sistemi di Assicurazione della Qualità (SAQ). Questi ultimi sono basati su criteri di controllo (interno ed esterno all'impianto di compostaggio), in grado di garantire il fornitore di scarti compostabili sull'effettiva trasformazione e l'utilizzatore finale sul tipo di trattamento effettuato per la produzione del compost (CENTEMERO et al., 1999).

Il ruolo centrale che riveste il sistema di controllo per la garanzia della qualità è evidente in quei Paesi dove il compostaggio è molto sviluppato, quali Austria, Germania, Danimarca, Paesi Bassi e Belgio (Tabella 11.3).

I suddetti Paesi hanno promosso su vasta scala la gestione della qualità presso gli impianti di compostaggio. Molti altri come la Svezia, la Norvegia, la Gran Bretagna e la Francia sono invece ancora nella fase di attivazione delle iniziative legate alla gestione della qualità (marchi, leggi, ecc.).

Anche in Italia, di recente, il Consorzio Italiano Compostatori (CIC) ha iniziato un percorso che dovrebbe portare, nel medio-lungo periodo, alla istituzione di un SAQ.

Diversi test provano che la creazione di un SAQ è il punto cruciale per lo sviluppo, la promozione ed il successo del compostaggio.

In sintesi, è possibile indicare alcuni punti di forza dei sistemi di qualità:

- l'assicurazione della qualità è un buon mezzo per la promozione commerciale e per l'acquisizione della necessaria fiducia e confidenza con il compost da parte dell'acquirente;
- la definizione di metodiche di campionamento, analisi e controllo standardizzate costituisce un pre-requisito per la creazione di un marchio affidabile;
- la fornitura di compost dotato di marchio di qualità costituisce una garanzia di prodotto sicuro dal punto di vista igienico-sanitario e tecnico-agronomico.

Tabella 11.3 - Sistema di assicurazione della Qualità (SAQ) in Europa (modificato da: Barth, 1999; 2000)

Paese	Stato del SAQ e/o certificazione nell'UE	Marchio di qualità
EU	Ecolabel per Soil Improvers, criteri recentemente aggiornati	
Austria	SAQ definito e attivo	
Belgio	SAQ definito e attivo nelle Fiandre; in Vallonia e nella regione di Brussels si seguirà l'esempio fiammingo	
Danimarca	SAQ definito e recentemente attivato	
Francia	Criteri di qualità in fase di definizione	
Germania	SAQ definito e attivo	
Italia	SAQ in fase di definizione da parte del CIC (Consorzio Italiano Compostatori)	
Lussemburgo	Alcuni impianti seguono il SAQ tedesco	
Paesi Bassi	SAQ definito e attivo	
Spagna	SAQ in fase di definizione in Catalogna	
Svezia	SAQ definito e recentemente attivato	
Regno Unito	SAQ in fase di definizione da parte del (TCA)	
Finlandia	SAQ non definito	
Grecia	SAQ non definito	
Irlanda	SAQ non definito	
Portogallo	SAQ non definito	

11.8 Qualità e mercato del compost in Italia: alcuni punti fermi e qualche considerazione sulle prospettive

- In Italia il compost può rivestire un ruolo essenziale nella conservazione della qualità dei suoli. A confronto dei Paesi del Centro e del Nord Europa, è da sottolineare la situazione del tutto particolare nei Paesi mediterranei, dovuta all'impoverimento del contenuto in sostanza organica dei terreni. In questo senso, gran parte del territorio italiano è assimilabile a situazioni tipiche di Spagna e Grecia. È estremamente importante per l'Italia *gestire la risorsa sostanza organica* al fine di limitare i fenomeni di desertificazione in atto. Il compost, quale fonte di sostanza organica, rappresenta un elemento potenziale chiave per l'attenuazione di tali fenomeni.
- La qualità media del compost prodotto in Italia è, nel corso degli ultimi anni, notevolmente migliorata, raggiungendo *indici agro-ambientali elevati* in virtù sia della più accurata selezione degli scarti (differenziazione alla fonte, selezione di matrici particolarmente idonee, adozione di protocolli per l'accettazione degli scarti presso gli impianti), sia dell'abbandono del compostaggio da RU indifferenziati. Sono una riprova di ciò il minor contenuto in metalli pesanti e le prestazioni agronomiche dimostrate dai compost in innumerevoli prove applicative su colture diverse, sia in pieno campo che in serra. A questa situazione ha contribuito anche la legislazione, con la definizione di limiti qualitativi particolarmente restrittivi, in coerenza con ciò che avviene in altri Paesi europei.
- Dal punto di vista tecnico, uno dei parametri poco studiati e, ancor meno, considerati nella pratica applicazione è rappresentato dalla *stabilità del substrato*. La mancata conoscenza

della stabilità del compost porta, nella maggior parte dei casi, da un lato ad ottenere una più limitata efficacia nelle applicazioni specialistiche, dall'altro, a mascherare gli effetti benefici della sostanza organica nelle applicazioni estensive.

- ❑ È da sottolineare la carenza generalizzata di *informazioni sulla qualità e sugli impieghi* del compost. Un'azione di promozione e diffusione delle informazioni relative al prodotto "compost" risulterebbe molto importante ai fini dello sviluppo del mercato per questo substrato.
- ❑ La valutazione della qualità agronomica delle biomasse compostate non può prescindere dalla caratterizzazione analitica delle biomasse potenzialmente surrogabili con il compost, ovvero dei letami per gli impieghi estensivi e dei terricci torbosi per gli impieghi in florovivaismo. Dal punto di vista tecnico ed in via del tutto generale si può concludere che, sebbene con differenze più o meno accentuate a seconda della matrice stabilizzata, i compost presentano caratteristiche intermedie tra quelle dei letami e quelle dei terricci torbosi. Tale considerazione porta a concludere che il compost, oltre a rappresentare un *prodotto nuovo per l'agricoltura*, si presenta generalmente come un materiale non immediatamente pronto per l'uso (salvo casi particolari, quali l'applicazione in pieno campo). Esso rappresenta sostanzialmente un *prodotto semilavorato* che, per specifici impieghi, necessita di miglioramenti (es. aggiunte di nutrienti, correzione del pH, ecc.) al fine di raggiungere gli standard commerciali posseduti dai prodotti potenzialmente sostituibili, i quali già possiedono un mercato consolidato.
- ❑ I compost che esitano dagli impianti di trattamento di biomasse di scarto, al fine di aumentare il loro valore aggiunto, andrebbero *trasformati* in prodotti specifici, appetibili da diversi settori del mercato.
- ❑ Oltre alla vendita diretta del compost sfuso, bisogna considerare l'opportunità che *l'industria dei fertilizzanti* è sicuramente attrezzata, sia da un punto di vista tecnico che commerciale, per garantire la nobilitazione e la conseguente vendita del compost.
- ❑ L'impiego di compost per la formulazione di concimi organo-minerali, benchè possibile dal punto di vista tecnico, al momento non è percorribile dal punto di vista normativo. La L. 748/84 non include il compost tra le matrici ammissibili alla produzione di concimi organici e *concimi organo-minerali*.
- ❑ È di fondamentale importanza per gli impieghi agricoli in generale e, soprattutto, per l'uso in settori specialistici garantire la *costanza e l'omogeneità delle partite* del compost. Ciò si raggiunge con un'*accurata ed attenta gestione sia dell'impianto* nei diversi stadi della filiera di preparazione dei substrati (stoccaggio, pre-trattamenti, post-trattamenti, ecc.) che *del processo* nelle diverse fasi (stabilizzazione e maturazione).
- ❑ Per ultima, ma certamente non meno importante, è la creazione di un *Sistema di Assicurazione della Qualità*, ovvero un insieme di norme e procedure che garantisca la bontà della filiera di trasformazione biologica dei rifiuti organici (qualità delle matrici, gestione del processo, ecc.) e la qualità dei prodotti ottenuti. Sulla base di esperienze estere, i produttori di compost, rappresentati in Italia dal Consorzio Italiano Compostatori, possono svolgere un ruolo essenziale nella promozione non solo di un *marchio di prodotto*, ma soprattutto di un vero e proprio sistema di qualità a garanzia dell'intera *filiera compostaggio*.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

BARTH J. (1999). An estimation of European compost production: sources, quantities, qualities and use. Invited Lecture to the EU Compost Workshop "Steps towards a European Compost Directive", Vienna, 2-3 November 1999.

BARTH J. (2000). Composting and Quality Assurance in Europe. Personal communication.

CENTEMERO M. (1997). Qualità e prestazioni agronomiche dei materiali compostati. In: Atti 3° Convegno Nazionale Consorzio Italiano Compostatori "Produzione ed Impiego del compost di qualità", San Michele all'Adige, pp. 223-246.

CENTEMERO M., RAGAZZI R., FAVOINO E. (1999). Label policies, marketing strategies and technical developments of compost market in the European Countries. In: Organic Recovery & Biological Treatment, vol. 2, Proc. ORBIT '99 Conference, Weimar, 2-4 September 1999.

CENTEMERO M. & PERELLI (1999). La collocazione del compost: aspetti normativi e situazione del mercato. In: Atti 3° Corso Nazionale Consorzio Italiano Compostatori "Progettazione e gestione degli impianti di compostaggio", pp. 141-171, Reggio Emilia.

Appendice 1 Caratteristiche tipiche di rifiuti, scarti e residui organici utilizzabili nella produzione di compost

Materiale	carattere del valore tabellare	N (% peso secco)	Rapporto C/N	Umidità (% peso fresco)	Densità apparente (kg/m ³)
Residui di vegetali derivanti dalla raccolta e dalla trasformazione di prodotti agricoli					
Caffè, fondi di _	tipico	-	20	-	-
Cocco, gusci derivanti dalla lavorazione del _	tipico	2,3	22	8	470
Cotone, sfarinato da residui della lavorazione dei semi di _	tipico	7,7	7	-	-
Frutta, scarti della _	intervallo media	0,9 - 2,6 1,4	20 - 49 40	62 - 88 80	- -
Mais, stocchi di _	intervallo/tipico	0,6 - 0,8	60 - 73	12	20
Mais, tutoli di _	intervallo media	0,4 - 0,8 0,6	56 - 123 98	9 - 18 15	- 330
Mela, melma di risulta della produzione di confettura di _	tipico	2,8	7	59	835
Mela, pannello di estrazione dello sciroppo di _	tipico	1,2	13	60	710
Mela, residui di produzione del succo di _	tipico	1,1	48	88	925
Mirtillo, pannello di estrazione dello sciroppo di _	tipico	2,8	31	50	605
Mirtillo, residui (steli e foglie) delle piante di _	tipico	0,9	61	61	-
Orticoli, residui dei prodotti _	intervallo/tipico	2,5 - 4	11 - 13	-	-
Ortofrutticoli, residui da mercati _	tipico	2,7	19	87	940
Olive, sanse di _	intervallo/tipico	1,2 - 1,5	30 - 35	8 - 10	-
Patate, melma di risulta della lavorazione della _	tipico	-	28	75	930
Patate, porzione epigea delle piante	tipico	1,5	25	-	-
Patate, scarto da cernita	tipico	-	18	78	915
Pomodoro, residui della trasformazione del _	tipico	4,5	11	62	-
Riso, pula di _	intervallo media	0,1 - 0,4 0,3	113 - 1120 121	7 - 12 14	110 - 130 120
Soia, sfarinato da residui della lavorazione dei semi di _	intervallo/tipico	7,2 - 7,6	4 - 6	-	-

segue

segue

Materiale	carattere del valore tabellare	N (% peso secco)	Rapporto C/N	Umidità (% peso fresco)	Densità apparente (kg/m ³)
Scarti e rifiuti della lavorazione dei prodotti ittici e delle carni⁽¹⁾					
Granchi, scarti della lavorazione dei _	intervallo media	4,6 – 8,2 6,1	4 – 5,4 4,9	35 – 61 47	145
Macellazione, sangue coagulato o disidratato	intervallo/tipico	13 - 14	3 – 3,5	10 - 78	-
Macellazione, scarti e rifiuti misti di _	intervallo/tipico	7 – 10	2 – 4	-	-
Molluschi bivalvi, (cozze, vongole, etc.) scarti di lavorazione	tipico	3,6	2,2	63	-
Pesce, avariato e residui dell'eviscerazione	intervallo media	6,5 – 14,2 10,6	2,6 – 5 3,6	50 – 81 76	- -
Pesce, melme di risulta dell'inscatolamento del _	tipico	6,8	5,2	94	-
Piscicoltura, residui dei preparati mangimistici	tipico	2	28	10	-
Pollame, carcasse di animali morti per cause accidentali	tipico	2,4	5	65	-
Rumine, contenuti del _	intervallo/tipico	1,8	20 – 30	80 – 85	870
Scampi, residui della lavorazione degli _	tipico	9,5	3,4	78	-
Deiezioni zootecniche					
Galline ovaiole, stame da batterie di allevamento	intervallo media	4 – 10 8	3 – 10 6	62 – 75 69	815 – 960 880
Letame bovino, da animali da latte in stabulazione fissa allevati in box	intervallo media	1,5 – 4,2 2,4	11 – 30 19	67 – 87 81	785 - 990 865
	tipico tipico	tipico tipico	2,7 3,7	18 13	79 - 83 -
Letame caprino, pecore	intervallo media	1,3 – 3,9 2,7	13 – 20 2,7	60 – 75 16	- 69 -
Letame equino	intervallo media	1,4 – 2,3 1,6	22 – 50 30	59 – 79 72	720 – 960 820
Polli da carne, stame da batterie di allevamento	intervallo media	1,6 – 3,9 2,7	12 – 15 14	22 – 46 37	450 – 600 515
Suini, deiezioni	intervallo media	1,9 – 4,3 3,1	9 – 19 14	65 – 91 80	- -
Tacchini, stame da batterie di allevamento	media	2,6	16	26	465

segue

**CARATTERISTICHE TIPICHE DI RIFIUTI, SCARTI E RESIDUI ORGANICI
UTILIZZABILI NELLA PRODUZIONE DI COMPOST**

segue

Materiale	carattere del valore tabellare	N (% peso secco)	Rapporto C/N	Umidità (% peso fresco)	Densità apparente (kg/m ³)
Rifiuti di derivazione urbana					
Carta straccia, da rifiuto domestico	intervallo/tipico	0,2 – 0,25	127 – 178	18 – 20	90 - 100
Fanghi di depurazione, fanghi attivi	tipico	5,6	6	-	-
Fanghi di depurazione, fanghi digeriti	tipico	1,9	16	-	-
Frazione organica dei rifiuti urbani ⁽²⁾	intervallo/tipico	0,6 – 1,3	34 - 80	47 - 60	430 – 600
Pozzo nero	intervallo/tipico	5,5 – 6,5	6 – 10	-	-
Scarti di mensa, da raccolta differenziata	intervallo/tipico	1,9 – 2,9	14 – 16	69 - 73	350 – 500
Residui pagliosi					
Paglia, da cereali (generale)	intervallo media	0,3 – 1,1 0,7	48 - 150 80	4 - 27 12	35 – 225 135
Paglia, di avena	intervallo media	0,6 – 1,1 0,9	48 - 98 60	- -	- -
Paglia, di grano	intervallo media	0,3 – 0,5 0,4	100 – 150 127	- -	- -
Residui legnosi e cartacei					
Carta di giornale	tipico	0,06 – 0,14	398 – 852	3 – 8	115 - 145
Cartiera, fango di _	tipico	0,56	54	81	-
Cartone ondulato	tipico	0,10	563	8	150
Cortecce, di alberi a legno duro	intervallo media	0,10 – 1,4 0,24	116 - 436 223	- -	- -
Cortecce, di alberi a legno tenero	intervallo media	0,04 – 0,39 0,14	131 – 1285 496	- -	- -
Legno, cippato di _ (wood chips)	tipico	-	-	-	265 - 370
Legno duro, sfridi _ (cippato, trucioli, etc.)	intervallo media	0,06 – 0,11 0,09	451 – 819 560	- -	- -
Legno tenero, sfridi di _ (cippato, trucioli, etc.)	intervallo media	0,04 – 0,23 0,09	212 – 1313 641	- -	- -
Segatura	intervallo media	0,06 – 0,8 0,24	200 – 750 442	19 – 65 39	200 – 270 245
Segheria, sfridi di _	tipico	0,13	170	-	-
Residui del giardinaggio e della gestione del verde pubblico ed altre biomasse vegetali					
Foglie	intervallo media	0,5 – 1,3 0,9	40 – 80 54	- 38	- -
soffici e secche compatte ed umide	tipico tipico	- -	- -	- -	60 - 180 240 - 300
Giacinto d'acqua, (fresco)	tipico	-	20 – 30	93	240

segue

segue

Caratteristiche tipiche di rifiuti, scarti e residui organici utilizzabili nella produzione di compost

Materiale	carattere del valore tabellare	N (% peso secco)	Rapporto C/N	Umidità (% peso fresco)	Densità apparente (kg/m ³)
Macrofite (alghe) marine ³⁾	intervallo media	1,2 – 3 1,9	5 – 27 17	- 53	- -
Sarmenti di potatura, da piante arboree (triturati)	tipico	3,1	16	70	770
Sarmenti di potatura, da piante arbustive (triturati)	tipico	1	53	15	255
Sfalci d'erba	intervallo media	2 – 6 3,4	9 – 25 17	- 82	- -
soffici	tipico	-	-	-	180 – 240
compatti	tipico	-	-	-	300 – 480

1 Molti degli scarti, residui e rifiuti di origine animale sono soggetti a precise prescrizioni sanitarie che ne regolano lo smaltimento, in particolar modo in seguito all'introduzione delle nuove norme in materia di BSE; di conseguenza, può non essere consentito il loro impiego come substrati per il compostaggio.

2 Frazione organica da selezione meccanica a valle delle operazioni di raccolta del rifiuto indifferenziato.

3 A causa della ricorrenza di tallio, le biomasse algali potrebbero risultare non compatibili con la preparazione delle miscele da avviare alla biostabilizzazione per la produzione di compost.

Appendice 2 Modelli per il dimensionamento e la stima dei costi del compostaggio

A2.1 Tipologie di impianto considerate

I due modelli qui proposti si riferiscono entrambi a filiere di trattamento di rifiuti organici prodotti in ambito urbano. Nel primo caso è analizzata una filiera concepita per il compostaggio della frazione organica selezionata dei rifiuti urbani (successivamente indicata, per comodità, con la vecchia sigla FORSU) ottenuta attraverso un programma di raccolta secco/umido mediante cassonetti stradali (cfr. *diagramma di flusso* in Figura A2.1); nel secondo viene presentato il modello relativo ad una stazione di compostaggio per il trattamento dei rifiuti organici da raccolta differenziata alla fonte (cfr. *diagramma di flusso* in Figura A2.2). Per comodità, di seguito lo schema di trattamento per l'organico da separazione secco/umido verrà indicato come SC-FORSU, mentre quello per il trattamento dei residui organici da raccolta alla fonte sarà indicato come SC-VERDE, dove SC sta per stazione di compostaggio. Gran parte delle assunzioni fissate nell'elaborazione dei modelli tengono conto delle fondamentali indicazioni riportate nel manuale *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*, pubblicato dalla CRC Press (Diaz *et al.*, 1993).

A2.1.1 Compostaggio della frazione organica dei rifiuti solidi urbani da separazione secco/umido

Per quanto riguarda il modello SC-FORSU, viene presa in considerazione l'ipotesi di un sistema di stabilizzazione basato sui cumuli rivoltati periodicamente. Altri dettagli relativi all'organizzazione della filiera di trattamento analizzata sono riportati di seguito:

- La frazione umida in entrata all'impianto viene scaricata sull'aia di ricezione (tipping floor), che rappresenta una porzione dell'area destinata alla preparazione (staging area) della matrice di partenza da avviare alla biostabilizzazione. Sull'aia di scarico avviene, a seguito di intercettazione visiva, la rimozione degli eventuali materiali inerti di grosse dimensioni.
- Nella medesima area di preparazione, viene attuata una vagliatura. L'area di preparazione ha spazio sufficiente per ospitare i vagli per la fase di raffinazione finale del compost ed i macchinari necessari per l'amminutamento (es. dilacerazione, triturazione, ecc.) della matrice organica. Allo stesso modo, l'area è in grado di ospitare le macchine operatrici impiegate nella gestione dei cumuli (pala meccanica con cucchiaio caricatore frontale, muletto con pala caricatrice, macchina rivoltatrice cavalca-cumuli). Il vaglio a tamburo rotante per la selezione dell'organico in entrata all'impianto ha fori di diametro compreso tra 8 e 10 cm. La finalità della prima vagliatura è quella di eliminare al meglio gli eventuali materiali grossolani non compostabili ancora commisti con l'organico. L'intera area di preparazione, compresi l'aia di ricezione, gli spazi per la vagliatura ed il condizionamento fisico-meccanico dell'organico e la rimessa per le macchine operatrici, è ospitata in edificio chiuso.
- Nella linea di preparazione della matrice organica per la biostabilizzazione viene impiegato un mulino a martelli orizzontale.
- La frazione di materiali grossolani residui alla fase iniziale di cernita e vagliatura viene destinata direttamente alla discarica. Tuttavia, è necessario prevedere, nell'ambito della stazione di compostaggio, un'area di stoccaggio temporaneo di questi scarti.
- I cumuli, a geometria compatibile con la macchina rivoltatrice [sezione trape-

zoidale: 4,5 m (larghezza della base) x 2 m (altezza), larghezza della corona (base superiore del trapezio: 1 m] sono allestiti per mezzo di pala meccanica. Il rivoltamento, necessario per la miscelazione e l'aerazione della matrice in trasformazione, viene condotto con apposita macchina semovente cavalcacumuli. La cadenza di rivoltamento viene fissata in tre volte a settimana.

- La fase di finissaggio è attuata in cumuli statici aerati (sezione trapezoidale, larghezza 4 m x altezza 2 m), sistemati su platea al chiuso. Anche se qui non computata, una parte dell'area coperta all'interno dell'edificio destinato al finissaggio potrebbe essere riservata per lo stoccaggio del compost finito, fino ad un massimo di 3 mesi. Le aie di compostaggio attivo e quelle di finissaggio sono ospitate in struttura chiusa dotata di sistema di captazione ed abbattimento delle emissioni maleodoranti (biofiltri).
- Un vaglio a tamburo rotante, con fori di diametro uguale a 3 cm, è impiegato per l'affinamento del compost maturo prima della commercializzazione. I materiali indesiderati separati a seguito di vagliatura finale del compost sono avviati in discarica.
- Per il trasferimento di materiali nell'ambito della stazione di compostaggio si fa ricorso alle macchine operatrici dotate di organi caricatori (pala meccanica e mulletto).

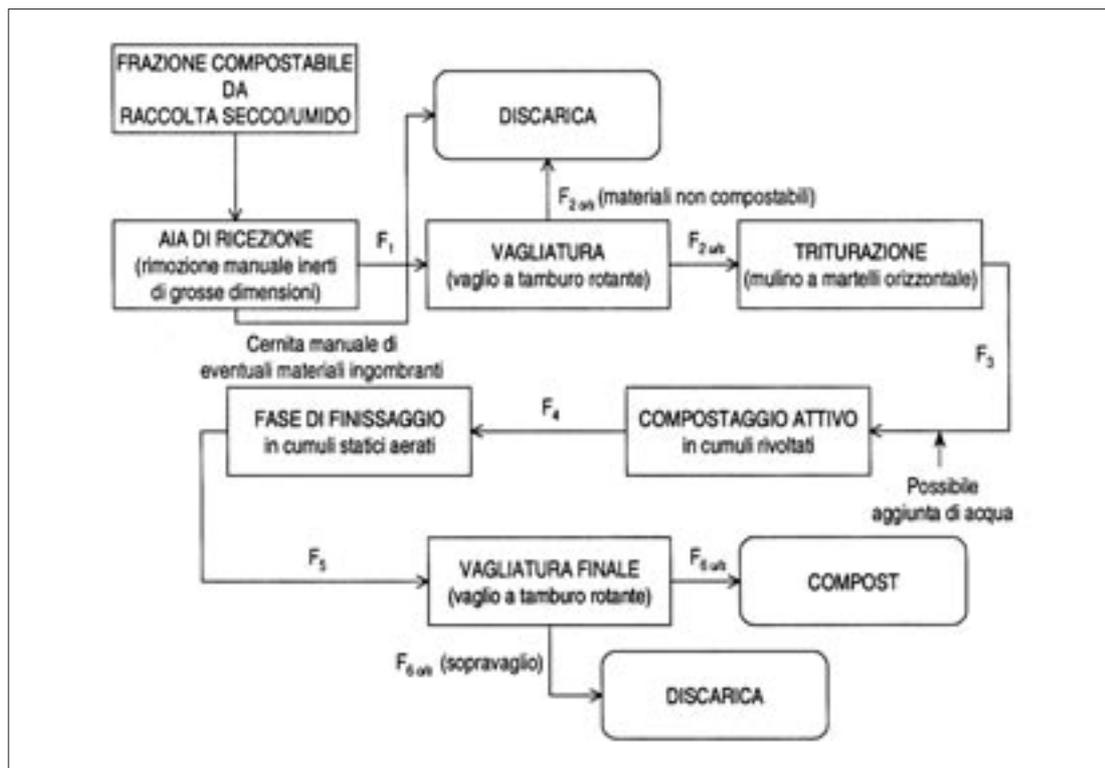


Fig. A2.1 – Diagramma di flusso relativo al modello proposto per il compostaggio della frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU) derivante da raccolta secco/umido mediante impiego di cassonetti stradali dedicati (modello SC-FORSU). I vettori contrassegnati con la lettera F seguita, in pedice, da un numero, rappresentano i diversi flussi di materiali da un comparto all'altro della filiera (modificato da KOMILIS, 1997).

A2.1.2 Compostaggio dei rifiuti organici da raccolta differenziata alla fonte

Nella filiera di compostaggio incentrata sul modello SC-VERDE, l'impianto di trattamento riceve soltanto rifiuti derivanti dalla raccolta differenziata presso le famiglie, presso apposite isole di conferimento dislocate su base rionale, presso strutture commerciali (es. ristoranti, mense, supermercati, mercati orto-frutticoli, ecc.) o comunità (caserme, scuole, convitti, ecc.), e dalle attività di giardinaggio domestico e di manutenzione del verde pubblico. Il modello qui proposto prevede il ricorso ad un tritratore a dischi uncinati controrotanti ovvero a tramoggia rotante (cfr. Cap. 5, 5.1.2), in sostituzione del mulino orizzontale a martelli proposto nello schema SC-FORSU. La fase di compostaggio attivo e lo stadio di finissaggio avvengono nella stessa platea, secondo il metodo dei cumuli rivoltati. I cumuli presentano sezione triangolare, con base di ca. 6 m ed altezza 3 m. L'area di compostaggio è posta all'aperto e, quindi, non è provvista di sistema di captazione e trattamento degli odori. Il rivoltamento, eseguito con pala meccanica, viene attuato con la cadenza di tre volte a settimana, durante la fase di compostaggio attivo, e di una volta a settimana, durante la fase di finissaggio. È prevista la vagliatura del compost finito, prima della commercializzazione.

Anche in questo caso, potrebbe essere prevista, nelle adiacenze dell'area di processo, un'area di stoccaggio per il compost, compatibile con la produzione di almeno 3 mesi. Questo spazio non è tuttavia considerato nel modello SC-VERDE qui discusso.

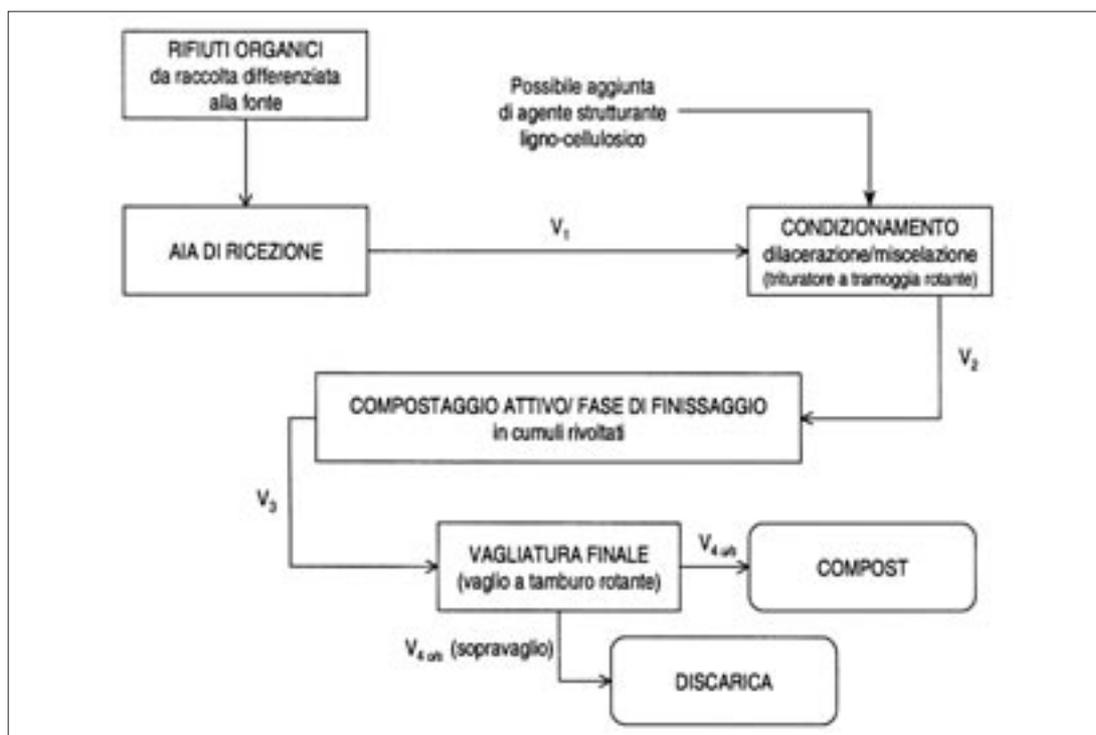


Fig. A2.2 – Diagramma di flusso relativo al modello proposto per il compostaggio dei rifiuti organici derivanti da raccolta differenziata mediante asporto presso le utenze (modello SC-VERDE). I vettori contrassegnati con la lettera V seguita, in pedice, da un numero, rappresentano i diversi flussi di materiali da un comparto all'altro della filiera (modificato da KOMILIS, 1997).

A2.2 Elementi assunti a base dei modelli previsionali

A2.2.1 Caratteristiche dei rifiuti destinati alle due differenti stazioni di compostaggio

Il flusso di rifiuti in entrata all'impianto considerato nel modello SC-FORSU è rappresentato da un materiale che, per modalità di asporto, risulta costituito in larga prevalenza da componenti organiche compostabili. Sebbene il sistema di raccolta secco/umido mediante cassonetti stradali dedicati non consenta il 100% di efficienza nella rimozione delle frazioni indesiderate non compostabili, si assume che la maggior parte dei materiali inerti (85-90% in peso) sia già stata allontanata dalla frazione organica con la linea del secco. D'altra parte, nel caso del modello relativo allo schema SC-VERDE, le matrici afferite all'impianto, dal momento che derivano da una puntuale e controllata raccolta alla fonte, sono in pratica esenti da contaminazione significativa di materiali non compatibili con il compostaggio. Questi ultimi, di solito, arrivano a rappresentare meno del 3% in peso dell'intero flusso in entrata alla stazione di trattamento.

Per poter convertire unità di massa in unità di volume e viceversa, è importante conoscere i valori di densità delle matrici trattate, ai diversi stadi del processo di compostaggio. Anche il contenuto di umidità delle varie frazioni rappresenta un parametro la cui conoscenza è richiesta in virtù del fatto che i calcoli di bilancio di massa attraverso la filiera di compostaggio sono condotti sulla base del peso secco, mentre le conversioni in termini di peso umido servono per il dimensionamento dei macchinari. Per alcune componenti dei materiali in entrata alla stazione di compostaggio, sono disponibili i valori della densità e dell'umidità al momento dello scaricamento sull'aia di ricezione, nonché i valori delle medesime grandezze alla fine del processo di stabilizzazione (Tabella A2.1).

Al fine della applicazione dei modelli di processo proposti, più che la densità di ogni singolo componente della matrice sottoposta a biostabilizzazione, risulta importante il valore della densità apparente (*bulk density*) del rifiuto organico nel suo complesso, una volta disposto in

Tabella A2.1 – Valori di umidità e densità di alcune componenti del rifiuto in entrata ad impianti di compostaggio per il trattamento della FORSU da raccolta secco/umido ovvero per la stabilizzazione di residui organici da raccolta differenziata alla fonte.

Tipo di componente del rifiuto	Umidità del materiale sull'aia di scarico (% peso umido)	Densità del materiale sull'aia di scarico (kg/m ³)	Umidità del materiale a fine processo di compostaggio (% peso umido)	Densità del materiale a fine processo di compostaggio (kg/m ³)
Scarti di mensa	70 - 75	350 - 500	40 - 45	550 - 600
Residui cartacei	20 - 30	90 - 100	35 - 40	250 - 300
Residui del giardinaggio (foglie e sfalci d'erba)	55 - 60	250 - 400	35 - 40	450 - 500
Sarmenti di potatura e ramaglie (non triturati)	45 - 50	130 - 150	30 - 35 (triturati)	350 - 550 (triturati)
Scarti dei mercati orto-frutticoli	75 - 85	750 - 850	50 - 55	800 - 900
Inerti non compostabili	3 - 5	50 - 150	3 - 5	50 - 150

cumuli. La densità del materiale aumenta con il progredire delle reazioni di compostaggio. Ad esempio, nel caso di rifiuti organici raccolti presso i mercati orto-frutticoli e miscelati nel rapporto 2:1,5 con cippato di legno tenero, si passa da una densità apparente della matrice iniziale fresca di ca. 500 kg/m³ ad una densità apparente del compost finito di ca. 700 kg/m³, dopo 12 settimane di processo col sistema dei cumuli rivoltati.

Nei casi qui analizzati, sono assunti, rispettivamente, i valori di densità apparente, riferita ai materiali umidi, di 350 kg/m³ per la FORSU da raccolta secco/umido, a valle della fase di triturazione, e di 500 kg/m³ per la miscela iniziale dei rifiuti organici da raccolta differenziata alla fonte. Agli inerti è attribuita, in entrambi i modelli discussi, la densità di 100 kg/m³.

A2.2.2 Macchine operatrici ed attrezzature elettro-meccaniche

I principali macchinari funzionali all'attuazione delle filiere di compostaggio previste dagli schemi SC-FORSU e SC-VERDE sono riportati in Tabella A2.2 nella quale viene indicata anche la fonte energetica necessaria per il funzionamento.

Tabella A2.2 – Tipologia di macchine ed attrezzature previste nelle filiere di compostaggio per la stabilizzazione sia della frazione organica da raccolta secco/umido dei rifiuti urbani (SC-FORSU), sia dei residui organici da raccolta differenziata alla fonte (SC-VERDE).

Tipo di stazione di compostaggio	Attrezzatura	Fonte energetica richiesta per il funzionamento
SC-FORSU	<ul style="list-style-type: none"> - Pala/e meccanica/che a caricamento frontale - Vaglio primario (Ø 8-10 cm) - Mulino a martelli orizzontale - Macchina rivoltatrice semovente - Muletto/i con cucchiaio caricatore - Vaglio secondario (Ø 3 cm) - Sistema di aerazione forzata per i cumuli statici in fase di finissaggio - Sistema di captazione ed abbattimento degli odori 	<ul style="list-style-type: none"> Diesel Elettricità Elettricità Diesel Diesel Elettricità Elettricità Elettricità
SC-VERDE	<ul style="list-style-type: none"> - Pala meccanica a caricamento frontale - Trituratore a tramoggia rotante - Vaglio secondario (Ø 3 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> Diesel Diesel Elettricità

A2.2.3 Superfici richieste per le operazioni

Entrambe le stazioni di compostaggio previste dai modelli analizzati prevedono 3 principali aree di attività, organizzate, internamente, in spazi dedicati a funzioni specifiche.

A2.2.3.1 Area di preparazione

Come già accennato in precedenza, l'area di preparazione include l'aia di ricezione, l'area per la dilacerazione/triturazione/miscelazione delle matrici organiche da avviare alla stabilizzazione, l'area relativa alle diverse fasi di vagliatura e lo spazio necessario per lo stazionamento e/o la rimessa delle macchine operatrici. Le aree che ospitano i macchinari per il condizionamento fisico-meccanico e la vagliatura dei materiali saranno disegnate sulla base della

superficie di ingombro delle attrezzature impiegate e degli spazi di manovra necessari intorno alle stesse. Per il computo di tutte le suddette superfici, è ragionevole considerare un fattore di incremento di 1,5-2. Il medesimo criterio verrà adottato anche per il calcolo delle piazzole di stazionamento delle macchine operatrici (pala meccanica, macchina rivoltatrice, muletto, ecc.). Nel modello SC-FORSU, l'area di preparazione è prevista in edificio chiuso, pavimentato con un fondo in cemento dello spessore di almeno 15 cm. Nessuna struttura coperta è invece prevista dal modello SC-VERDE per le aree di processo, le quali devono comunque essere adeguatamente pavimentate. L'aia di ricezione, in entrambi i modelli, è disegnata per ospitare il rifiuto di almeno due giorni, in modo da poter fronteggiare situazioni accidentali di fermo-impianto.

Infine, l'area di preparazione, dove eventualmente previsto, come nel caso del compostaggio secondo lo schema SC-VERDE, deve includere anche spazi sufficienti per lo stoccaggio delle matrici ligno-cellulosiche strutturanti.

A2.2.3.2 Area di processo

L'area di processo rappresenta la superficie occupata sia dalle aie di compostaggio attivo sia dalle aie per il finissaggio del prodotto, che, nel caso del modello SC-VERDE, coincidono. Le aie dovranno essere dimensionate tenendo conto dei necessari spazi di manovra delle macchine operatrici. Il modello di processo SC-FORSU prevede il ricorso ad una macchina rivolta-cumuli semovente (tipo Scarab), mentre nel caso dello schema SC-VERDE, il rivoltamento è attuato con pala meccanica con caricatore frontale. L'intera area di processo (compostaggio attivo e finissaggio) per la stabilizzazione della FORSU è ospitata in struttura chiusa, debitamente pavimentata con un fondo in cemento dello spessore di 10 cm. Le aie di finissaggio sono dotate di un sistema per l'insufflazione forzata di aria nei cumuli, mediante tubi adduttori alloggiati nel pavimento. Nel modello SC-VERDE, invece, la stabilizzazione avviene in aie all'aperto, dotate di idonea pavimentazione. In questo caso, le aie di compostaggio attivo sono le stesse nelle quali avviene, successivamente, il finissaggio.

Lo stazionamento della matrice organica nelle aie di compostaggio attivo, secondo il modello SC-FORSU, si protrae per 5 settimane, con aerazione tramite rivoltamento (3 volte/settimana). Segue la fase di finissaggio in cumuli statici con insufflazione forzata, per ulteriori 3 settimane. Nello schema SC-VERDE, la fase di compostaggio attivo in cumuli rivoltati (3 volte/settimana) ha una durata di 7 settimane, cui seguono 5 settimane di fase di finissaggio, ancora in cumuli rivoltati (1 volta/settimana).

Nel caso del modello SC-FORSU, alla matrice organica, prima di entrare in aia di compostaggio attivo, sarà aggiunta, se necessario, acqua per portare il materiale ad un'umidità ottimale del 60-65% (cfr. Cap. 2, 2.4.3). Per consentire una omogenea umidificazione, viene fatto ricorso a nebulizzatori posizionati sopra il nastro trasportatore della matrice organica in uscita dal mulino a martelli orizzontale.

Il sistema di captazione ed abbattimento degli odori previsto per l'intera area di processo nell'ambito dello schema SC-FORSU è costituito da aspiratori che convogliano l'aria interna dell'edificio che ospita le aie di stabilizzazione e di finissaggio ai biofiltri costituiti da letti di compost maturo misto a cippato di legno. Sulla scorta delle indicazioni più frequentemente ricorrenti nella letteratura tecnico-scientifica (dati aggiornati al 2000), viene assunto, per questo sistema di deodorizzazione, un costo di investimento equivalente a ca. 7,5 Euro/m² di area di processo servita. Per il sistema di insufflazione delle aie di finissaggio della filiera SC-FORSU, basato su un semplice programma di tempi di lavoro e pausa delle soffianti, preimpostati, si considera infine un onere di investimento di ca. 10 Euro/m² area servita.

A2.2.3.3 Altre aree di servizio

Oltre alle aree strettamente funzionali ai diversi stadi del processo di compostaggio, gli schemi SC-FORSU e SC-VERDE prevedono spazi di servizio destinati ai locali per uffici, spogliatoi e servizi igienici per il personale, ad eventuali magazzini per materiali di consumo e pezzi di ricambio, alla viabilità interna dell'impianto e ad un'area di stoccaggio provvisorio dei materiali di rigetto da conferire in discarica. Tutte le superfici di servizio sono debitamente asfaltate.

A2.2.4 Aree di rispetto

La stazione di compostaggio, in entrambi i modelli analizzati, rispetta adeguate distanze di sicurezza nei confronti dei punti critici circumvicini (centri abitati, pozzi, acque superficiali, installazioni sensibili, ecc.) (cfr. Cap. 7, 7.2.1). Poiché per lo schema SC-FORSU è previsto un sistema di abbattimento degli odori, le distanze di rispetto sono, in questo caso, minori rispet-

Tabella A2.3 – Caratteristiche degli schemi di processo alla base dei due modelli assunti per la progettazione del compostaggio della frazione organica da raccolta secco/umido dei rifiuti urbani (SC-FORSU), ovvero dei residui organici da raccolta differenziata alla fonte (SC-VERDE).

Elemento a base di progetto	Modello SC-FORSU	Modello SC-VERDE
Frazione, in volume, dei materiali grossolani non-compostabili e/o inerti provenienti dalla vagliatura primaria	10%	-
Cadenza di rivoltamento	3 volte/settimana (comp. attivo) cumuli statici (finissaggio)	3 volte/settimana (comp. attivo) 1 volta/settimana (finissaggio)
Tempo di ritenzione della matrice in trasformazione nell'area di processo (compostaggio attivo + finissaggio)	8 settimane complessive di cui 5 settimane di comp. attivo e 3 settimane di finissaggio	12 settimane di cui 7 settimane di comp. attivo e 5 settimane di finissaggio
Riduzione in peso secco della frazione organica dei rifiuti urbani dovuta a mineralizzazione a seguito di compostaggio	35% (comp. attivo) 10% (finissaggio)	-
Riduzione in peso secco dei rifiuti organici da raccolta alla fonte dovuta a mineralizzazione a seguito di compostaggio	-	40% (comp. attivo + finissaggio)
Confinamento al chiuso dell'area di processo	SI	NO
Sistema di insufflazione forzata di aria nei cumuli di materiale in finissaggio	SI	NO
Sistema di controllo degli odori nelle aree adibite al compostaggio (compostaggio attivo + finissaggio)	SI	NO
Frazione, in volume, dei materiali grossolani non compostabili e/o inerti provenienti dalla vagliatura secondaria	5%	3%
Distanza minima di rispetto	150	300

to a quelle applicate nello schema SC-VERDE (Tabella A2.3). Non sono previsti interventi di sistemazione o pavimentazione delle aree di rispetto.

A2.3 Equazioni di flusso di materia

In questo paragrafo sono descritte le equazioni impiegate per sviluppare i due modelli di processo proposti. Le diverse correnti di flusso sono indicate con la lettera ed il numero corrispondenti ai vettori riportati in Fig. A2.1, per lo schema SC-FORSU, e Fig. A2.2, per lo schema SC-VERDE.

EQUAZIONE 3-1 (SC-FORSU *flusso* F_i ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$mass_1 = mass_1_1 + mass_1_2 + \dots + mass_1_k$$

dove: $mass_1_i$ peso umido (t/giorno) di uno specifico componente ($i =$ da 1 a k) del rifiuto in entrata alla stazione di compostaggio (cfr. Tabella A2.1)

$mass_1$ peso umido (t/giorno) del rifiuto complessivo in entrata alla stazione di compostaggio

EQUAZIONE 3-2 (SC-FORSU *flusso* F_i ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$dry_mass_1_i = (1 - moist_i) \times mass_1_i$$

dove: $dry_mass_1_i$ peso secco (t/giorno) di uno specifico componente i scaricato sull'aia di ricezione

$moist_i$ contenuto di umidità (%) del componente i scaricato sull'aia di ricezione

$mass_1_i$ peso umido (t/giorno) del componente i in entrata alla stazione di compostaggio

EQUAZIONE 3-3 (SC-FORSU *flusso* F_i ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$dry_mass_1 = dry_mass_1_1 + dry_mass_1_2 + \dots + dry_mass_1_k$$

dove: dry_mass_1 flusso di sostanza secca (t/giorno) relativo al rifiuto iniziale in entrata alla stazione di compostaggio

EQUAZIONE 3-4 (SC-FORSU *flusso* F_i ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$vol_1_i = mass_1_i / waste_dens_i$$

dove: vol_1_i flusso, in termini di volume (m^3), relativo ad un singolo componente i del rifiuto scaricato sull'aia di ricezione

$waste_dens_i$ densità apparente (kg/m^3) del componente i del rifiuto in entrata alla stazione di compostaggio

EQUAZIONE 3-5 (SC-FORSU *flusso* F_1 ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$vol_1 = vol_1_1 + vol_1_2 + \dots + vol_1_k$$

dove: vol_1 flusso, in termini di volume (m^3), del rifiuto complessivo scaricato sull'aia di ricezione

EQUAZIONE 3-6 (SC-FORSU *flusso* F_1 ; SC-VERDE *flusso* V_1)

$$moist_1 = (mass_1_1 \times moist_1 + mass_1_2 \times moist_2 + \dots + mass_1_k \times moist_k) / mass_1$$

dove: $moist_1$ umidità iniziale (% peso umido) del rifiuto complessivo convogliato giornalmente alla stazione di compostaggio

$moist_{1 \dots k}$ contenuto di umidità (% peso umido) dei singoli componenti del rifiuto scaricato sull'aia di ricezione

EQUAZIONE 3-7 (SC-FORSU *flusso* $F_{2\ u/s}$)

$$mass_{2\ u/s} = (1 - pre_screen) \times mass_1$$

dove: $mass_{2\ u/s}$ peso umido (t/giorno) della frazione del rifiuto complessivo, passante al vaglio primario (\varnothing 8-10 cm)

pre_screen frazione di sopravaglio espressa come % del rifiuto complessivo in entrata al vaglio primario; nel modello SC-FORSU si assume il valore 0,1 (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-8 (SC-FORSU *flusso* $F_{2\ o/s}$)

$$mass_{2\ o/s} = mass_1 - mass_{2\ u/s}$$

dove: $mass_{2\ o/s}$ frazione di sopravaglio (t/giorno) del rifiuto complessivo; questa frazione è avviata allo smaltimento in discarica

EQUAZIONE 3-9 (SC-VERDE *flusso* V_1)

Cfr. equazioni Cap. 3 Eventuale mitigazione dell'eccesso di umidità mediante aggiunta di agente di supporto ligno-cellulosico

EQUAZIONE 3-10 (SC-FORSU *flusso* F_{3i} ; SC-VERDE *flusso* V_2)

$$mass_3 = mass_{2\ u/s} \quad (F3)$$

dove: $mass_3$ flusso, in termini di peso (t/giorno), del rifiuto complessivo dopo la fase di amminutamento in mulino a martelli orizzontale; il condizionamento meccanico non comporta variazioni apprezzabili di peso

$$mass_2 = mass_1^{(*)} \quad (V_2)$$

dove: $mass_2$ flusso, in termini di peso (t/giorno), del rifiuto complessivo dopo la fase di amminutamento in trituratore a tramoggia rotante; il condizionamento meccanico non comporta variazioni apprezzabili di peso del flusso in entrata;
(¹) salvo i casi in cui viene aggiunto l'agente condizionante ligno cellulosico per mitigare l'eventuale eccesso di umidità

EQUAZIONE 3-11 (SC-FORSU flusso F_3 ; SC-VERDE flusso V_2)

$$dry_mass_3 = mass_3 \times (1 - moist_1) \quad (F_3)$$

dove: dry_mass_3 matrice organica, in termini di sostanza secca (t/giorno), in entrata nell'area di compostaggio attivo

$$dry_mass_2 = mass_2 \times (1 - moist_1^{(1)}) \quad (V_2)$$

dove: dry_mass_2 matrice organica, in termini di sostanza secca (t/giorno), in entrata nell'area di compostaggio attivo e finissaggio

[Si noti che nelle equazioni su riportate viene assunto, con buona approssimazione, un contenuto di umidità della matrice organica in entrata nell'area di biostabilizzazione uguale a quello del rifiuto complessivo conferito all'impianto;

(¹) fatti salvi i casi in cui, per quanto riguarda il modello SC-VERDE, in fase di dilacerazione/miscelazione viene aggiunto materiale ligno-cellulosico per mitigare l'eventuale eccesso di umidità]

EQUAZIONE 3-12 (SC-FORSU flusso F_3)

$$water_3 = [(0,63 - moist_1) \times mass_3] / 0,50$$

dove: $water_3$ quantità giornaliera d'acqua (t/giorno) necessaria per aumentare l'umidità della FORSU (assunta nell'equazione uguale al 50%) fino al valore ottimale fissato nel 63%, prima della sistemazione della matrice organica in cumuli per il compostaggio attivo

EQUAZIONE 3-13 (SC-FORSU flusso F_3 ; SC-VERDE flusso V_2)

$$vol_3 = mass_3 / shred_waste_dens \quad (F_3)$$

dove: vol_3 flusso, in termini di volume (m^3), relativo alla FORSU condizionata meccanicamente, in entrata all'area di compostaggio attivo per l'allestimento dei cumuli

$shred_waste_dens$ densità apparente (kg/m^3) del rifiuto a seguito di condizionamento in mulino a martelli orizzontale

$$vol_2 = mass_2 / grind_waste_dens \quad (V_2)$$

dove: vol_2 flusso, in termini di volume (m^3), relativo alla matrice organica condizionata meccanicamente, in entrata all'area di compostaggio attivo per l'allestimento dei cumuli

grind_waste_dens densità apparente (kg/m³) dei rifiuti organici a seguito di condizionamento in tritratore a tramoggia rotante

EQUAZIONE 3-14 (SC-FORSU *flusso F₄*)

$$dry_mass_4 = dry_mass_3 \times (1 - stab_red)$$

dove: *dry_mass_4* flusso di FORSU stabilizzata, espressa come sostanza secca (t/giorno), in uscita dall'aia di compostaggio attivo

stab_red contrazione in peso secco della FORSU dovuto alle reazioni di mineralizzazione, durante il periodo di stazionamento nell'aia di compostaggio attivo (stabilizzazione); nel modello SC-FORSU viene assunta una riduzione uguale al 35% (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-15 (SC-FORSU *flusso F₄*)

$$vol_4 = dry_mass_4 / stab_dens$$

dove: *vol_4* flusso, in termini di volume (m³), della FORSU in uscita dall'aia di compostaggio attivo ed in entrata all'aia di finissaggio

stab_dens densità apparente (kg/m³) della FORSU al termine della fase di compostaggio attivo (stabilizzazione) (cfr. Tabella A2.1)

EQUAZIONE 3-16 (SC-FORSU *flusso F₄*)

$$mass_4 = dry_mass4 / (1 - stab_moist)$$

dove: *mass_4* flusso, in termini di peso umido (t/giorno), della FORSU stabilizzata alla fine della fase di compostaggio attivo

stab_moist umidità (% peso umido) della FORSU al termine della fase di compostaggio attivo (stabilizzazione) (cfr. Tabella A2.1)

Con le seguenti equazioni 3.17 e 3.18 viene calcolato il volume massimo e la quantità massima di matrice organica presente sulle platee di compostaggio attivo. Sebbene durante il processo si verifichi una riduzione in volume e peso del materiale in trasformazione, i calcoli vengono riferiti al volume ed al peso della matrice in entrata all'area di stabilizzazione.

EQUAZIONE 3-17 (SC-FORSU; SC-VERDE)

$$comp_vol = vol_3 \times comp_res \quad (\text{SC-FORSU})$$

$$comp_vol = vol_2 \times comp_res \quad (\text{SC-VERDE})$$

dove: *comp_vol* volume massimo (m³) di matrice organica presente nell'aia di compostaggio attivo

comp_res tempo di residenza (giorni) della matrice organica in trasformazione nell'area di compostaggio attivo; nel modello SC-VERDE, il tempo di residenza è comprensivo della fase di compostaggio attivo e di quella di finissaggio (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-18 (SC-FORSU; SC-VERDE)

$$comp_mass = (mass_3 + water_3) \times comp_res \quad (SC-FORSU)$$

$$comp_mass = mass_2 \times comp_res \quad (SC-VERDE)$$

dove: *comp_mass* quantità massima (t) di matrice organica presente nell'area di compostaggio; questo quantitativo è destinato ad essere rivoltato secondo la cadenza stabilita; nel modello SC-VERDE, il tempo di residenza è comprensivo della fase di compostaggio attivo e di quella di finissaggio (cfr. Tabella A2.3)

Ai fini di semplificare le procedure di calcolo, la densità apparente del materiale tal quale (umido), al termine della fase di finissaggio, è assunta come sostanzialmente coincidente con quella della matrice stabilizzata, alla fine dello stadio di compostaggio attivo.

EQUAZIONE 3-19 (SC-FORSU)

$$cur_vol = vol_4 \times cur_res$$

dove: *cur_vol* volume di matrice organica stabilizzata (m³) presente nell'area di finissaggio
cur_res tempo di residenza (giorni) della matrice organica sull'area di finissaggio (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-20 (SC-FORSU flusso F_s ; SC-VERDE flusso V_3)

$$dry_mass_5 = dry_mass_4 \times (1 - cur_red) \quad (F5)$$

dove: *dry_mass_5* flusso di compost grezzo, in termini di peso secco (t/giorno), in uscita dall'area di finissaggio

cur_red perdita in peso secco (%) della matrice organica durante la fase di finissaggio; nel modello SC-FORSU viene assunta una riduzione uguale al 10% (cfr. Tabella A2.3)

$$dry_mass_3 = dry_mass_2 \times (1 - all_comp_red)(V_3)$$

dove: *dry_mass_3* flusso di compost grezzo, in termini di peso secco (t/giorno), in uscita dall'area di compostaggio

all_comp_red perdita in peso secco (%) della matrice organica durante l'intero ciclo di compostaggio (fase attiva + finissaggio); nel modello SC-VERDE viene assunta una riduzione uguale al 40% (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-21 (SC-FORSU flusso F_5 ; SC-VERDE flusso V_3)

$$mass_5 = dry_mass_5 / (1 - raw_compost_moist) \quad (F_5)$$

$$mass_3 = dry_mass_3 / (1 - raw_compost_moist) \quad (V_3)$$

dove: $mass_5$; $mass_3$ flusso di compost non raffinato, in termini di sostanza umida (t/giorno), in uscita dall'area di processo e destinata alla vagliatura finale

$raw_compost_moist$ umidità (% peso fresco) del compost non raffinato, in uscita dall'area di processo

EQUAZIONE 3-22 (SC-FORSU flusso $F_{6u/s}$; SC-VERDE flusso $V_{4u/s}$)

$$mass_6_{u/s} = mass_5 \times (1 - post_screen) \quad (F_{6u/s})$$

dove: $mass_6_{u/s}$ peso umido (t/giorno) del compost raffinato, passante al vaglio secondario (\varnothing 3 cm)

$post_screen$ frazione di sopravaglio espressa come % del compost grezzo in entrata al vaglio secondario; nel modello SC-FORSU si assume il valore 0,05 (cfr. Tabella A2.3)

$$mass_4_{u/s} = mass_3 \times (1 - post_screen) \quad (V_{4u/s})$$

dove: $mass_4_{u/s}$ peso umido (t/giorno) del compost raffinato, passante al vaglio (\varnothing 3 cm)

$post_screen$ frazione di sopravaglio espressa come % del compost grezzo sottoposto a vagliatura finale; nel modello SC-VERDE si assume il valore 0,03 (cfr. Tabella A2.3)

EQUAZIONE 3-23 (SC-FORSU flusso $F_{6o/s}$; SC-VERDE flusso $V_{4o/s}$)

$$dry_mass_6_{u/s} = dry_mass_5 \times (1 - post_screen) \quad (F_{6o/s})$$

$$dry_mass_4_{u/s} = dry_mass_3 \times (1 - post_screen) \quad (V_{4o/s})$$

dove: $dry_mass_6_{u/s}$; $dry_mass_4_{u/s}$ quantità di compost raffinato ottenuto, espressa come sostanza secca (t/giorno)

EQUAZIONE 3-24 (SC-FORSU flusso $F_{6o/s}$; SC-VERDE flusso $V_{4o/s}$)

$$mass_6_{o/s} = mass_5 - mass_6_{u/s} \quad (F_{6o/s})$$

$$mass_4_{o/s} = mass_3 - mass_4_{u/s} \quad (V_{4o/s})$$

dove: $mass_6_{o/s}$; $mass_4_{o/s}$ quantità (t/giorno) di sopravaglio risultante dalla fase di raffinazione finale del compost grezzo, da destinarsi a scarica

EQUAZIONE 3-25 (SC-FORSU)

$$land_mass = mass_2_{o/s} + mass_6_{o/s}$$

dove: $land_mass$ flusso complessivo, espresso come sostanza umida (t/giorno), relativo ai materiali di rigetto derivanti dalla vagliatura primaria e secondaria e destinati allo smaltimento in discarica

EQUAZIONE 3-26 (SC-FORSU; SC-VERDE)

$$land_vol = (land_mass/stor_dens) \times stor_res$$

dove: $land_vol$ volume giornaliero (m³/giorno) dei materiali di rigetto, derivanti dalle operazioni di vagliatura e destinati allo stoccaggio provvisorio prima dello smaltimento in discarica

$stor_dens$ densità apparente (kg/m³) dei materiali di rigetto in stoccaggio provvisorio (cfr. Tabella A3.1)

$stor_restempo$ di stoccaggio provvisorio dei materiali di rigetto (giorni)

A2.4 Dimensionamento delle attrezzature

Un riferimento per il calcolo del numero e della potenzialità delle macchine operatrici necessarie all'attuazione delle filiere di compostaggio rappresentate dai modelli SC-FORSU e SC-VERDE è riportato in Tabella A2.4. La capacità oraria delle stazioni di compostaggio è calcolata su un arco di ricezione dei rifiuti pari ad 8 ore. Alcune assunzioni riportate nelle note servono a correlare il flusso di rifiuti attraverso la stazione di compostaggio con il numero delle attrezzature da adottare. Ciò significa che, delle macchine operatrici, viene fornita una potenzialità di lavoro tipica, cui riferirsi per multipli discreti. Le richieste energetiche nell'ambito della stazione di compostaggio sono dovute sia al funzionamento delle attrezzature e delle macchine sia alla gestione degli edifici di lavoro. L'energia è necessaria sia sotto forma di elettricità che di carburanti. Entrambi i tipi di energia sono calcolati separatamente e sono espressi come funzione lineare del flusso di rifiuti in entrata. Il numero di unità relativo alle diverse attrezzature, con relative esigenze energetiche, è computato separatamente per ogni tipo di macchinario.

A2.4.1 Vagli a tamburo rotante

Per la vagliatura della FORSU fresca (matrice pesante), viene assunto un consumo specifico lordo di energia corrispondente a 1,1 kWh/t. D'altra parte, per la vagliatura del compost grezzo (matrice leggera) a valle della fase di finissaggio, si considera un valore di 0,8 kWh/t.

EQUAZIONE 4-1

$$pre_trommel_hp = pre_trm_hp_coeff \times (mass_1/oper_hrs) \quad (SC-FORSU)$$

dove: $pre_trommel_hp$ potenza (HP) richiesta per la vagliatura primaria della FORSU fresca

pre_trm_hp_coeff richiesta unitaria lorda di potenza (HP/t/h); valore assunto: 1,47 HP/t/h
oper_hrs numero di ore di operatività; è considerato un monte di 8 h/giorno

EQUAZIONE 4-2

$$post_trommel_hp = post_trm_hp_coeff \times (mass_5/oper_hrs) \quad (SC-FORSU)$$

$$post_trommel_hp = post_trm_hp_coeff \times (mass_3/oper_hrs) \quad (SC-VERDE)$$

dove: *post_trommel_hp* potenza (HP) richiesta per la vagliatura del compost grezzo in uscita dalla fase di finissaggio

post_trm_hp_coeff richiesta unitaria lorda di potenza (HP/t/h); valore assunto: 1,07 HP/t/h

Il numero di vagli a tamburo rotante richiesto secondo i modelli SC-FORSU e SC-VERDE è calcolato in Tabella A2.4. Viene preso come riferimento per la computazione un vaglio con potenzialità di trattamento pari a 50 t/h.

EQUAZIONE 4-3

$$num_trommel = (pre_trm_num_coeff + post_trm_num_coeff) \times mass_1 \times redund_screen_fact \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove: *num_trommel* unità installate di vagli a tamburo rotante.

pre_trm_num_coeff numero di vagli primari rispetto al quantitativo di rifiuti in entrata alla stazione di compostaggio (numero di vagli/t/giorno); si assume il valore di 0,0025 per la FORSU

post_trm_num_coeff numero di vagli secondari rispetto al quantitativo di rifiuti in entrata alla stazione di compostaggio (numero di vagli/t/giorno); si assumono rispettivamente i valori di 0,00116 per la FORSU e di 0,00145 per i residui organici da raccolta alla fonte

redund_screen_fact fattore di ridondanza per i vagli a tamburo rotante; si assume il valore 1

(1) Come unità di riferimento per calcolare le necessità in fase di vagliatura primaria, è stato assunto un vaglio rotante della capacità di 50 t/h;

(2) Come unità di riferimento per calcolare le necessità in fase di vagliatura finale, è stato assunto un vaglio rotante della capacità di 50 t/h;

(3) Come unità di riferimento, è stato assunto un mulino a martelli orizzontale della capacità di 42,5 t/h;

(4) Come unità di riferimento, è stato assunto un trituratore a tramoggia rotante della capacità di 32,5 t/h;

(5) (6) È stata considerata, come riferimento, una vasta casistica di impianti, a livello internazionale, che trattano quantitativi giornalieri di rifiuti compresi tra 50 e 100 t;

(7) Come unità di riferimento, è stata assunta una macchina volta-cumuli (tipo Scarab) con capacità di rivoltamento di 1.700 t/h.

Oltre al flusso di rifiuti in entrata, per la stima delle macchine operatrici necessarie si è tenuto conto anche dei tempi di residenza nelle aie di compostaggio e della cadenza dei rivoltamenti.

Nel caso del modello SC-VERDE, la capacità di trattamento relativamente ai rifiuti organici in entrata all'impianto è condizionata dal quantitativo di agente strutturante ligno-cellulosico, laddove impiegato per mitigare l'umidità.

Tabella A2.4 – Numero delle macchine operatrici in funzione della capacità di trattamento della stazione di compostaggio, secondo le filiere previste dai modelli SC-FORSU e SC-VERDE.

Capacità impianto (t/giorno)	Capacità impianto (t/h)	Pre-vaglio FORSU (1)	Post-vaglio FORSU (2)	Post-vaglio VERDE (2)	Mulino a martelli (3)	Trituratore a tramoggia rotante (4)	Pala mec. a caric. frontale (5)	Muletti a caric. frontale (6)	Macchina rivoltatrice FORSU (7)
50	6,3	0,125	0,059	0,073	0,13	0,19	(FORSU) 1 (VERDE) 1	(FORSU) 0 (VERDE) 1	0,234
100	12,5	0,250	0,116	0,145	0,25	0,38	(FORSU) 1 (VERDE) 2	(FORSU) 1 (VERDE) 1	0,467
500	62,5	1,250	0,581	0,726	1,25	1,92	(FORSU) 2 (VERDE) 3	(FORSU) 2 (VERDE) 2	2,335
1000	125,0	2,500	1,163	1,453	2,50	3,83	(FORSU) 3 (VERDE) 5	(FORSU) 3 (VERDE) 3	4,671

A2.4.2 Mulini a martelli orizzontali

L'equazione che stabilisce la relazione tra potenza (HP) e flusso di materiali (t/h) attraverso il mulino si basa su dati sperimentali che correlano le richieste di energia alla matrice in ingresso, in modo tale da ottenere un substrato di dimensione voluta delle particelle. Una richiesta di potenza compresa tra 10 e 20 HP/t/h è da considerare come norma nelle operazioni di dilacerazione della FORSU mediante mulino a martelli. Qui viene assunto, in via prudenziale, il valore di 20 HP/t/h. È fissato inoltre il valore di 5 cm come dimensione delle particelle a fine trattamento, valore pienamente compatibile con le esigenze del processo (cfr. Cap. 2, 2.4.5).

EQUAZIONE 4-4

$$\text{hammer_hp} = 20 \times (\text{mass}_{2_{u/s}} / \text{oper_hrs}) \times \text{input_coeff} \times \text{size_coeff} \quad (\text{SC-FORSU})$$

- dove:
- hammer_hp* potenza netta (HP) richiesta al mulino
 - 20 coefficiente di richiesta unitaria di potenza (HP/t/h) dipendente dalla dimensione delle particelle del prodotto
 - input_coeff* fattore di assorbimento di energia dipendente dalle caratteristiche della matrice in ingresso; per la FORSU si assume il valore di 0,65
 - size_coeff* fattore di assorbimento di energia dipendente dalla dimensione delle particelle desiderata; per la FORSU si assume il valore di 1,64 corrispondente a un prodotto con particelle di 5 cm

Il numero di mulini a martello è espresso come funzione della capacità di trattamento giornaliera (t/giorno) impiegando come valore medio quello di una macchina capace di dilacerare 42,5 t/h (cfr. Tabella A2.4).

EQUAZIONE 4-5

$$\text{num_hammer} = \text{hammer_coeff} \times \text{mass_2}_{u/s} \times \text{redund_hammer_fact} \quad (\text{SC-FORSU})$$

dove: *num_hammer* unità installate di mulini a martelli

hammer_coeff coefficiente che correla il numero di mulini a martelli con il flusso rifiuti (numero di mulini a martelli/t/giorno); viene assunto per il modello SC-FORSU il valore 0,0025 relativo alla FORSU

redund_hammer_fact fattore di ridondanza per il mulino a martelli; si assume il valore 1

A2.4.3 Trituratore a tramoggia rotante

L'equazione che correla la potenza del trituratore a tramoggia rotante con il flusso di rifiuti tiene conto di un intervallo di potenze compreso tra 325 e 575 HP, che corrisponde ad una capacità di trattamento compresa tra 25 e 40 t/h. Dalla suddetta assunzione, viene dedotto ed applicato il coefficiente 13,7 HP/ t/h come richiesta unitaria di potenza.

EQUAZIONE 4-6

$$\text{tubgrinder_hp} = 13,7 \times (\text{mass_1}/\text{oper_hrs}) \quad (\text{SC-VERDE})$$

dove: *tubgrinder_hp* potenza lorda (HP) richiesta al trituratore a tramoggia rotante per il condizionamento meccanico dei rifiuti organici da raccolta differenziata alla fonte

13,7 coefficiente di richiesta unitaria di potenza (HP/t/h)

Il numero di trituratori a tramoggia rotante è espresso come funzione della capacità di trattamento giornaliera (t/giorno) impiegando come valore medio quello di una macchina capace di dilacerare 32,5 t/h (cfr. Tabella A2.4).

EQUAZIONE 4-7

$$\text{num_tubgrinder} = \text{grinder_coeff} \times \text{mass_1} \times \text{redund_grinder_fact} \quad (\text{SC-VERDE})$$

dove: *num_tubgrinder* unità operanti di trituratori a tramoggia rotante

grinder_coeff coefficiente che correla il numero trituratori a tramoggia rotante con il flusso di rifiuti (numero di trituratori/t/giorno); viene assunto per il modello SC-VERDE il valore 0,003846 relativo ai residui organici da raccolta alla fonte

redund_grinder_fact fattore di ridondanza per il trituratore a tramoggia rotante; si assume il valore 1

Per un tipico motore diesel da macchina operatrice, viene qui assunto un consumo medio di gasolio ($D = 0,82$) equivalente a 180 g/h/HP. Questo coefficiente verrà in seguito impiegato anche per il calcolo dei consumi sia delle macchine volta-cumuli sia delle pale meccaniche e dei muletti.

EQUAZIONE 4-8

$$tubgrinder_diesel = 180 \times tubgrinder_hp \quad (\text{SC-VERDE})$$

dove: *tubgrinder_diesel* consumo medio di gasolio (g/h) del trituratore

A2.4.4 Macchina volta-cumuli semovente

Questo tipo di macchina è previsto nella filiera descritta dal modello SC-FORSU. La potenza richiesta dalla macchina operatrice è funzione della propria capacità di lavoro (t/h) e della frequenza dei rivoltamenti (cfr. Tabella A2.3).

EQUAZIONE 4-9

$$turn_req = (comp_mass \times turn_freq) / (oper_hrs \times days_week) \quad (\text{SC-FORSU})$$

dove: *turn_req* quantità di matrice organica in fase di compostaggio attivo per la quale è richiesto il rivoltamento su base operativa oraria (t/h)

turn_freq numero di rivoltamenti su base settimanale; per la FORSU si assume la cadenza di 3 rivoltamenti/settimana (cfr. Tabella A2.3)

days_week giorni di lavoro su base settimanale; viene assunto il valore di 5 giorni/settimana

Al fine di correlare la potenza della macchina volta-cumuli con la capacità di rivoltamento (t/h), vengono presi a riferimento motori con potenze tra 177 e 450 HP, corrispondenti a capacità operative comprese tra 900 e 2.625 t/h (sulla base delle indicazioni disponibili per macchine tipo Scarab).

EQUAZIONE 4-10

$$turn_hp = 0,183 \times turn_req \quad (\text{SC-FORSU})$$

dove: *turn_hpp* potenza (HP) richiesta alla macchina volta-cumuli per il rivoltamento programmato della FORSU in aia di compostaggio attivo

0,183 coefficiente di richiesta unitaria di potenza (HP/t/h)

Il numero di macchine rivoltatrici è correlato al flusso di rifiuti in entrata alla stazione di compostaggio prendendo a riferimento una macchina con capacità di rivoltamento di 1.700 t/h, che rappresenta un valore medio delle capacità operative nell'ambito dei rivoltatori semoventi disponibili sul mercato.

EQUAZIONE 4-11

$$num_turner = turner_coeff \times mass_3 \times redund_turner_fact \quad (SC-FORSU)$$

dove: num_turner numero di macchine volta-cumuli operanti

$turner_coeff$ coefficiente che correla il numero di rivoltatori semoventi con il flusso di matrice organica da movimentare (numero di macchine volta-cumulo/t/giorno); per lo schema descritto dal modello SC-FORSU viene adottato il valore 0,00467

$redund_turner_fact$ fattore di ridondanza per la macchina volta-cumuli semovente; si assume il valore 1

Per mettere in relazione il consumo di gasolio della macchina rivoltatrice con la propria capacità di rivoltamento (t/h), viene assunto un consumo di carburante di ca. 30 g/t, valido per macchine con capacità operative comprese tra 900 e 2.625 t/h (indicazioni riferite a rivoltatori tipo Scarab).

EQUAZIONE 4-12

$$turner_diesel = 30 \times turn_req \quad (SC-FORSU)$$

dove: $turner_diesel$ consumo medio orario di gasolio della macchina volta-cumuli (g/h)

Le ore di attività della macchina rivoltatrice semovente sono necessarie per il calcolo dei costi di manutenzione, solitamente indicati dal costruttore. Il computo delle ore di lavoro della macchina volta-cumuli è qui derivato prendendo in considerazione una rivoltatore della capacità operativa media di 1.700 t/h.

EQUAZIONE 4-13

$$turner_hrs = (comp_mass \times turn_freq) / 1.700 \quad (SC-FORSU)$$

dove: $turner_hrs$ ore operative della macchina volta-cumuli su base settimanale (h/settimana)

1.700 capacità oraria media di rivoltamento (t/h)

A2.4.5 Pale meccaniche (FEL) e muletti (BCATS) a caricamento frontale

Macchine tipo FEL (*front end loader*) e/o del tipo BCAT (*bobcat*) sono impiegate per la movimentazione dei materiali nell'ambito della stazione di compostaggio. In particolare, queste vengono usate per la gestione dei rifiuti sull'area di ricezione, per allestire i cumuli nonché per rimuovere/trasferire la matrice organica stabilizzata o il compost, rispettivamente, dall'area di compostaggio attivo e da quella di finissaggio. Non è possibile associare a ciascuna macchina uno specifico flusso di materiali, dal momento che FELs e BCATs intervengono in molteplici operazioni. Di conseguenza, il numero di unità impiegate nell'ambito delle stazioni di compostaggio descritte dai modelli SC-FORSU e SC-VERDE viene correlato al flusso complessivo di rifiuti in entrata all'impianto.

Per quanto riguarda le macchine tipo FEL, viene assunto come modello di riferimento una pala meccanica di potenza 150 HP, con consumi medi dell'ordine di 27 kg/h di gasolio. D'altra parte, come modello di riferimento per le macchine tipo BCAT, viene assunto un muletto di 40 HP, con consumi medi di gasolio corrispondenti a 7,2 kg/h.

EQUAZIONE 4-14

$$num_FEL = FEL_coeff \times mass_1 \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: num_FEL numero di pale meccaniche operanti

FEL_coeff coefficiente che correla il numero di pale meccaniche a caricamento frontale con il flusso di matrice organica da movimentare (numero di pale meccaniche/t/giorno); per lo schema descritto dal modello SC-FORSU viene adottato il valore 0,00382 mentre per il modello SC-VERDE si assume il valore 0,00523

EQUAZIONE 4-15

$$num_BCAT = BCAT_coeff \times mass_1 \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: num_BCAT numero di muletti a caricamento frontale operanti

$BCAT_coeff$ coefficiente che correla il numero di muletti a caricamento frontale con il flusso di matrice organica da movimentare (numero di muletti/t/giorno); per lo schema descritto dal modello SC-FORSU viene adottato il valore 0,00321 mentre per il modello SC-VERDE si assume il valore 0,00334

La potenza di un tipico FEL è assunta in 150 HP, mentre 40 HP è considerata la potenza di riferimento di un BCAT. È da tener presente inoltre che queste macchine non operano necessariamente per il 100% dell'orario di lavoro (8 h/giorno). Nello schema descritto dal modello SC-FORSU, viene applicato un coefficiente di funzionamento del 50% ai FELs e del 75% ai BCATs. Per la filiera SC-VERDE, i coefficienti sono invece 75% per i FELs e 100% per i BCATs. Sulla base delle suddette indicazioni, è possibile calcolare, relativamente a queste macchine operatrici, la potenza richiesta per le operazioni ed i consumi.

EQUAZIONE 4-16

$$FEL_hp = num_FEL \times 150 \times oper_FEL_coeff \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: FEL_hp potenza (HP) richiesta ai FELs

$oper_FEL_coeff$ percentuale di funzionamento dei FELs rispetto al tempo complessivo giornaliero di operatività dell'impianto; 0,50 per SC-FORSU e 0,75 per SC-VERDE

EQUAZIONE 4-17

174 $FEL_diesel = 180 \times FEL_hp \quad (\text{SC-FORSU ; SC-VERDE})$

dove: FEL_{diesel} consumo orario di gasolio (g/h) per i FELs

EQUAZIONE 4-18

$$BCAT_{hp} = num_{BCAT} \times 40 \times oper_{BCAT_coeff} \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove: $BCAT_{hp}$ potenza (HP) richiesta ai BCATs
 $oper_{BCAT_coeff}$ percentuale di funzionamento dei BCATs rispetto al tempo complessivo giornaliero di operatività dell'impianto; 0,75 per SC-FORSU e 1,0 per SC-VERDE

EQUAZIONE 4-19

$$BCAT_{diesel} = 180 \times BCAT_{hp} \quad (SC-FORSU ; SC-VERDE)$$

dove: FEL_{diesel} consumo orario di gasolio (g/h) per i BCATs

A2.4.6 Sistema di aerazione forzata

Un tipico sistema di insufflazione forzata d'aria, funzionante sulla base di un programma di tempi preimpostati, deve garantire, durante i periodi di attività, un apporto d'aria di almeno 0,5 m³/min per t di matrice organica, in termini di peso secco. Per aerare 100 t di FORSU stabilizzata (umidità 45%), è sufficiente una soffiante da 0,5 HP, operante per 1/3 del tempo contro 2/3 di pausa. Nelle condizioni previste dalla filiera descritta dal modello SC-FORSU (altezza dei cumuli di matrice organica in finissaggio: 2 m; densità apparente della matrice organica in finissaggio: 0,55) di si assume un coefficiente di 0,005 HP/m² di aia di finissaggio, con la lunghezza massima dei tubi adduttori fissata in 25 m.

EQUAZIONE 4-20

$$aerat_{hp} = 0,005 \times cur_{pad} \quad (SC-FORSU)$$

dove: $aerat_{hp}$ potenza (HP) necessaria per l'insufflazione forzata di aria nei cumuli di matrice organica disposta sull'aia di finissaggio
 cur_{pad} superficie (m²) dell'aia di finissaggio

Perciò, la richiesta annuale di energia per rendere operativo il sistema di aerazione forzata può essere stimato come segue:

EQUAZIONE 4-21

$$aerat_{energy_annual} = aerat_{hp} \times oper_{aerat_hrs} \times oper_{days} \times 0,746 \quad (SC-FORSU)$$

dove: $aerat_{energy_annual}$ energia su base annua (kWh/anno) necessaria per il sistema di insufflazione forzata d'aria
 $oper_{aerat_hrs}$ ore di lavoro del sistema di insufflazione forzata d'aria su base giornaliera

oper_days giorni operativi della stazione di compostaggio su base annu; si assume il valore di 262 giorni/anno

0,746 kW/HP

A2.4.7 Sistema di abbattimento degli odori

La richiesta di energia (costi di funzionamento) necessaria per i biofiltri è legata soprattutto ai tempi di lavoro degli aspiratori che convogliano l'aria da trattare alle unità filtranti. Sulla scorta di dati operativi relativi ad un vasto numero di casi, viene assunto un coefficiente di 0.0015 HP/m³ di ambiente interessato all'evacuazione dell'aria.

EQUAZIONE 4-23

$$deodor_hp = 0,0015 \times (vol_comp_build + vol_cur_build) \quad (SC-FORSU)$$

dove: *deodor_hp* potenza (HP) necessaria per l'aspirazione dell'aria dai locali di compostaggio attivo e di finissaggio e l'adduzione della stessa ai biofiltri

vol_comp_build + vol_cur_build volume interno degli edifici che ospitano le aie di compostaggio attivo e quelle di finissaggio

Perciò, la richiesta annuale di energia per rendere operativo il sistema di captazione degli odori può essere stimato come segue:

EQUAZIONE 4-24

$$deodor_energy_annual = deodor_hp \times oper_deodor_hrs \times oper_days \times 0,746 \quad (SC-FORSU)$$

dove: *deodr_energy_annual* energia su base annua (kWh/anno) necessaria per il sistema di captazione degli odori

oper_deodor_hrs ore di lavoro del sistema di captazione degli odori su base giornaliera

oper_days giorni operativi della stazione di compostaggio su base annua; si assume il valore di 262 giorni/anno

0,746 kW/HP

A2.4.8 Richiesta di energia derivante da carburanti

EQUAZIONE 4-25

$$fuel_energy = (turner_hp + FEL_hp + BCAT_hp) \times oper_hrs \times oper_days \times 0,746 \quad (SC-FORSU)$$

$$fuel_energy = (grinder_hp + FEL_hp + BCAT_hp) \times oper_hrs \times oper_days \times 0,746 \quad (SC-VERDE)$$

dove: *fuel_energy* energia da carburanti necessaria su base annua (kWh/anno)

A2.4.9 Richiesta di energia elettrica per macchinari

EQUAZIONE 4-26

$$electr_equip = (hammer_hp + trommel_hp) \times oper_hrs \times oper_days \times 0,746 + aerat_energy_annual + deodor_energy_annual \quad (SC-FORSU)$$

$$electr_energy = (trommels_hp) \times oper_hrs \times oper_days \times 0,746 \quad (SC-VERDE)$$

dove: *electr_energy* energia elettrica necessaria su base annua (kWh/anno)

A2.4.10 Energia necessaria per l'operatività degli edifici

L'energia qui computata riguarda i consumi in termini di gas e di elettricità degli edifici adibiti ad uffici, magazzini e servizi. Viene assunto un consumo del 65% in elettricità e del 35% in gas, con una media di 250 kWh/m²/anno.

EQUAZIONE 4-27

$$electr_build = 0,66 \times 250 \times services_area \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove: *elect_build* energia elettrica necessaria su base annua (kWh/anno) per il funzionamento degli edifici di servizio

services_area superficie totale dei locali di servizio (m²)

EQUAZIONE 4-28

$$gas_build = 0,35 \times 250 \times services_area \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove: *gas_build* energia sotto forma di consumi di gas necessaria su base annua (kWh/anno) per il funzionamento degli edifici di servizio

A2.5 Calcolo delle superfici

A2.5.1 Area di preparazione

L'area di preparazione comprende la platea di ricezione dei residui organici, le aree per la triturazione/dilacerazione dei rifiuti nonché per la vagliatura dei materiali e le superfici di stazionamento delle macchine operatrici (volta-cumuli, pale meccanica, muletti a caricamento frontale).

EQUAZIONE 5-1

$$stag_area = tipp_area \times tipp_mvr + scr_area \times scr_mvr \quad (SC-FORSU ; SC-VERDE)$$

dove: *stag_area* superficie totale dell'area di preparazione (m²)

tipp_area superficie della platea di ricezione (m²)

<i>tipp_mvr</i>	fattore di correzione relativo agli spazi di manovra per la platea di ricezione; si assume il valore 2
<i>scr_area</i>	superficie delle aree destinate alla triturazione/dilacerazione, alla vagliatura, allo stazionamento delle macchine operatrici (m ²)
<i>scr_mvr</i>	fattore di correzione relativo agli spazi di manovra per le aree di condizionamento dei materiali e di stazionamento delle macchine operatrici; si assume il valore 1,5

EQUAZIONE 5-2

$$tipp_area = (stor_tipp \times vol_1) / tipp_height \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: <i>tipp_area</i>	superficie della platea di ricezione (m ²)
<i>stor_tipp</i>	tempo massimo di stoccaggio dei rifiuti in entrata all'impianto; si assume il tempo di 2 giorni
<i>tipp_height</i>	altezza massima dello strato di rifiuti sulla platea di ricezione; si assume il valore di 2 m

L'area di triturazione/dilacerazione e vagliatura viene calcolata come funzione del numero di macchinari presenti (tritinatori, mulini, vagli) e della superficie da questi occupati. È computato anche uno spazio per lo stazionamento delle macchine operatrici.

Tabella A2.5 – Superficie di ingombro relativa a diverse attrezzature ricorrenti nelle filiere di compostaggio della frazione organica da raccolta secco/umido dei rifiuti urbani (SC-FORSU), ovvero dei residui organici da raccolta differenziata alla fonte (SC-VERDE). (Dati assunti come tipici, sulla base delle specifiche di numerosi costruttori).

Tipo di attrezzatura	Superficie d'ingombro (m ²) – (<i>equip_coeff</i>)
Mulino a martelli (con nastro convogliatore) (HAMMER)	25
Trituratore a tramoggia rotante (TUBGRINDER)	35
Vaglio a tamburo rotante (TROMMEL)	50
Macchina semovente volta-cumuli (TURNER)	50
Pala meccanica con cucchiaio frontale (FEL)	25
Muletto a caricamento frontale (BCAT)	5

EQUAZIONE 5-3

$$scr_area = equip_coeffhammer \times num_hammer + equip_coefftubgrinder \times num_tubgrinder + equip_coefftrommel \times (num_pre_trommel + num_post_trommel) + equip_coeffFEL \times num_FEL + equip_coeffBCAT \times num_BCAT + equip_coeffturner \times num_turner \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: <i>scr_area</i>	superficie delle aree di condizionamento dei materiali e per lo stazionamento delle macchine operatrici (m ²)
-----------------------	---

equip_coeff cfr. Tabella A2.5

A2.5.2 Area di compostaggio attivo

L'area destinata al compostaggio attivo, nel caso della filiera descritta dal modello SC-FORSU, è calcolata tenendo conto della geometria delle andane compatibile con una macchina rivoltatrice semovente (tipo Scarab), (cfr. A2.1.1). Per il modello SC-VERDE, essendo il rivoltamento effettuato con pala meccanica, è prevista una diversa geometria dei cumuli (cfr. Cap. 4, 4.2.1).

A2.5.2.1 Predisposizione per rivoltamento delle andane con macchina semovente (SC-FORSU)

EQUAZIONE 5-4

$$vol_windrow_l = [(windrow_width + windrow_crown/2] \times windrow_height$$

dove: $vol_windrow_l$ volume di materiale per metro lineare (m³/m) di andana

$windrow_width$ larghezza dell'andana alla base; si assume il valore di 4,5 m (intervallo più comune: 3-6 m)

$windrow_crown$ larghezza della corona (base superiore) dell'andana; si assume il valore di 1 m (intervallo più comune: 0,3-1,8 m)

$windrow_height$ altezza dell'andana; si assume il valore di 2 m (intervallo più comune: 1,50-2,10 m)

EQUAZIONE 5-5

$$tot_windrow_length = comp_vol/vol_windrow_l$$

dove: $tot_windrow_length$ lunghezza totale delle andane richiesta (m)

EQUAZIONE 5-6

$$windrow_length = tot_windrow_length/num_windrows$$

dove: $windrow_length$ lunghezza di una singola andana (m)

$num_windrows$ numero di andane poste in parallelo; si assume il valore 6, corrispondente al numero di andane che consentono, a parità di volumi trattati, l'impiego dell'area più piccola

EQUAZIONE 5-7

$$alley_area = (num_windrow - 1) \times alley_width \times windrow_length$$

dove: $alley_area$ superficie totale dei corridoi tra le andane (m²)

$alley_width$ larghezza dei corridoi tra le andane; si assume il valore di 1 m (intervallo più comune: 0,60-1,20 m)

EQUAZIONE 5-8

$$side_area = 2 \times side_width \times windrow_length$$

dove: *side_area* superficie totale non ingombra dalle andane (m²)

side_width larghezza delle fasce perimetrali; si assume il valore di 1,5 m (intervallo più comune: 1,3-1,7 m)

Il raggio di sterzata necessario per la macchina rivoltatrice è indipendente dal flusso di rifiuti in entrata all'impianto. Tuttavia, poiché nei modelli presi a base progettuale le richieste devono essere espresse come funzione lineare del flusso di matrice organica trattata, il raggio di manovra viene rapportato alla potenzialità della stazione di compostaggio. Prendendo a riferimento una rivoltatrice semovente tipo Scarab, l'intervallo tipico del raggio di sterzata da considerare varia da 6,5 (100 t/giorno) a 10,5 m (1.000 t/giorno), passando per 8,5 m (500 t/giorno). Sulla base di queste assunzioni, l'equazione che correla linearmente il flusso di rifiuti con il raggio di sterzata necessario alla macchina volta-cumuli è il seguente:

EQUAZIONE 5-9

$$turn_clear = 0,0135 \times mass_1$$

dove: *turn_clear* ampiezza del raggio di manovra della macchina volta-cumuli (m)
0,0135 coefficiente di correlazione tra ampiezza del raggio di manovra e flusso di rifiuti in entrata (m/t/giorno)

EQUAZIONE 5-10

$$turn_area = 2 \times turn_clear \times [(side_width \times 2) + (num_windrows \times windrow_width) + (num_windrows - 1) \times alley_width]$$

dove: *turn_area* superficie totale di manovra richiesta (m²)

Siccome la filiera funziona come un sistema quasi continuo, la matrice organica fresca in entrata nell'area di compostaggio attivo è sistemata all'inizio di una andana, mentre il materiale stabilizzato è rimosso dall'altra estremità dell'andana stessa. Ciò comporta l'allestimento di un cumulo aggiuntivo nel quale la pala meccanica scarica momentaneamente la matrice fresca, in attesa che il substrato stabilizzato venga asportato da un cumulo finito. Questo cumulo aggiuntivo di servizio deve essere computato nel calcolo della superficie totale dell'area di compostaggio attivo.

EQUAZIONE 5-11

$$windrow_area = (num_windrows + 1) \times windrow_width \times windrow_length$$

dove: *windrow_area* superficie totale (m²) occupata dalle andane

EQUAZIONE 5-12

$$\text{compost_pad} = \text{windrow_area} + \text{alley_area} + \text{side_area} + \text{turn_area}$$

dove: *compost_pad* superficie totale (m²) richiesta per l'aia di compostaggio attivo

A2.5.2.2 Predisposizione per rivoltamento dei cumuli con pala meccanica (SC-VERDE)

EQUAZIONE 5-13

$$\text{vol_pile_l} = \text{pile_height} \times (\text{pile_height} \times \text{pile_wh_ratio}) / 2$$

dove: *vol_pile_l* volume di materiale per metro lineare (m³/m) di cumulo

pile_height altezza del cumulo; si assume il valore di 3 m

pile_wh_ratio rapporto tra larghezza ed altezza del cumulo; si assume il valore di 2, solitamente applicato

EQUAZIONE 5-14

$$\text{tot_pile_length} = \text{comp_vol} / \text{vol_pile_l}$$

dove: *tot_pile_length* lunghezza totale dei cumuli richiesta (m)

EQUAZIONE 5-15

$$\text{pile_area} = \text{pile_length} \times \text{pile_height} \times \text{pile_wh_ratio}$$

dove: *pile_area* superficie (m²) richiesta per l'allestimento dei cumuli necessari per la fase di compostaggio attivo

EQUAZIONE 5-16

$$\text{compost_pad} = \text{pile_area} \times \text{pile_mnv}$$

dove: *compost_pad* superficie (m²) dell'aia di compostaggio attivo per la gestione dei cumuli rivoltati con pala meccanica

pile_mnv fattore di incremento per gli spazi di manovra necessari alla pala meccanica per le operazioni di rivoltamento dei cumuli; si assume il valore di 2,25 (intervallo più comune: 2-2,5)

A2.5.3 Area di finissaggio

L'area destinata al finissaggio, nel caso della filiera descritta dal modello SC-FORSU, è calcolata tenendo conto del fatto che la maturazione avviene in cumuli statici aerati. Nel modello SC-VERDE, il finissaggio avviene invece in cumuli rivoltati con pala meccanica.

A2.5.3.1 Finissaggio in cumuli statici con aerazione forzata (SC-FORSU)

EQUAZIONE 5-17

$$vol_cur_staticpile_l = [(cur_staticpile_width + cur_staticpile_crown/2) \times cur_staticpile_height]$$

dove: <i>vol_cur_staticpile_l</i>	volume di materiale per metro lineare (m ³ /m) di cumulo statico in aia di finissaggio
<i>cur_staticpile_width</i>	larghezza del cumulo statico alla base; si assume il valore di 8 m
<i>cur_staticpile_crown</i>	larghezza della corona (base superiore) del cumulo statico; si assume il valore di 3 m
<i>cur_staticpile_height</i>	altezza del cumulo statico; si assume il valore di 2 m

EQUAZIONE 5-18

$$tot_cur_staticpile_length = cur_vol/vol_cur_staticpile_l$$

dove: *tot_cur_staticpile_length* lunghezza totale dei cumuli statici richiesta (m)

EQUAZIONE 5-19

$$num_cur_staticpiles = tot_cur_staticpile_length/cur_staticpile_length$$

dove: <i>num_cur_staticpiles</i>	numero dei cumuli statici da allestire
<i>cur_staticpile_length</i>	lunghezza (m) dei cumuli statici; si assume il valore di 25 m (cfr. A2.4.6)

I cumuli statici vengono allestiti in maniera contigua, l'uno accanto all'altro lungo l'asse longitudinale, senza lasciare corridoi inframmezzati.

EQUAZIONE 5-20

$$cur_staticpile_area = (num_cur_staticpiles) \times cur_staticpile_width \times cur_staticpile_length$$

dove: *cur_staticpile_area* superficie totale (m²) occupata dai cumuli statici aerati mediante insufflazione forzata

EQUAZIONE 5-21

$$cur_staticpile_pad = cur_staticpile_area \times cur_staticpile_mnv$$

dove: <i>cur_staticpile_pad</i>	superficie totale (m ²) dell'aia di finissaggio
<i>cur_staticpile_mnv</i>	fattore di incremento per gli spazi di manovra necessari alla pala meccanica e/o muletto a caricamento frontale per le ope-

razioni di movimentazione del materiale stabilizzato in entrata ed in uscita dall'aia di finissaggio; si assume un valore di 1,25

A2.5.3.2 Finissaggio in cumuli statici con rivoltamento mediante pala meccanica (SC-VERDE)

EQUAZIONE 5-22

$$vol_curpile_l = curpile_height \times (curpile_height \times curpile_wh_ratio)/2$$

dove: $vol_curpile_l$ volume di materiale per metro lineare (m³/m) di cumulo
 $curpile_height$ altezza del cumulo; si assume il valore di 3 m
 $curpile_wh_ratio$ rapporto tra larghezza ed altezza del cumulo; si assume il valore di 2, solitamente applicato

EQUAZIONE 5-23

$$tot_curpile_length = cur_vol/vol_curpile_l$$

dove: $tot_curpile_length$ lunghezza totale (m) richiesta per i cumuli rivoltati in fase di finissaggio

EQUAZIONE 5-24

$$curpile_area = curpile_length \times curpile_height \times curpile_wh_ratio$$

dove: $curpile_area$ superficie (m²) richiesta per l'allestimento dei cumuli rivoltati in fase di finissaggio

EQUAZIONE 5-25

$$curpile_pad = curpile_area \times curpile_mnv$$

dove: $curpile_pad$ superficie (m²) dell'aia di finissaggio per la gestione dei cumuli rivoltati con pala meccanica
 $curpile_mnv$ fattore di incremento per gli spazi di manovra necessari alla pala meccanica per le operazioni di rivoltamento dei cumuli in fase di finissaggio; si assume il valore di 1,5

A2.5.4 Area per lo stoccaggio provvisorio dei residui non compostabili

Viene presa in considerazione una capacità di stoccaggio massima di 2 giorni, prima del trasferimento in discarica dei materiali di scarto.

EQUAZIONE 5-26

$$reject_vol = landfill_vol \times reject_res_time \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove:	<i>reject_vol</i>	volume totale (m ³) dei materiali di scarto destinati allo stoccaggio provvisorio
	<i>landfill_vol</i>	volume giornaliero (m ³ /giorno) dei materiali di scarto da avviare allo smaltimento in discarica
	<i>reject_res_time</i>	tempo massimo di stoccaggio dei materiali di scarto; viene assunto il valore di 2 giorni

EQUAZIONE 5-27

$$vol_rejectpile_l = rejectpile_height \times (rejectpile_height \times rejectpile_wh_ratio) / 2$$

(SC-FORSU; SC-VERDE)

dove:	<i>vol_rejectpile_l</i>	volume dei materiali di scarto per metro lineare (m ³ /m) di cumulo
	<i>rejectpile_height</i>	altezza del cumulo di scarti; si assume il valore di 2 m
	<i>rejectpile_wh_ratio</i>	rapporto tra larghezza ed altezza del cumulo; si assume il valore di 2

EQUAZIONE 5-28

$$tot_rejectpile_length = reject_vol / vol_rejectpile_l \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove:	<i>tot_rejectpile_length</i>	lunghezza totale dei cumuli per lo stoccaggio provvisorio dei materiali di scarto (m)
-------	--------------------------------	---

EQUAZIONE 5-29

$$reject_area = rejectpile_length \times rejectpile_height \times rejectpile_wh_ratio$$

(SC-FORSU; SC-VERDE)

dove:	<i>reject_area</i>	superficie (m ²) richiesta per lo stoccaggio provvisorio dei materiali di scarto
-------	---------------------	--

A2.5.5 Aree di servizio (uffici)

La superficie destinata agli uffici è funzione del numero di persone impiegate con funzioni amministrative. Il numero di addetti all'amministrazione è funzione del flusso di rifiuti in entrata all'impianto.

EQUAZIONE 5-30

$$office_area = off_coeff \times num_office_empl \quad (SC-FORSU; SC-VERDE)$$

dove:	<i>office_area</i>	superficie totale (m ²) occupata da locali destinati alle attività amministrative
-------	---------------------	---

<i>off_coeff</i>	coefficiente di attribuzione di area per uffici; si assume il valore di 25 m ² /impiegato
<i>num_office_empl</i>	numero di unità di personale impiegate nelle funzioni amministrative

A2.5.6 Fascia-tampone intorno all'area occupata dalle installazioni tecnologiche

La fascia-tampone (buffer zone) rappresenta la superficie di terreno libera che contorna l'area delle installazioni impiantistiche. Questa fascia, una volta realizzata la recinzione della stazione di compostaggio (cfr. A2.5.9), impedisce a persone esterne qualsiasi contatto diretto con le strutture tecnologiche. Va precisato che la fascia-tampone non esaurisce di per sé il rispetto delle distanze di sicurezza relativamente ad eventuali obiettivi sensibili nei dintorni dell'impianto (cfr. Cap. 7, 7.2.1).

EQUAZIONE 5-31

$$fac_width = [(stag_area + compost_area + cur_pad + reject_area + office_area)/lw_ratio]^{0.5} + road_width$$

(SC-FORSU ; SC-VERDE)

dove: <i>fac_width</i>	larghezza dell'area occupata dalla stazione di compostaggio (m)
<i>lw_ratio</i>	rapporto tra estensione della lunghezza e della larghezza dell'area occupata dalla stazione di compostaggio; si assume il valore 1
<i>road_width</i>	larghezza delle strade; viene assunto il valore di 4,5 m

EQUAZIONE 5-32

$$fac_length = lw_ratio \times (fac_width - road_width) + road_width$$

(SC-FORSU ; SC-VERDE)

dove: <i>fac_length</i>	lunghezza dell'area occupata dalla stazione di compostaggio (m)
-------------------------	---

EQUAZIONE 5-33

$$buffer_area = 4 \times buffer_dist^2 + 2 \times buffer_dist \times (fac_length + fac_width)$$

(SC-FORSU; SC-VERDE)

dove: <i>buffer_area</i>	superficie della fascia-tampone (m ²)
<i>buffer_dist</i>	distanza dalle strutture impiantistiche; vengono assunti rispettivamente i valori di 15 m per il modello SC-FORSU e di 25 m per il modello SC-VERDE

EQUAZIONE 5-34

$$buffer_area_model = buffer_area_coeff \times mass_1$$

(SC-FORSU; SC-VERDE)

dove: <i>buffer_area_model</i>	fascia-tampone (m ²) correlata linearmente al flusso di rifiuti (m ² /t/giorno) in entrata alla stazione di compostaggio
--------------------------------	---

buffer_area_coeff coefficiente dedotto dalla equazione di regressione lineare; vengono assunti i valori 50 m²/ t/giorno e 110 m²/ t/giorno per il modello SC-FORSU ed il modello SC-VERDE, rispettivamente

A2.5.7 Viabilità

Uno schema tipico prevede la realizzazione di due strade di servizio, l'una corrente lungo la lunghezza e l'altra lungo la larghezza dell'area occupata dalla stazione di compostaggio.

EQUAZIONE 5-35

$road_area = road_width \times (fac_length + fac_width - road_width) + buffer_dist \times road_width$
(SC-FORSU ; SC-VERDE)

dove: *road_area* superficie totale (m²) delle strade di servizio, inclusa la strada di accesso che attraversa la fascia-tampone

EQUAZIONE 5-36

$road_area_model = road_coeff \times mass_1$ (SC-FORSU; SC-VERDE)

dove: *road_area_model* superficie (m²) occupata dalla viabilità, correlata linearmente al flusso di rifiuti (m²/t/giorno) in entrata alla stazione di compostaggio

road_coeff coefficiente dedotto dalla equazione di regressione lineare; vengono assunti i valori 5,5 m²/t/giorno e 7,5 m²/t/giorno per il modello SC-FORSU ed il modello SC-VERDE, rispettivamente

A2.5.8 Superficie totale della stazione di compostaggio

EQUAZIONE 5-37

$fac_area = stag_area + compost_pad + cur_pad + reject_area + office_area + road_area_model + buffer_area_model$
(SC-FORSU ; SC-VERDE)

dove: *fac_area* superficie totale (m²) da acquisire per la realizzazione della stazione di compostaggio

A2.5.9 Recinzione perimetrale della stazione di compostaggio

La stazione di compostaggio deve essere adeguatamente recintata per evidenti motivi di sicurezza. Di solito, è sufficiente una recinzione in rete metallica.

EQUAZIONE 5-38

$fac_perim = 2 \times fac_length + 2 \times fac_width + 8 \times buffer_dist$ (SC-FORSU ; SC-VERDE)

dove: fac_perim perimetro (m) dell'area occupata dalla stazione di compostaggio, ivi compresa la fascia-tampone

È possibile correlare il perimetro della stazione di compostaggio con il flusso di rifiuti in entrata all'impianto, attraverso l'equazione seguente:

EQUAZIONE 5-39

$$fac_perim_model = fac_perim_coeff \times mass_1 \quad (\text{SC-FORSU; SC-VERDE})$$

dove: fac_perim_model perimetro (m) dell'area da recintare

fac_perim_coeff coefficiente di correlazione lineare tra perimetro della stazione di compostaggio e flusso di rifiuti in entrata all'impianto (m/t/giorno); si assumono i valori di 3,5 m/t/giorno e di 5 m/t/giorno, rispettivamente, per il modello SC-FORSU e per quello SC-VERDE

A2.6 Costo della stazione di compostaggio computato su base annua

Il costo annuale viene determinato mediante l'equazione 6.1 ed è dato dalla quota di ammortamento dell'investimento addizionata dei costi annui di esercizio. Le equazioni riportate in questo paragrafo, laddove non esplicitamente indicato, sono applicabili sia al modello SC-FORSU che a quello SC-VERDE.

EQUAZIONE 6-1

$$annual_cost = CFR \times capital_cost + annual_operat_cost$$

dove: $annual_cost$ costo della stazione di compostaggio su base annua (Euro/anno)

CFR fattore di rientro del capitale (capital recovery factor)

$annual_operat_cost$ costi di gestione su base annua (Euro/anno)

Il fattore di rientro del capitale investito è impiegato per ottenere il costo di investimento ammortizzato su base annua. Esso dipende dal tempo di vita pianificato per la stazione di compostaggio e dal tasso d'interesse sui capitali, come risulta dall'equazione seguente:

EQUAZIONE 6-2

$$CFR = 1/(1 + i)^n$$

dove: n tempo di vita dell'impianto; si assume il valore di 15 anni

i tasso di interesse

A2.6.1 Costo di investimento

Il costo di investimento, (*capital_cost*) comprende i costi di progettazione (*engr_cost*), i costi di acquisizione del terreno (*land_cost*), i costi di costruzione delle strutture (*constr_cost*) ed i costi di acquisizione dei macchinari (*equip_cost*).

EQUAZIONE 6-3

$$capital_cost = engr_cost + land_cost + constr_cost + equip_cost$$

A2.6.1.1 Costi di progettazione

Questi costi consistono negli onorari pagati per i servizi di consulenza e di elaborazione tecnica del progetto. Possono aggiungersi eventuali oneri sostenuti per le attività di presentazione e promozione del progetto presso l'opinione pubblica.

EQUAZIONE 6-4

$$engr_cost = perc_constr \times constr_cost$$

dove: *engr_cost* costi di progettazione (Euro)

perc_constr percentuale del costo di costruzione rappresentante il costo di progettazione; si assume la percentuale del 10%

A2.6.1.2 Acquisizione del terreno

Questo costo si basa essenzialmente sui prezzi di mercato dei terreni nella zona destinata alla realizzazione dell'impianto.

EQUAZIONE 6-5

$$land_cost = land_unit_cost \times fac_area$$

dove: *land_cost* costo di acquisto del terreno (Euro)

land_unit_cost costo del terreno a m²

A2.6.1.3 Costi di costruzione

I costi di costruzione comprendono gli oneri per la sistemazione (*grading*) ed il rimodellamento (*landscaping*) del sito, per la pavimentazione, per le strutture impiantistiche e gli edifici di servizio, per la realizzazione delle strade di accesso all'impianto ed, infine, per la posa della recinzione.

EQUAZIONE 6-6

$$constr_cost = grad_cost + pav_cost + build_cost + fenc_cost$$

dove: *constr_cost* costo complessivo delle opere edili (Euro)

A2.6.1.3a Sistemazione e rimodellamento

I costi di sistemazione riguardano principalmente i lavori necessari per un buon drenaggio delle acque meteoriche. Il rimodellamento è invece teso a creare forme (argini, collinette, ecc.) sul terreno che contribuiscano ad armonizzare l'inserimento della stazione di compostaggio.

EQUAZIONE 6-7

$$grad_cost = grad_unit_cost \times fac_area$$

dove: *grad_cost* costi di sistemazione e rimodellamento del terreno (Euro)

land_unit_cost costo dei lavori per ettaro (Euro/ha)

A2.6.1.3b Pavimentazione delle superfici di lavoro e di transito

I costi di pavimentazione differiscono a seconda del materiale impiegato per la copertura del terreno. A loro volta, i materiali utilizzati dipendono dalla destinazione d'uso della superficie pavimentata. All'interno della stazione di compostaggio, le superfici da pavimentare sono: l'area di preparazione (aia di ricezione + aia di condizionamento dei materiali + zone di stazionamento delle macchine operatrici), l'area di processo (aia di compostaggio + aia di finissaggio), l'aia di stoccaggio provvisorio degli scarti e le strade.

EQUAZIONE 6-8

$$pav_cost = (pav_unit_cost_1 \times stag_area) + (pav_unit_cost_2 \times compost_pad) + (pav_unit_cost_3 \times cur_pad) + (pav_unit_cost_4 \times reject_area) + (pav_unit_cost_5 \times road_area_model)$$

dove: *pav_cost* costi pavimentazione (Euro)

pav_unit_cost_1 ... 5 costo unitario dei diversi tipi di copertura adottati nelle singole aree (Euro/m²)

A2.6.1.3c Costi di costruzione delle opere edili

L'incidenza di questi costi varia sensibilmente a seconda che le attività previste dalla filiera di compostaggio avvengano all'aperto ovvero sotto tettoie o addirittura in edifici chiusi. Nel modello SC-FORSU, l'area di preparazione è alloggiata sotto un capannone aperto lateralmente, mentre il compostaggio attivo ed il finissaggio avvengono in locali chiusi, al fine di consentire la captazione degli odori. Il modello SC-VERDE non prevede edifici destinati alle diverse fasi di trattamento. In entrambi i casi è considerata una struttura per uffici.

EQUAZIONE 6-9

$$build_cost = (build_unit_cost_1 \times stag_area) + [build_unit_cost_2 \times (compost_pad + cur_pad)] + (office_unit_cost \times office_area)$$

dove: *build_cost* costi per le strutture edili, compresi gli uffici ed i locali di servizio (Euro)

build_unit_cost_1 ... 2 costo unitario dei diversi tipi di struttura, esclusa la pavimentazione, adottati nelle singole aree (Euro/m²)

off_unit_cost costo unitario degli edifici adibiti ad ufficio, inclusa la pavimentazione (Euro/m²)

EQUAZIONE 6-9bis (SC-VERDE)

$$build_cost = office_unit_cost \times office_area$$

A2.6.1.3d Oneri per la recinzione dell'area dell'impianto

EQUAZIONE 6-10

$$fenc_cost = fenc_unit_cost \times fac_perim_model$$

dove: *fenc_cost* costo per la recinzione (Euro)

fenc_unit_cost costo unitario della recinzione, solitamente costituita da rete metallica (Euro/m)

A2.6.1.4 Costi per macchinari

Questi oneri comprendono sia i costi di acquisto che i costi di installazione. Il costo per ogni macchinario è funzione del numero di unità impiegate.

EQUAZIONE 6-11

1. $FEL_cost = num_FEL \times unit_FEL_cost$ (SC-FORSU; SC-VERDE)
2. $BCAT_cost = num_BCAT \times unit_BCAT_cost$ (SC-FORSU; SC-VERDE)
3. $hammer_cost = num_hammer \times unit_hammer_cost$ (SC-FORSU)
4. $tubgrinder_cost = num_tubgrinder \times unit_tubgrinder_cost$ (SC-VERDE)
5. $trommel_cost = num_trommel \times unit_trommel_cost$ (SC-FORSU; SC-VERDE)
6. $turner_cost = num_turner \times unit_turner_cost$ (SC-FORSU)

dove: *FEL ... turner_cost* investimento per tipo di macchinario (Euro)

unit_FEL ... turner_cost costo unitario per tipologia di macchinario (Euro/unità)

EQUAZIONE 6-12

$$aerat_cap_cost = aerat_unit_cost \times cur_staticpile_pad \quad (SC-FORSU)$$

dove: *aerat_cap_cost* costo di acquisizione del sistema di insufflazione forzata d'aria per l'aia di finissaggio (Euro)

dove:	<i>lab_cost</i>	costo del lavoro per operai ed impiegati (Euro/anno)
	<i>overhead_cost</i>	spese generali (Euro/anno); si esprimono come % sul costo del lavoro
	<i>manag_cost</i>	costi di direzione dell'impianto (Euro/anno); si esprimono come % sul costo del lavoro
	<i>mainten_cost</i>	spese di manutenzione (Euro/anno)
	<i>fuel_cost</i>	spese per carburanti destinati alle macchine operatrici (Euro/anno)
	<i>util_cost</i>	costo delle bollette per servizi (acqua, elettricità, gas) (Euro/anno)
	<i>salv_bnf</i>	proventi derivanti dalla vendita del compost (Euro/anno)

A2.6.2.1 Costo del lavoro

Il costo per le prestazioni di lavoro è funzione del numero di dipendenti della stazione di compostaggio. Il numero di quest'ultimi può essere correlato con la quantità di rifiuti in entrata all'impianto. Sulla base di dati reali, reperibili nella letteratura di settore in ambito internazionale, attraverso l'equazione di regressione, è giustificato assumere il valore di 0,1 unità lavorative/t/giorno.

EQUAZIONE 6-18

$$num_empl = 0,1 \times mass_1$$

dove: *num_empl* numero totale di unità di personale operanti nell'impianto

EQUAZIONE 6-19

$$lab_cost = wage_empl \times oper_hrs \times oper_days \times num_empl$$

dove: *lab_cost* costo del lavoro su base annua (Euro/anno)

wage_empl costo orario (salario) delle prestazioni lavorative (Euro/h)

A2.6.2.2 Spese generali

Le spese generali sono calcolate come una frazione del costo del lavoro. Queste spese comprendono il costo per lavoro straordinario, le spese di cancelleria, le polizze assicurative ed eventuali altre voci.

Equazione 6-20

$$overhead_cost = 40\% \times lab_cost$$

dove: 40% valore percentuale assunto a base di calcolo

A2.6.2.3 Costi per la direzione dell'impianto

Gli oneri per dirigenti sono calcolati come percentuale del costo del lavoro.

EQUAZIONE 6-21

$$manag_cost = 15\% \times labor_cost$$

dove: 40% valore percentuale assunto a base di calcolo

A2.6.2.4 Spese di manutenzione

Con riferimento alle filiere descritte dai modelli SC-FORSU e SC-VERDE, sono qui considerati soltanto i costi di manutenzione relativi ai macchinari più rilevanti dal punto di vista dell'usura: il mulino a martelli, il trituratore a tramoggia rotante e la macchina volta-cumuli semovente. In generale, i costi di manutenzione per FELs, BCATs e vagli a tamburo rotante sono da considerarsi di modesta incidenza. Le spese di manutenzione per le singole macchine fanno riferimento ai valori tabellari dei costi di esercizio indicati dai costruttori, al netto, dove applicabile, del costo per carburanti, calcolato separatamente.

EQUAZIONE 6-22

$$hammer_mainten = hammer_unit_mainten \times mass_2_{u/s} \times oper_days \quad (SC-FORSU)$$

dove: *hammer_mainten* costo annuo di manutenzione del mulino a martelli (Euro/anno)

hammer_unit_mainten costo unitario di manutenzione del mulino a martelli (Euro/t)

EQUAZIONE 6-23

$$tubgrinder_mainten = tubgrinder_unit_mainten \times mass_1 \times oper_days \quad (SC-VERDE)$$

dove: *tubgrinder_mainten* costo annuo di manutenzione del trituratore a tramoggia rotante (Euro/anno)

tubgrinder_unit_mainten costo unitario di manutenzione del trituratore a tramoggia rotante (Euro/t)

EQUAZIONE 6-24

$$turner_mainten = turner_mainten_hr \times turner_oper_hrs \times oper_weeks \quad (SC-FORSU)$$

dove: *turner_mainten* costo annuo di manutenzione della macchina semovente volta-cumuli (Euro/anno)

turner_mainten_hr costo orario di manutenzione della macchina semovente volta-cumuli (Euro/h)

turner_oper_hrs ore di funzionamento su base settimanale della macchina semovente volta_cumuli (h/settimana)

A2.6.2.5 Spese per carburanti

Si riferiscono a FELs, BCATs e macchina semovente volta-cumuli, nel caso del modello SC-FORSU. Nello schema SC-VERDE, sono invece computate per FELs, BCATs e trituratore a traggia rotante.

EQUAZIONE 6-25

$$fuel_cons = FEL_diesel + BCAT_diesel + turner_diesel \quad (SC-FORSU)$$

$$fuel_cons = FEL_diesel + BCAT_diesel + tubgrinder_diesel \quad (SC-VERDE)$$

dove: *fuel_cons* richiesta oraria di gasolio per autotrazione (g/h)

EQUAZIONE 6-26

$$fuel_cost = fuel_cons \times oper_hrs \times oper_days \times diesel_cost$$

dove: *fuel_cost* costo annuo per carburanti (Euro/anno)

diesel_cost costo unitario del gasolio (Euro/litro)

A2.6.2.6 Spese per servizi (acqua, elettricità, gas)

EQUAZIONE 6-27

$$util_cost = (electr_equip + electr_build) \times electr_unit_cost + water_build \times water_unit_cost + gas_build \times gas_unit_cost$$

dove: *util_cost* costo annuo per forniture di servizi (Euro/anno)

electr_build

water_build

gas_build

consumi di elettricità (kWh), acqua (m³) e gas (m³) relativi agli edifici della stazione di compostaggio

electr_unit_cost

water_unit_cost

gas_unit_cost costo unitario dei servizi; elettricità: Euro/kWh, acqua: Euro /m³, gas: Euro/m³

A2.6.2.7 Proventi derivanti dalla vendita del compost

Il compost prodotto secondo le filiere descritte dai modelli SC-FORSU e SC-VERDE è destinato ad impieghi in settori diversificati, con prezzi che variano a seconda del grado di affinamento e delle caratteristiche specifiche. Sul prezzo di vendita influisce anche l'eventuale confezionamento.

EQUAZIONE 6-28

$$salv_bnf = salv_unit_bnf \times mass_6 \text{ u/s} \times oper_days \quad (\text{SC-FORSU})$$

$$salv_bnf = salv_unit_bnf \times mass_4 \text{ u/s} \times oper_days \quad (\text{SC-VERDE})$$

dove: $salv_bnf$ proventi annue derivanti dalla vendita del compost (Euro/anno)

$salv_unit_bnf$ prezzo di vendita per t di compost (Euro/t)

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Diaz L.F., Golueke C.G., Savage G.M., Eggerth L.L. (1993). *Composting and recycling municipal solid waste*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Komilis D. (1997). Compost process model: Design, cost and life-cycle inventory of yard waste and municipal solid waste composting. *Technical Report to University of Wisconsin, Madison*.

Appendice 3 Glossario dei termini più ricorrenti in materia di compostaggio

A

Acidi humici – Frazione dell'humus (cfr. Humus) costituita da sostanze di colore bruno scuro che precipitano per acidificazione dell'estratto in alcali di un terreno o di un compost. Il contenuto di queste sostanze aumenta nel compost con il progredire della maturazione.

Aerazione – Operazione finalizzata a portare in contatto l'aria con la matrice organica sottoposta a compostaggio, mediante movimentazione, rivoltamento o ventilazione forzata, in modo da garantire un metabolismo microbico di prevalente carattere aerobico (bioossidazione).

Aerobico – Aggettivo che descrive un organismo o un processo che richiede ossigeno molecolare (O_2), rispettivamente, per vivere o per attuarsi.

Agente di supporto – (*bulking agent*). Ingrediente che, in una miscela di materiali organici destinata al compostaggio, viene aggiunto per conferire struttura e porosità al substrato. L'agente di supporto è, di solito, uno scarto ligno-cellulosico (es. cippato di ramaglie, segatura, paglia triturrata, ecc.), talvolta impiegato anche per mitigare l'eccesso di azoto o di umidità di alcune matrici organiche.

Aia – Platea pavimentata destinata alla preparazione dei materiali in entrata alla stazione di compostaggio (*aia di ricezione*), alla fase di compostaggio attivo nei sistemi in cumulo (*aia di stabilizzazione*) ovvero alla fase di finissaggio del compost (*aia di maturazione*).

Ammendante – Qualsiasi sostanza impiegata per condizionare le proprietà fisico-chimiche di un terreno, quali la porosità, l'aggregazione, la capacità di ritenzione idrica e la reazione (pH). Un ammendante può avere anche proprietà fertilizzanti come nel caso del compost.

Ammoniaca – (NH_3). Composto gassoso, di odore pungente, che si forma, durante il compostaggio di rifiuti biologici, dalla degradazione di materiali organici contenenti azoto, soprattutto in coincidenza della fase termofila del processo. Condizioni alcaline ed elevate temperature ne favoriscono la formazione.

Ammonio – (NH_4^+). Forma ionica dell'azoto ammoniacale. Tra NH_4^+ ed ammoniaca esiste un equilibrio dipendente dal pH. (L'ambiente acido favorisce la formazione di NH_4^+).

Anaerobico – Aggettivo che descrive un organismo o un processo inibito dalla presenza di ossigeno molecolare (O_2). Sono anaerobi(ci), tutti i microorganismi che attuano il loro metabolismo energetico per via fermentativa o tramite respirazione di nitrati, solfati, ed altri accettori finali di elettroni. Tipico processo anaerobico è la digestione metanogenica, talvolta, impropriamente definita come compostaggio anaerobico (cfr. Digestione anaerobica).

Andana – (*windrow*) cumulo di materiale organico, particolarmente esteso in lunghezza, allestito per il compostaggio mediante rivoltamento con apposita macchina rivoltatrice, semovente o trainata.

Anione – Atomo o molecola dotato di carica negativa (es. NO_3^- , SO_4^{--}).

Aspergillus fumigatus – Specie di fungo filamentoso (muffa) tipicamente associato alla materia organica in decomposizione, le cui spore (conidi), rilasciate abbondantemente nell'aria, soprattutto in condizioni di disidratazione del substrato, possono causare reazioni allergiche in alcuni soggetti sensibili. Nei casi più gravi può essere responsabile di serie affezioni polmonari (aspergillosi), ma solo in individui debilitati da altre patologie.

Aspirazione – (*vacuum induced ventila-*

tion) Metodo di ventilazione forzata mediante richiamo, per depressione, dell'aria all'interno della matrice in compostaggio (cfr. Aerazione).

Attinomiceti – Raggruppamento di batteri (organismi procarioti), tipico per la crescita in forma ramificata, con produzione di filamenti (pseudoife) simili al micelio dei funghi (organismi eucarioti). Nell'ambito del compostaggio, svolgono un'azione fondamentale nella degradazione di sostanze complesse come cellulosa e lignina.

B

Batteri – Gruppo di microorganismi procarioti, a struttura tipicamente unicellulare, di forma coccoide, bastoncellare o elicoidale, talvolta riuniti in catenelle, strati, aggregati tridimensionali o strutture filamentose ramificate (cfr. Attinomiceti). Rappresentano, per numero e versatilità metabolica, i principali agenti biologici del processo di compostaggio.

Bioaerosol – Sospensione nell'aria di particolato solido rappresentato da propaguli di agenti biologici (cellule di batteri, attinomiceti, funghi e particelle virali), liberi o associati a polveri, vitali o morti (cfr. Endotossine). Presso una stazione di compostaggio, può costituire un potenziale rischio per la salute degli operatori, specialmente nelle operazioni di rivoltamento e vagliatura di materiali a basso contenuto di umidità.

Biocella – (cfr. Bioreattore)

Biodegradabilità – Potenzialità di un composto organico ad essere convertito in strutture più semplici mediante reazioni enzimatiche.

Biofiltro – Apparato, costituito da un letto di matrice filtrante biologicamente attiva (es. compost maturo), attraverso il quale viene fatto passare un flusso di aria per abbatterne il contenuto in sostanze odorigene.

Biomassa attiva – Popolazione microbica responsabile dei fenomeni di stabilizzazione della matrice organica in compostaggio.

Biomassa substrato – Matrice organica fermentescibile sottoposta a compostaggio.

Bioossidazione microbica – Ossidazione di composti organici o inorganici da parte di microorganismi a metabolismo aerobico.

Bioreattore – Contenitore completamente chiuso (es. biocella, cilindro orizzontale rotante, silos verticale) o struttura di confinamento aperta (es. trincea dinamica aerata), nel quale, in condizioni aerobiche, avviene la fase attiva del compostaggio. I sistemi di compostaggio in bioreattore sono più costosi rispetto ai metodi in cumulo e, talvolta, non riescono comunque a garantire un controllo più rigoroso del processo.

BOD – (*biochemical oxygen demand*). Quantità di ossigeno (mg O₂/l) utilizzata per l'ossidazione biologica di materia organica disciolta. Questo parametro, utilizzato soprattutto per le acque, può essere impiegato per stabilire il grado di putrescibilità della matrice organica sottoposta a compostaggio (cfr. Indice respirometrico)

C

C – Simbolo chimico del carbonio.

Capacità di scambio cationico – (CEC). Misura della tendenza di un suolo a legare cationi metallici. Questa proprietà è fortemente influenzata dalla quantità di argilla e di sostanza organica presente in un determinato terreno.

Catione – Atomo o molecola dotato di carica positiva (es. NH₄⁺).

Cellulosa – Costituente principale dei tessuti vegetali, soprattutto di quelli delle piante arbustive ed arboree. È un polisaccaride le

cui catene sono formate da unità di glucosio unite con legame β -(1-4). Può essere degradato soltanto da microorganismi cellosolitici, rappresentati, principalmente, da attinomiceti e funghi.

Cilindro orizzontale rotante – (*cf.* Bioreattore).

Co-compostaggio – Compostaggio combinato di due matrici organiche incompatibili, da sole, con il processo, l'una, di solito, secca e ricca in carbonio (es. scarti lignocellulosici), l'altra molto umida, o addirittura liquida (es. fanghi di depurazione), e ricca in azoto.

COD – (*chemical oxygen demand*). Misura della capacità di composti organici ed inorganici a consumare ossigeno a seguito di trattamento con reagenti a forte potere ossidante ($K_2Cr_2O_7$), specialmente in ambiente acquoso. Questa misura non discrimina tra sostanza organica fresca o stabilizzata e non è perciò facilmente correlabile al BOD (*cf.* BOD).

Compost – Prodotto, solitamente di colore bruno, friabile, non fitotossico e ricco di humus, derivante dalla stabilizzazione biologica in fase solida di scarti, residui e rifiuti organici fermentescibili in condizioni ossidative (aerobiche), che garantiscono, alla matrice in trasformazione, il passaggio spontaneo attraverso una fase termofila.

Compostabile – Qualsiasi materiale organico che può andare incontro a degradazione microbica in condizioni aerobiche, dando luogo ad un prodotto finale metastabile, ricco di sostanze humiche (*cf.* Acidi humici, *cf.* Compost).

Compostaggio – Processo bioossidativo (aerobico) esotermico, promosso da una vasta popolazione di microorganismi, in conseguenza del quale, un substrato organico eterogeneo di partenza subisce parziale mineralizzazione, accompagnata da

humificazione e perdita della putrescibilità (stabilizzazione).

Condizionamento fisico-meccanico – Insieme delle operazioni (es. triturazione, dilacerazione, ecc.) finalizzate alla riduzione della pezzatura delle particelle del substrato, per incrementarne l'attacco microbico.

Conducibilità elettrica – È definita come la capacità di una sostanza di condurre corrente elettrica. Si misura in mmhos/cm (*millimhos/cm*) ovvero in mS/cm (*millisemens/cm*). Nel caso di substrati nutritivi (es. compost), il valore della conducibilità dipenderà, in modo direttamente proporzionale, dal contenuto di sali solubili: più sali sono presenti, più alta risulterà la conducibilità. La conducibilità è quindi una misura indiretta della salinità di un substrato.

Contaminante – Qualsiasi elemento o composto chimico tossico associato alle matrici potenzialmente adatte per la produzione di compost (*cf.* Metalli pesanti).

Cumulo – (*pile*). Ammasso ordinato di matrice organica in corso di compostaggio, aerato mediante ventilazione forzata (*cumuli statici*) ovvero mediante movimentazione con pala meccanica (*cumuli rivoltati*).

D

Decompositori – Microorganismi e invertebrati responsabili dei normali processi di degradazione dei materiali organici naturali (*cf.* Microfauna, *cf.* Microflora).

Deiezioni zootecniche – Complesso delle escrezioni fecali ed urinarie degli animali in allevamento. Spesso si presentano in forma fluida, con contenuto di solidi fortemente influenzato dal sistema adottato per la pulizia delle aree di stabulazione. Ne costituiscono un tipico esempio i liquami provenienti dagli insediamenti suinicoli.

Denitrificazione – Processo anaerobico

promosso da taluni batteri che trasformano i nitrati in azoto molecolare, riducendo così il potere fertilizzante del compost.

Densità apparente – Peso (massa) per unità di volume (kg/m^3) di un materiale, o di una miscela di più matrici, in forma particolata. Nel caso di un cumulo di cippato di legno, la densità apparente è data dal peso del materiale diviso il volume del cumulo. Ciò è profondamente differente dalla densità della singola particella che è data dal peso di questa diviso il volume della stessa.

Desertificazione – Fenomeno di erosione spinta dei terreni a seguito di intenso sfruttamento e progressivo depauperamento del contenuto in sostanza organica.

Digestione anaerobica – Processo microbico di degradazione dei residui organici in completa assenza di ossigeno, con produzione di una miscela gassosa (*biogas*) ricca di metano (CH_4) ed anidride carbonica (CO_2). È talvolta indicata, con termine improprio, compostaggio anaerobico.

Discarica – Sito adibito allo smaltimento dei rifiuti mediante interrimento controllato. Funziona come un gigantesco reattore anaerobico, producendo biogas (*cfr.* Digestione anaerobica) come conseguenza della degradazione dei materiali organici putrescibili in assenza di ossigeno.

E

Endotossine – Sostanze, derivanti dal metabolismo di batteri gram-negativi, che sono associate alla parete cellulare e rimangono attive anche in seguito alla morte dei microorganismi produttori. Nell'uomo possono provocare una varietà di effetti fisiologici negativi (*cfr.* Bioaerosol).

Enzimi – Proteine prodotte da organismi viventi in grado di catalizzare specifiche reazioni biochimiche. Quando le proteine enzimatiche agiscono all'esterno della cel-

lula microbica, si parla di esoenzimi. Tipici esoenzimi sono quelli coinvolti nella degradazione di substrati complessi, come le cellulasi e gli enzimi ligninolitici.

F

Fanghi di depurazione – (*fanghi attivi da sedimentazione secondaria*). Matrice organica, costituita essenzialmente da cellule microbiche o residui delle stesse, separabile da un refluo a seguito del processo di depurazione biologica. Sono ricchi in azoto e possono essere stabilizzati mediante co-compostaggio in miscela con un agente di supporto. Il contenuto in metalli pesanti ne può, talvolta, limitare l'uso.

Fermentazione – Forma di metabolismo microbico ricorrente in assenza di ossigeno molecolare, a carico di composti organici solubili (*es.* zuccheri), con produzione prevalente di alcoli ed acidi grassi.

Fermentescibile – (*cfr.* Putrescibile)

Fertilità biologica – Condizione del terreno derivante dalla presenza di un'attiva microflora, fortemente condizionata dalla presenza di sostanza organica humificata (*cfr.* Microflora).

Fertilizzante – Materiale con funzione precipua di apportare al terreno gli elementi chimici di fertilità, con particolare riferimento ad azoto (N), fosforo (P) e potassio (K).

Finissaggio – (*curing*). Fase del ciclo di compostaggio, successiva allo stadio di stabilizzazione del substrato, necessaria per l'ottenimento di un compost completamente maturo, non fitotossico e ricco di humus.

Fitotossicità – Azione tossica di un ammendante organico nei confronti delle piante fatte crescere in presenza dello stesso. Gli effetti negativi possono andare dall'inibi-

zione della germinazione dei semi, al rallentamento dello sviluppo e della capacità produttiva delle colture. Di solito, un compost è fitotossico quando non ha subito completa stabilizzazione e maturazione ovvero contiene composti ridotti, derivanti da condizioni anaerobiche, come conseguenza di una cattiva gestione del processo (cfr. Germinazione, test di _)

FORSU – Frazione organica dei rifiuti urbani.

Funghi – Microorganismi eucarioti (cioè con cellule dotate di nucleo avvolto da membrana), a crescita saprofitica (su materia organica in disfacimento) o parassitica (a spese di organismi vivi). Formano filamenti ramificati, detti ife, che si uniscono a formare una trama più o meno complessa, detta micelio. Sono importanti nel compostaggio per la capacità che molti di essi hanno di degradare polimeri complessi come cellulosa e lignina. Preferiscono ambienti tendenzialmente acidi.

G

Germinazione, test di _ – Saggio biologico condotto con semi di crescione (*Lepidium sativum*), per determinare l'eventuale fitotossicità dell'estratto acquoso di una matrice organica in fase di stabilizzazione o di un compost, mediante stima della riduzione della germinabilità (cfr. Fitotossicità).

H

H – Simbolo chimico dell'idrogeno

Humus – Frazione stabile della componente organica di un terreno. Si presenta come un aggregato complesso di sostanze amorphe ricche in carbonio, di colore variabile dal bruno scuro al nero. Deriva dalla parziale degradazione microbica di materiali organici quali, soprattutto, cellulosa, lignina e proteine, combinata a reazioni di sintesi di nuovi composti e di riarrangiamento

dei metaboliti intermedi. A seguito degli stessi fenomeni, l'humus si forma anche durante il compostaggio di una qualsiasi matrice organica sottoposta a stabilizzazione. L'humus possiede un'elevata CEC (cfr. Capacità di scambio cationico) e una notevole capacità di ritenzione idrica (assorbimento).

I

Idrogeno solforato (acido solfidrico) – (H₂S). Sostanza gassosa, dal tipico odore di uova marce, derivante dal metabolismo microbico a carico di composti contenenti zolfo, in condizioni anaerobiche. È sostanza ad elevata tossicità. Nei materiali sottoposti a compostaggio, si forma in assenza di adeguata aerazione.

Igienizzazione – Disattivazione degli organismi patogeni durante il processo di compostaggio ad opera della temperatura raggiunta dal substrato in fase termofila.

Indice di respirazione – (respiration rate). Misura del consumo di ossigeno nell'unità di tempo da parte di 1 kg di substrato organico (mg O₂/kg/h). Fornisce un'indicazione del grado di stabilità di una matrice organica (es. compost). Un compost è da ritenersi completamente maturo se presenta un indice respirometrico < 200. Alla fine della fase di compostaggio attivo (stabilizzazione), molti substrati presentano ancora un tasso respirometrico intorno a 400-500.

Inerti – Componenti non biodegradabili (es. metalli, plastiche, vetro) di un flusso di rifiuti, non compatibili quindi con il compostaggio.

Inoculo/i – Microorganismi o matrici veicolanti biomassa microbica (es. compost maturo) da aggiungere ai substrati freschi sottoposti a compostaggio, al fine di innescare o accelerare le reazioni di stabilizzazione.

Insufflazione – Metodo di aerazione for-

zata mediante adduzione di aria nella matrice organica in trasformazione, per mezzo di apposite soffianti.

K

K – simbolo chimico del potassio

L

Letame – Escrezioni di carattere prevalentemente fecale, derivanti dagli animali in allevamento. Il letame contiene spesso una quantità variabile della lettiera di stabulazione (es. paglia) e si presenta, di solito, come palabile (cfr. Deiezioni zootecniche).

Lieviti – Gruppo di funghi unicellulari, caratterizzati da tipica duplicazione per gemmazione. Sono largamente coinvolti nelle reazioni fermentative a carico degli zuccheri semplici (cfr. Fermentazione). Rivestono un ruolo modesto nell'ambito del processo di compostaggio.

Lignina – È il costituente dei tessuti vegetali, secondo per quantità soltanto alla cellulosa. Si tratta di un polimero complesso, a prevalente struttura aromatica ed assai recalcitrante alla biodegradazione.

M

Maturazione – (cfr. Finissaggio)

Mesofilo – Ambito di temperature compreso, per convenzione, tra 10 e 40 °C, favorevole allo sviluppo dei microorganismi detti, appunto, mesofili.

Metalli pesanti – Gruppo di elementi metallici, comprendente cadmio (Cd), cromo (Cr), rame (Cu), mercurio (Hg), nichel (Ni), piombo (Pb) e zinco (Zn). Possono essere trovati in elevate concentrazioni nei fanghi di depurazione ovvero nei rifiuti solidi urbani raccolti in maniera indifferenziata. Esplicano tossicità diversa nei confronti delle piante, degli animali, dell'uomo e, persino, dei microorganismi.

Un compost con alte concentrazioni di metalli pesanti è destinato ad essere confinato in discarica.

Micelio – Trama di ife fungine, spesso percepibile ad occhio nudo (cfr. Funghi).

Microfauna – In una matrice organica sottoposta a compostaggio, sta a indicare l'insieme di protozoi, rotiferi e nematodi che vivono a spese di batteri e funghi e partecipano ai processi di degradazione del substrato.

Microflora – In pratica, l'insieme delle popolazioni di batteri, attinomiceti e funghi che colonizzano un determinato substrato sottoposto a compostaggio.

Microorganismo – Un organismo di dimensioni microscopiche, solitamente visibile per mezzo di adeguato ingrandimento. Sono da considerarsi microorganismi, a tutti gli effetti, i batteri, gli attinomiceti, i funghi, le alghe unicellulari ed i protozoi, anche se, nel compostaggio, il riferimento è soprattutto ai primi tre gruppi.

Mineralizzazione – Completa degradazione di un composto organico, con produzione di acqua, anidride carbonica ed elementi minerali.

N

N – Simbolo chimico dell'azoto.

Nitrificazione – Ossidazione biochimica dell'ammoniaca a nitrato ad opera di batteri nitrosanti (es. *Nitrosomonas*) e nitrificanti (es. *Nitrobacter*) chemolitotrofi (autotrofi).

Nutrienti – Elementi nutritivi presenti nel substrato in compostaggio e indispensabili per la crescita microbica. Si fa una distinzione tra *macronutrienti*, rappresentati da carbonio, azoto, fosforo, potassio e zolfo, richiesti in quantità relativamente elevate, e *micronutrienti*, sufficienti in piccola concentrazione o, addirittura, in tracce.

O

O – Simbolo chimico dell'ossigeno.

Odori, abbattimento degli – Processo di captazione e trattamento delle sostanze maleodoranti volatili che si sviluppano, in prevalenza, durante la fase di compostaggio attivo. Può essere attuato mediante biofiltrazione (*cf.* Biofiltro) ovvero col il ricorso a torri di lavaggio (*scrubbers*) e successivo trattamento delle acque. È applicabile soltanto presso stazioni di compostaggio che operano il processo in strutture chiuse.

P

P – Simbolo chimico del fosforo.

Patogeno umano – Qualsiasi organismo (batterio, fungo, virus, parassita) capace di provocare una malattia, un'infezione o uno stato transitorio di alterazione fisiologica nell'uomo. Spesso associati alle matrici organiche destinate al compostaggio (*es.* frazione organica dei rifiuti urbani, fanghi di depurazione), gli organismi patogeni sono in massima parte disattivati dalle alte temperature raggiunti durante lo stadio termofilo del processo.

Percolato – Liquido ad elevato carico inquinante derivante dal rilascio di succhi da parte di rifiuti organici particolarmente umidi allestiti in cumuli per il compostaggio. Percolato si raccoglie anche al fondo delle discariche, come conseguenza del passaggio di acque meteoriche attraverso il letto di rifiuti in giacitura, dai quali vengono lisciviati elementi e sostanze tossiche.

Porosità – Misura dello spazio rappresentato dai pori tra le particelle di un materiale. Viene espressa come volume dei pori diviso il volume totale della matrice considerata. Nel compostaggio, il termine porosità è di solito usato per indicare il volume degli spazi occupati dall'aria, senza includere quelli occupati dall'acqua.

pH – È la misura della reazione di una soluzione. Viene espresso come logaritmo negativo della concentrazione di ioni idrogeno, indicando il grado di acidità o alcalinità del mezzo (pH 7 = neutro; pH < 7 = acido; pH > 7 = alcalino o basico).

Putrescibile – Qualsiasi materiale organico suscettibile di rapida degradazione microbica, con liberazione di sostanze maleodoranti.

R

Raccolta differenziata – Asporto selettivo della componente organica dei rifiuti urbani mediante intercettazione alla fonte ovvero a mezzo di contenitori stradali dedicati.

S

S – Simbolo chimico dello zolfo.

Silos verticale – (*cf.* Bioreattore).

Stabilizzazione – (*active composting*) Condizione raggiunta da una matrice organica a seguito della fase di compostaggio attivo (*cf.* Finissaggio).

Struttura – In un materiale sottoposto a compostaggio, la struttura descrive la rigidità delle particelle, vale a dire la tendenza delle stesse a non compattarsi.

T

Termofilo – Ambito di temperature al di sopra dei 40 °C. Nel compostaggio, lo stadio termofilo si instaura nella matrice organica in trasformazione a causa delle reazioni microbiche ossidative esotermiche. In queste condizioni, sopravvivono soltanto specie di microorganismi detti, appunto, termofili.

Tessitura – Caratteristica che descrive l'estensione dell'area superficiale delle particelle di una matrice in compostaggio. Substrati con particelle di piccole dimensioni presentano una più estesa superficie dispo-

nibile per l'attacco microbico, a fronte però di scarsa porosità. D'altra parte, al crescere della dimensione delle particelle, il rapporto area superficiale/volume diminuisce, mentre la porosità aumenta.

Trincea dinamica aerata – (*cf.* Bioreattore).

U

Umidità – Frazione o percentuale di una matrice rappresentata dall'acqua. Viene solitamente espressa sulla base del peso fresco.

V

Virus – Entità biologica a struttura non cellulare, dotata di specificità d'ospite, all'interno del quale avviene la replicazione con conseguente lisi delle cellule infettate. I virus sono gli agenti causali di numerose malattie e possono essere associati alle matrici fresche destinate al compostaggio. Decadono durante il progredire del processo.

Volatilizzazione – Rilascio in atmosfera di sostanze allo stato gassoso.