Di.Pro.Ve. - Università degli Studi di Milano

Dipartimento di Produzione Vegetale

Sezione di Fisiologia delle Piante Coltivate e Chimica Agraria

Via Celoria 2 - 20133 Milano - Tel. +39 02503.16546 - Fax +39 02503.16421

PROVE DI CO-COMPOSTAGGIO

DI MATERIALI CELLULOSICI

Dr. Adani Fabrizio

Prof. P.L. Genevini

Dr. Ubbiali Cesare

- USM Prot. 0034986 del 29/07/2002 Convenzione per collaborazione scientifica tra l'Ente Morale Scuola Agraria del Parco di Monza e il DI.PRO.VE.
- Contratto di Collaborazione Coordinata Continuativa tra l'Ente Morale Scuola Agraria del Parco di Monza e il Dr. Ubbiali Cesare, del 1° novembre 2001 per la gestione di attività sperimentali realizzate dal gruppo di studio sul compostaggio.

INDICE

1. INTRODUZIONE 3

1.1. IL COMPOSTAGGIO 3

1.1.1. Processo 3

1.1.2. Impianti per la produzione di compost 7

1.2. IL COMPOST 10

1.2.1 La qualità del compost 10

1.2.2. Criteri di qualità del compost 12

1.3. STABILITÀ BIOLOGICA, MATURITÀ ED EVOLUZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA 13

1.3.1. Stabilità biologica 13

1.3.2. Maturità 14

1.3.3. Evoluzione della sostanza organica 15

1.4. DETERMINAZIONE DELLA STABILITÀ BIOLOGICA 15

1.4.1. Metodi biologici aerobi: metodi respirometrici 16

1.4.1.1. Il consumo orario di ossigeno: l'indice di respirazione 17

1.4.2. Determinazione del grado di evoluzione della sostanza organica 19

1.4.2.1. Umificazione durante il compostaggio 19

2. MATERIALI E METODI 21

2.1. PIANO SPERIMENTALE 21

2.2. CAMPIONAMENTO DEL RIFIUTO PER LE ANALISI IN LABORATORIO 23

2.2.1. Modalità di campionamento 23

2.2.2. Confezionamento ed etichettatura 24

2.2.3. Ripartizione dei campioni da analizzare in laboratorio 24

2.3. IL TEST RESPIROMETRICO 25

3.3.1. Respirometro 25

2.3.2. Rilevamento dei parametri di processo nel respirometro 27

2.4. DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI RESPIRAZIONE DINAMICO 27
2.4.1. Considerazioni preliminari 27
2.4.2. Campionamento 28
2.4.3. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico Reale (IRDR) 28
2.4.4. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico Potenziale (IRDP) 28
2.4.5. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico (IRD) 29

2.5. TEST DI FITOTOSSICITÀ: PROVA DI VEGETAZIONE IN VASO CON LATTUGA 31

2.6. PARAMETRI CHIMICO-FISICI 32
2.6.1. Determinazione delle ceneri e dei solidi volatili 33

3. RISULTATI DELLE PROVE 34

3.1. ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE: FASE ATTIVA (BIOSSIDAZIONE) 34

3.2. ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE: CURING – PHASE 36

3.3. STABILITÀ BIOLOGICA, pH, SOSTANZA SECCA (SS) E SOLIDI VOLATILI (SV) 37

3.4. FITOTOSSICITÀ 44

3.5. OMEI 53

3.6. Caratterizzazione del Compost: Legge 748/84 46

3.7. BILANCI DI MASSA 57
3.7.1. Bilanci di massa I° ciclo 57
3.7.2. Bilanci di massa II° ciclo 59
3.7.3. Bilanci di massa III° ciclo 60

4. ANALISI MERCEOLOGICHE 64

4.1. I° E II° CICLO 64

4.2. III° CICLO 65

5. CONCLUSIONI 66

6. BIBLIOGRAFIA 67

1. INTRODUZIONE

1.1. IL COMPOSTAGGIO

1.1.1. Processo

Il compostaggio (Figura 1.1.1.1.), basato su processi assai diffusi in natura, sfrutta le reazioni prevalentemente ossidative ed esotermiche promosse da microrganismi aerobi, trasformando la frazione organica presente nel materiale di partenza, in un prodotto ricco di nutrienti, biologicamente stabile, privo di odori e di facile impiego, il compost appunto.

Si tratta di un trattamento biologico utilizzato generalmente per il recupero di materiale organico derivante da raccolta differenziata o da scarti di grandi utenze (mense, mercati, ecc.), da residui di potatura o tagli d'erba di giardini pubblici e privati, e da fanghi di depurazione delle acque (spesso di industrie alimentari), opportunamente miscelati fra loro, a dare il prodotto finale "compost". Questo, impiegato tal quale o, più frequentemente, miscelato con altre matrici organiche (torba per esempio), costituisce un buon ammendante (pur non totalmente privo di difetti), adatto sia all'impiego in pieno campo, sia a quello in coltivazioni protette.

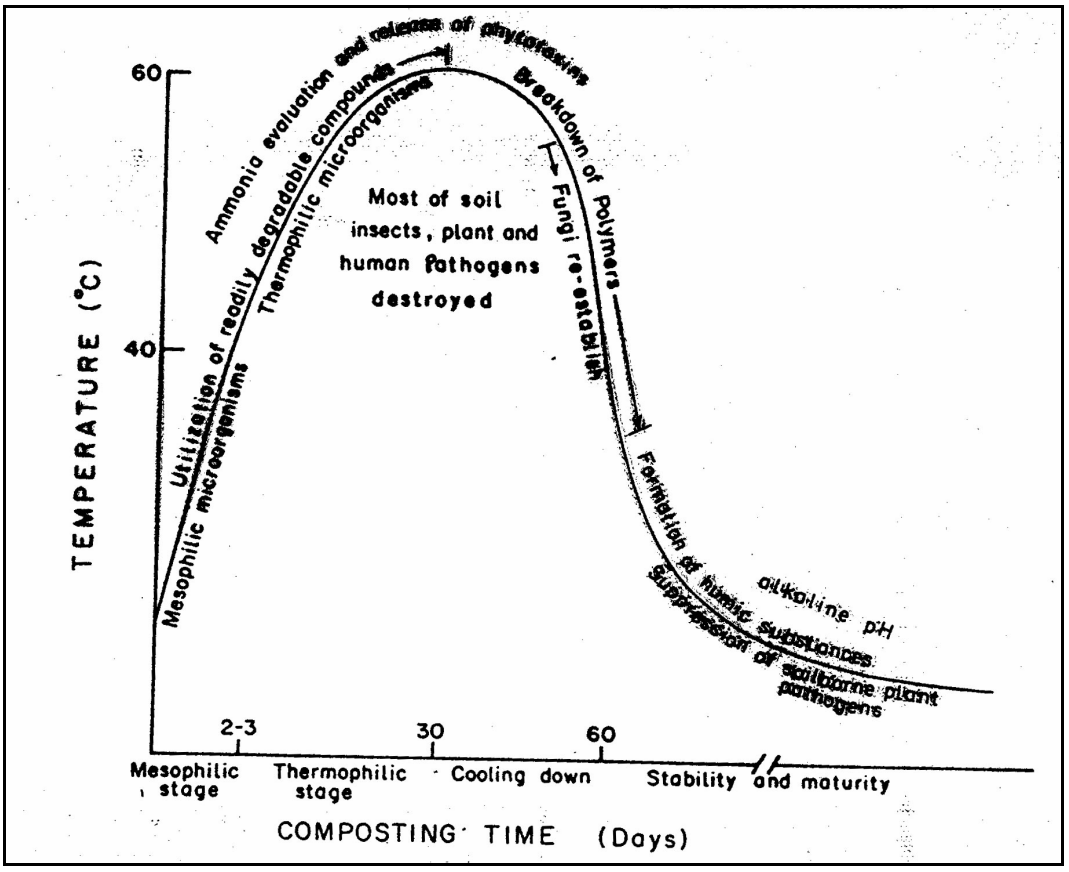


Figura 1.1.1.1.: Processo di compostaggio (Epsein, 1998)

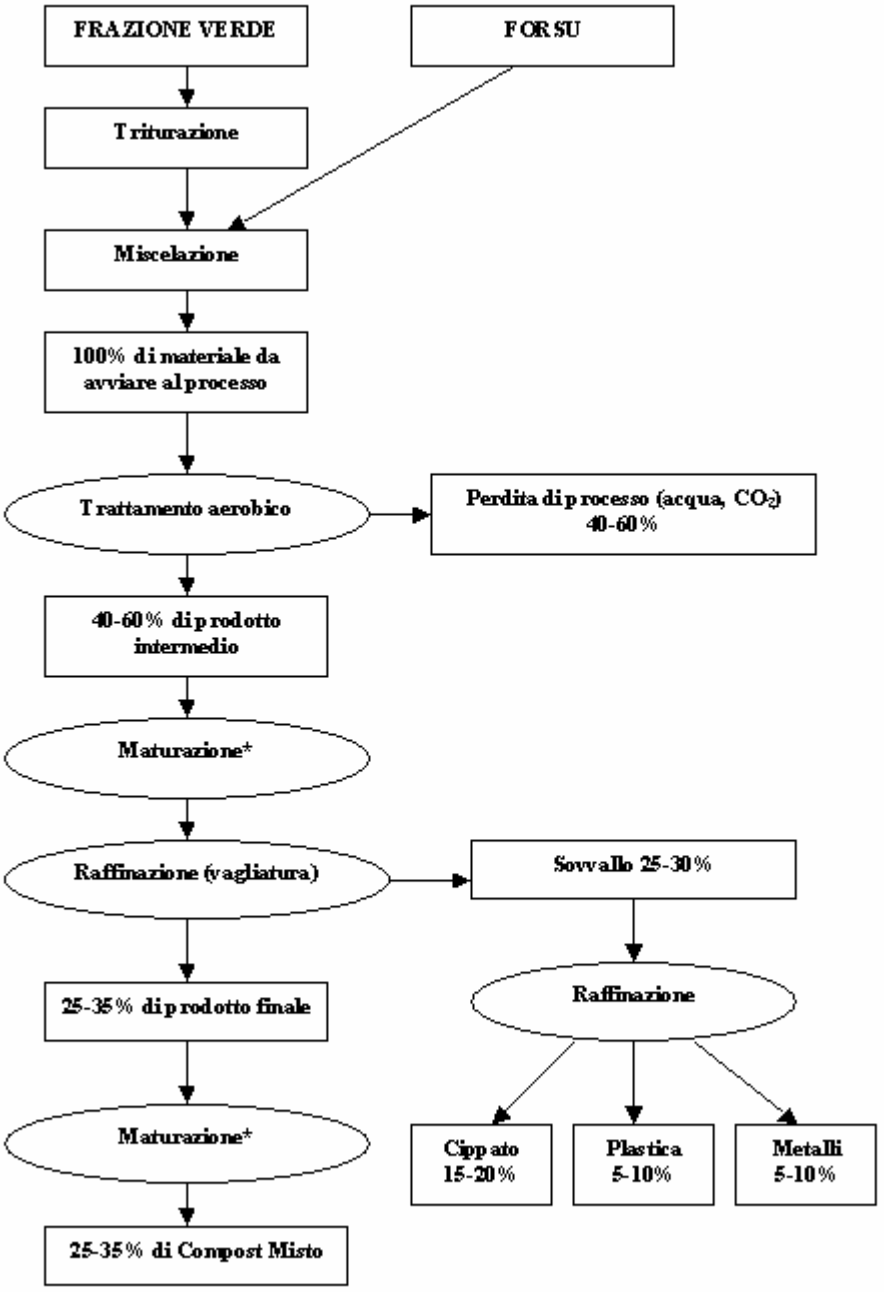
Il processo di compostaggio si sviluppa in due fasi successive:

- **fase attiva ("high rate"):** nella quale hanno luogo intensi processi degradativi a carico delle componenti organiche più facilmente degradabili dai microrganismi. Tale stadio procede fino al raggiungimento della Stabilità Biologica (quando cioè i processi di demolizione si presentano notevolmente rallentati).

- **fase di trasformazione: ("curing phase"):** caratterizzata dalla degradazione e successiva trasformazione, delle componenti della sostanza organica difficilmente attaccabili dai microrganismi, con formazione, come ultimo risultato, di sostanze umiche (Adani et al., 1997).

Poiché il processo di compostaggio può trovare applicazione ogni volta che si abbia a che fare con una matrice contenente frazioni organiche, già in passato, si è pensato di poter trattare con questa metodologia anche i rifiuti; ciò ha portato allo sviluppo di numerosi studi in questo settore (Citernesi e De Bertoldi, 1979; Ashbolt e Line, 1982; De Bertoldi, 1992; Guidi, 1992; Maniatis e Ferrero, 1992; Zorzi et al., 1992; Torretta et al.,1997) ed allo studio di tecniche applicabili al caso specifico del trattamento dei rifiuti (Chino et al., 1983; De Bertoldi et al., 1983; De Bertoldi, 1992; Adani et al., 1997).

A titolo esemplificativo, si riportano gli schemi, con i relativi bilanci di massa, di processi di compostaggio della frazione organica da rifiuti separati (compost di qualità) (Figura 1.1.1.2.) e da rifiuti (Figura 1.1.1.3.).



* Fasi del processo alternative

Figura 1.1.1.2.: Compostaggio di qualità: schema di processo e bilancio di massa.

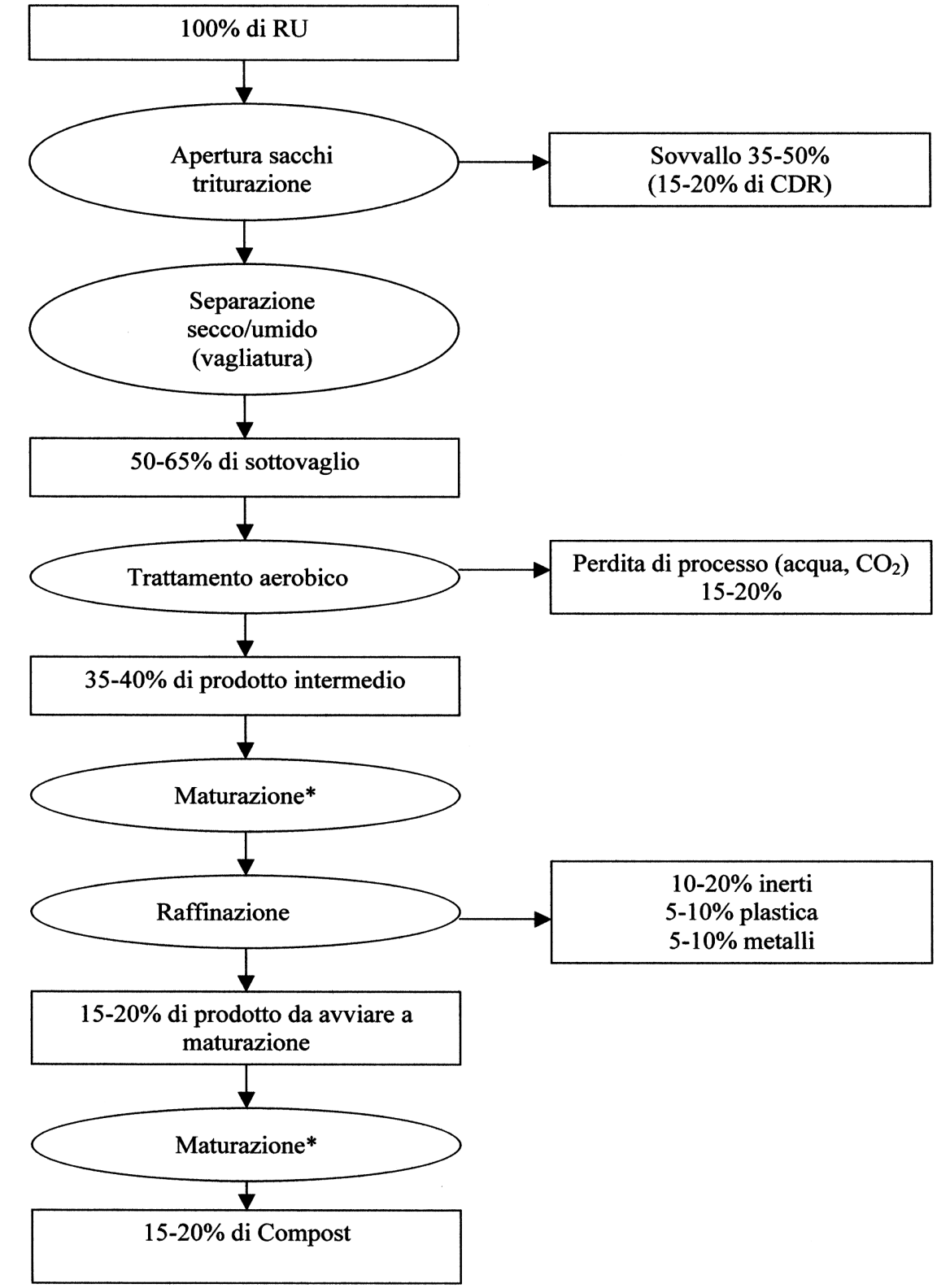


Figura 1.1.1.3.: Compostaggio da rifiuti: schema di processo e bilancio di massa.

1.1.2. Impianti per la produzione di compost

Lo sfruttamento del compostaggio come una biotecnologia ambientale per la gestione dei rifiuti organici dipende solamente da alcuni fattori che permettono di controllare in modo soddisfacente il processo, il che significa avere un alto grado di decomposizione in un tempo relativamente breve necessario per la stabilizzazione.

Tutti i sistemi d'impianto sono stati sviluppati facendo attenzione ad assicurare le richieste base di ossigeno e temperatura, quest'ultima deve essere mantenuta in uno stretto range (55 – 65°C).

Le tecnologie utilizzate per produrre compost possono essere oggi racchiuse in due categorie principali (De Bertoldi *et al.*, 1985; Rynk, 1992), che dipendono dalla sistemazione della biomassa durante la stabilizzazione:

1) ***Sistemi aperti***, in cui le matrici sono compostate senza essere racchiuse in alcun tipo di contenitore;
2) ***sistemi chiusi***, in cui i rifiuti organici per essere stabilizzati sono confinati in veri e propri bioreattori.

I sistemi aperti includono il compostaggio *in andane* ed i *cumuli statici aerati*; sono considerati sistemi chiusi i *reattori verticali* (per esempio i *silos*), i *reattori orizzontali* (per esempio i *tamburi rotanti*) e le *trincee dinamiche aerate*, dette *letti movimentati*.

L'adozione di un determinato tipo di sistema dipende dai fattori presenti: l'area disponibile, le caratteristiche e l'ammontare dei rifiuti da trattare ed il tempo che si vuole impiegare per ottenere la stabilizzazione del materiale. Le tecnologie a sistemi chiusi sono sicuramente più costose, ma più sicure in quanto permettono di controllare maggiormente i fattori che influenzano il processo. Ciò come si vedrà in seguito non è sempre vero (Vallini, 2001).

- ***Sistema di compostaggio in andane*:** la biomassa viene disposta in strette e lunghe pile che vengono periodicamente rivoltate. La sezione delle andane può variare da 1.5 a 3.0 metri in altezza e da 3.0 a 6.0 metri in larghezza, a seconda del materiale che compone la biomassa da compostare. I valori più bassi sono raccomandati per il trattamento di materiale particolarmente denso, come i fanghi di depurazione. La frequenza dei rivoltamenti è dimensionata in base alla dimensione dell'andana, alla porosità della matrice ed all'umidità contenuta nella massa. L'andana deve essere sistemata su un substrato impermeabile per minimizzare la dispersione nel suolo delle sostanze lisciviate.

  I vantaggi di questo sistema di compostaggio vanno ricondotti alla possibilità di trattare un grosso volume di rifiuti, all'ottenimento di una buona stabilizzazione del prodotto finale ed all'impiego di capitali relativamente bassi.

Gli svantaggi sono rappresentati dalla necessità di un'ampia area per l'impianto, dagli alti costi di gestione, dal rilascio di odori in seguito alle operazioni di rivoltamento e, non ultimo, all'incerto esito sull'inattivazione dei patogeni.

- ***Sistema di compostaggio in cumuli statici aerati*:** la biomassa è disposta in una catasta simile all'andana, ma non viene rivoltata meccanicamente fino al raggiungimento della fase di stabilizzazione. La mancanza del rimestamento periodico limita l'applicazione di questo sistema di compostaggio a materiali che mantengano una struttura stabile durante il processo. Per migliorare la porosità vengono incorporati nella miscela iniziale degli agenti di "bulking" cellulosici, come le scaglie di legno. Il controllo del processo è normalmente attuato tramite la diffusione di quantità d'aria prestabilite all'interno della matrice. La distribuzione dell'aria viene attuata grazie alla presenza di tubi perforati alla base del cumulo o tramite la presenza di un grigliato metallico su cui poggia il cumulo. I tubi sono connessi a delle soffianti che vengono attivate periodicamente in base alla presenza di ossigeno nel cumulo (*Beltsville strategy*) (Epstein *et al*., 1976; Willson *et al.*, 1980) o tramite una ventilazione forzata. Quest'ultima è regolata da un controllo a feedback, quando la temperatura è eccessivamente alta vengono attivate le soffianti in modo da abbattere questo effetto durante tutta la fase termofila (*Rutgers strategy*) (Finstein *et al.*, 1980; Finstein *et al.*, 1983). I cumuli statici non sono mai più alte di 2.5 m per permettere una diffusione omogenea dell'aria all'interno della massa. E' importante coprire il cumulo con uno strato di 10 cm di compost maturo, paglia triturata o di un qualsiasi altro agente di bulking disponibile. Questo strato protegge la matrice da compostarsi dalla perdita di umidità, la isola dalla temperatura ambiente così da determinare la distruzione dei patogeni in tutte le parti del cumulo anche in quelle periferiche e agisce da biofiltro abbattendo le emissioni di ammoniaca ed il rilascio degli odori. Dei differenti sistemi di cumuli statici aerati solo il Rutgers strategy sembra avere un controllo ottimale del processo e una conseguente sensibile riduzione del tempo di stabilizzazione. Questo significa una richiesta minore di suolo rispetto a quella necessaria per il compostaggio in andane. In generale il sistema in cumuli statici aerati assicura un alto grado di distruzione dei patogeni ed un buon controllo degli odori.
- ***Sistema di compostaggio a reattori verticali ed orizzontali*:** la biomassa è completamente chiusa in container in cui viene normalmente trattenuta per più giorni o settimane (solitamente due) finché non raggiunge una parziale stabilizzazione. I reattori chiusi sono utilizzati per il trattamento iniziale dei substrati quando il rilascio degli odori ed il controllo del processo è maggiormente critico. Una volta fuori dal reattore, la matrice da compostarsi è posta in andane od in cumuli per completare la sua maturazione. Questi sistemi sono di

solito associati ad un alto capitale di investimento ed ad alti costi di gestione. Tuttavia, il controllo del processo risulta talvolta difficoltoso quando il materiale è particolarmente eterogeneo come nel caso della frazione organica del RSU.

Nei *silos* la biomassa è caricata giornalmente dalla parte alta del reattore mentre un identico volume di materiale parzialmente stabilizzato viene rimosso dal basso. L'aerazione è tipicamente apportata attraverso un sistema di ventilazione forzata, attuata tramite delle soffianti che insufflano aria in senso inverso al flusso della biomassa. Poiché questi reattori sono abbastanza alti (normalmente 4.0 m), la distribuzione dell'aria all'interno della massa spesso non è omogenea e, dunque, né la temperatura, né la quantità d'ossigeno può essere mantenuta a livelli ottimali attraverso tutto il profilo. Come nei sistemi di compostaggio a cumuli statici, anche nei reattori verticali è richiesta una biomassa con porosità stabile. In molti impianti una seconda aerazione del silos può essere presa in considerazione per avere una stabilizzazione più avanzata della matrice.

I *tamburi rotanti* sono dei reattori cilindrici montati orizzontalmente e mossi di moto circolare molto lento impresso da un motore. La rotazione causa una continua miscelazione del substrato che viene caricato da un lato del reattore e scaricato dall'altro alla fine della miscelazione. L'aerazione è fornita dall'introduzione dell'aria tramite lo scarico. Così l'aria è incanalata lungo la direzione opposta rispetto al flusso della biomassa ed è diffusa in tutta la matrice organica. Le dimensioni tipiche di un tamburo rotante sono di 3.0 m di diametro e di 35.0 m di lunghezza, con una capacità giornaliera di 50 tonnellate ed un tempo di ritenzione di tre giorni. E' evidente che un tempo di residenza così ridotto può permettere solo l'inizio del processo di decomposizione microbica che deve essere conclusa tramite una seconda fase di stabilizzazione, che viene attuata tramite sistemi in andana o in cumuli statici aerati. I tamburi rotanti sembrano avere un effetto molto positivo sulla riduzione della taglia e sull'omogeneizzazione del materiale. Tuttavia, vi è una grossa difficoltà nel mantenere all'interno del cilindro condizioni aerobiche, cosa che influisce sulla produzione di ammoniaca. I tamburi rotanti hanno una forte azione igienizzante sul substrato, ma a causa della perdita durante questo processo di gran parte dei batteri utili contro la ricolonizzazione da parte dei patogeni, il materiale durante la sua permanenza in andana può favorire il proliferare dei patogeni, che non subiscono competizione da parte degli altri batteri (vuoto biologico).

- ***Sistema a trincee dinamiche aerate (letti agitati)****:* è una tecnologia promettente. Questo sistema permette di attuare una movimentazione della massa insieme ad un controllo dell'aerazione durante il processo di compostaggio. Questi reattori sono formati da trincee lunghe, rettangolari e costruite sotto terra tramite l'edificazione di muri laterali e lasciando le

estremità aperte. Il materiale che deve essere compostato viene condotto all'estremità di carico del letto. I rivoltamenti vengono attuati tramite l'azione di un carro ponte che si sposta su rotaie al di sopra della trincea. Questa macchina è munita di una lama cilindrica della stessa larghezza della trincea. La posizione della lama può essere regolata in altezza in modo da smuovere la massa da compostarsi. Ad ogni passaggio il ponte mobile sposta il substrato verso l'estremità di uscita. La miscelazione è importante per rompere gli agglomerati troppo grossi, per mantenere la porosità e per aerare la massa. L'apporto di ossigeno per l'attività microbica e la dissipazione del calore sono garantiti dall'insufflazione d'aria all'interno della matrice da compostarsi. Lungo la trincea la biomassa a diverso grado di stabilizzazione (più stabilizzata verso lo scarico rispetto a quanto non lo sia nei pressi dell'ingresso) viene aerata da diverse soffianti regolate in base alle esigenze delle diverse zone tramite un sistema di regolazione a feedback controllato dalla temperatura o da un temporizzatore. Il tempo di residenza è di cinque o sei settimane, il che dovrebbe assicurare la completa stabilizzazione delle differenti miscele di rifiuti organici (Vallini *et al.*, 1990). Le trincee dinamiche aerate hanno mostrato un efficiente controllo degli odori e della distruzione dei patogeni.

1.2. IL COMPOST

1.2.1. La qualità del compost

La qualità è quella proprietà essenziale che viene richiesta al prodotto compost per poter essere riutilizzato in agricoltura in qualità di ammendante.

Dire che un compost è di qualità significa che il materiale di cui si parla rispetta dei limiti stabiliti di contenuto in metalli pesanti, in inquinanti organici e rispetta determinati requisiti igienici. Il contenuto in metalli pesanti e in inquinanti organici è stabilito localmente in base alla maggiore o minore sensibilità ambientale, mentre i requisiti igienici devono assicurare l'assenza di nocività per l'ambiente, gli operatori e per i prodotti agricoli che verranno coltivati sui terreni ammendati con il compost. Per quanto riguarda gli inquinanti organici solo la legislazione danese presenta dei limiti da rispettare, in quanto negli altri Paesi o non ci si è interessati del problema o quando anche siano stati effettuati accertamenti analitici non si sono mai trovati valori preoccupanti (Barth, 2001).

La qualità del compost viene assicurata tramite l'utilizzo di certificazioni (come per esempio l'EU – EMAS, ISO 14000 – ECOLABEL – marchi di qualità). Per poter avere la sicurezza di utilizzare un compost di qualità è opportuno tenere conto dei seguenti aspetti (Barth, 2001):

- materia prima;
- controlli all'arrivo;

- limiti per le sostanze nocive;
- criteri di qualità per valutare i costituenti del compost;
- produzione del compost;
- controllo esterno sul prodotto e/o sulla produzione;
- monitoraggio interno;
- etichetta di qualità per il prodotto;
- certificati per l'impianto e/o per il prodotto;
- dichiarazione delle proprietà del compost;
- raccomandazioni per l'uso e l'applicazione;
- formazione e qualifica dell'operatore;
- gestione degli impianti;
- certificazione annuale.

La produzione di un compost di qualità presenta diverse fasi fondamentali (Barth, 2001):

- raccolta differenziata: è fondamentale che questa sia fatta in modo corretto così da ottenere materiale privo di sostanze non compostabili quali inerti e di sostanze nocive;
- Struttura dell'impianto: se vi fossero carenze impiantistiche queste sarebbero facilmente identificabili tramite il controllo della qualità del prodotto. Questo punto è fondamentale anche perché è necessario assicurare un efficiente controllo igienico dell'impianto per garantire la difesa dei lavoratori;
- Produzione del compost;
- Vendita: questo punto è fondamentale, perché altrimenti gli sforzi per produrre qualcosa di utile verrebbero vanificati. Per spingere gli agricoltori ad accettare questo prodotto è necessaria una forte attività pubblicitaria, supportata da leggi che impongano limiti per identificare compost di diverse qualità e da certificazioni che assicurino che siano stati eseguiti i necessari controlli;
- Pubblicità, che mostri come il compost possa essere di qualità sicura e che dunque faccia diminuire le perplessità che gli agricoltori nutrono nei confronti di questo prodotto;
- Applicazione: se attuata secondo le raccomandazioni d'uso assicura un buon effetto sul suolo;
- Costanza del prodotto: importante per garantire una ripetibilità dei risultati ottenuti nei diversi anni e fondamentale per assicurare la bontà delle caratteristiche analitiche del compost;

- Politica e legislazione che regolino la produzione del compost in modo da tutelare i consumatori;
- Certificazione: tramite i marchi di qualità si dà sicurezza al consumatore. A una data certificazione l'agricoltore sa che corrispondono determinate caratteristiche di qualità del compost;
- Impiego del prodotto: l'ampia attenzione dedicata alla qualità del compost è essenziale per le finalità ultime che hanno stimolato lo studio di questo materiale: ovvero il contemporaneo riciclaggio di un materiale altrimenti considerabile solo come rifiuto ed il risolvere i problemi legati all'apporto di sostanza organica al suolo.

1.2.2. Criteri di qualità del compost

L'utilizzo di compost prodotto partendo dai rifiuti organici, può rappresentare una possibile soluzione sia al problema della crescente riduzione della sostanza organica nei terreni coltivati, che al problema dello smaltimento dei rifiuti organici prodotti.

La possibilità di poter collocare sul mercato il compost, è strettamente correlata alla qualità del compost prodotto, alla quantità e alla qualità della sostanza organica contenuta nello stesso, alla sua maturità e stabilità e al grado di evoluzione della sostanza organica (Caporali, 1991).

Per ottenere un compost di buona qualità, è necessario impiegare materiali idonei ed operare con una corretta tecnica di trattamento ed un'adeguata attrezzatura impiantistica. La qualità dei materiali di partenza è molto importante, in quanto influenza la qualità del compost finale, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche ambientali del compost stesso. Materiali sicuramente compostabili possono provenire da utenze selezionate come mercati, mense, caserme, esercizi commerciali di generi alimentari; la qualità di questi rifiuti è elevata, anche se in alcuni casi, possono dar luogo a compost contaminati da materiali inerti (plastica, vetro) o con elevato contenuto in sali solubili. Anche dalla raccolta del materiale organico domestico, si è visto che si ottiene un rifiuto costituito prevalentemente da sostanza organica, con piccole quantità di plastica e vetro.

Recenti ricerche hanno dimostrato che la raccolta differenziata effettivamente attuata nella provincia di Milano permette di ottenere una purezza del materiale compostabile del 97-98% (peso/peso), valore buono per l'influenza che esso ha sulla qualità del compost (Cortellini e Favonio, 2001).

La qualità di un compost, può essere quindi determinata in base alla presenza di:

✍*metalli pesanti*, in particolare modo zinco, cadmio, piombo e rame. I limiti imposti per questi elementi sono dettati non tanto dalla paura di effetti fitotossici dei metalli stessi, effetti che si potrebbero riscontrare a concentrazioni molto superiori a quelle trovate anche nei peggiori

compost, quanto alla necessità di preservare i terreni agricoli dall'apporto eccessivo di tali elementi, che hanno come caratteristica l'accumulo nel suolo;

- *materiali inerti* (plastica e vetro) compromettono l'immagine di un compost e si accumulano nel suolo;
- *agenti patogeni* per gli animali e le piante. I compost prodotti correttamente sono privi di questi agenti, anzi sono in grado di esercitare un'azione repressiva nei confronti di alcuni fitopatogeni anche dopo essere stati distribuiti in campo.

Per poter essere usato con vantaggio in agricoltura il compost deve trovarsi generalmente in uno stadio avanzato del processo di stabilizzazione o almeno aver completato la fase termofila (raggiungimento di condizioni igienico sanitarie accettabili) e la decomposizione della maggior parte del materiale organico facilmente attaccabile da parte dei microrganismi (Sequi, 1989).
Per valutare il grado di stabilizzazione della sostanza organica sono utilizzati dei parametri dell'umificazione basati sulla determinazione delle sostanze umiche.

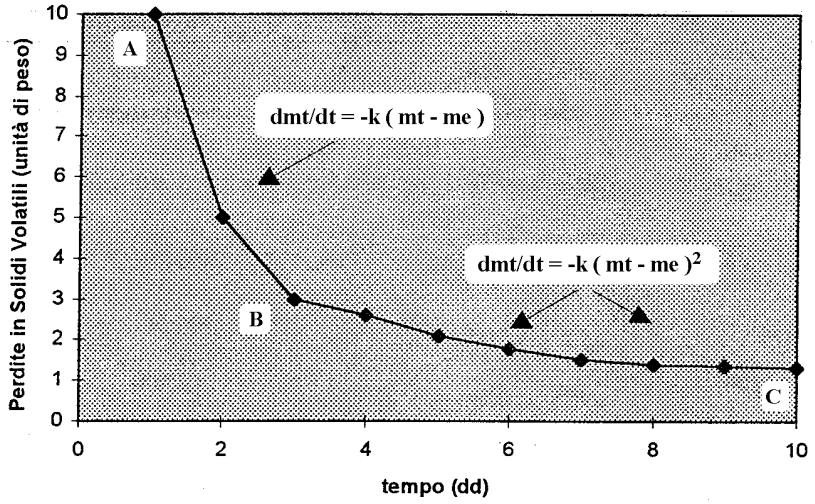
1.3. STABILITÀ BIOLOGICA, MATURITÀ ED EVOLUZIONE DELLA SOSTANZA ORGANICA

Come già spiegato, i processi biologici alla base del compostaggio, bioessiccamento e biostabilizzazione, hanno quale obiettivo la totale o parziale degradazione della frazione organica fermentescibile per ottenere la stabilità biologica.
L'evoluzione della sostanza organica nei processi di compostaggio e nei processi aerobici biologici in genere, procede sia in termini quantitativi (variazione del peso totale di ogni singola frazione della sostanza organica contenuta), che qualitativi (modificazione della struttura molecolare delle frazioni organiche). E' in seguito a tali processi che la sostanza organica contenuta diviene stabile, matura ed umificata, raggiungendo un grado di evoluzione che dipenderà dai tempi di processo e dalle modalità adottate (Adani e Tambone, 1998).
Il concetto di stabilità biologica applicato ai processi aerobici, è stato in passato oggetto di molte interpretazioni e spesso usato quale sinonimo di maturità ed umificazione (Adani e Tambone, 1998). Appare opportuno dunque fornire un'esatta definizione di questi concetti.

1.3.1. Stabilità biologica

La stabilità biologica indica lo stato in cui, garantite le condizioni ottimali per l'esplicarsi delle attività microbiologiche in condizioni aerobiche (ottimizzazione dei parametri chimico-fisici), i processi di biodegradazione si presentano alquanto rallentati (Adani e Tambone, 1998).

Graficamente il raggiungimento della stabilità può essere individuato riportando le perdite dei solidi volatili in funzione del tempo, come visualizzato nella figura 1.3.1.1.



Legenda:
k= cost.di reazione;
m_t = massa al tempo t;
m_e = massa all'equilibrio;
A–B= instabilità;
B-C= stabilità biologica.

Fig.1.3.1.1. Raggiungimento della stabilità biologica in un processo aerobico. (Keener et al.,1993).

Da un punto di vista matematico, da studi effettuati presso il Di.Pro.Ve. (Genevini et al., 1997; Adani et al., 1998), una cinetica di degradazione dei solidi volatili di primo ordine (fase di intensa degradazione, tratto A-B della curva) individua uno stato di non Stabilità Biologica.
Al contrario, cinetiche di degradazione d'ordine superiore (secondo e terzo) individuano il raggiungimento della Stabilità Biologica (tratto B-C della curva).

1.3.2. Maturità

Un substrato è considerato maturo quando non mostra fenomeni di fitotossicità.
Il raggiungimento della maturità è indipendente dalla stabilità biologica; ne è un esempio il fatto che molti fanghi biologici, a diversi stadi di digestione, presentano elevata instabilità biologica, pur non mostrando effetti di fitotossicità apprezzabile (Regione Lombardia, 1999;). Tuttavia dipendendo la fitotossicità dalla presenza metaboliti intermedi della via di decomposizione, potrebbe esservi in taluni casi, una relazione diretta.

Per una corretta valutazione della maturità, ci si affida a test ormai collaudati (Astori, 1998).

1.3.3. Evoluzione della sostanza organica

La trasformazione della sostanza organica in sostanze umiche è sempre stata di estremo interesse per i chimici del suolo e gli ecologi (Stevenson, 1982). Grazie agli effetti che quest'ultime dimostrano sulle proprietà chimico-fisiche del suolo e sulla crescita delle piante, la loro concentrazione viene spesso utilizzata quale indicatore della qualità di un compost (Chen and Aviad, 1990).

I numerosi studi condotti concordano nell'osservare un aumento, nel compost, del contenuto di sostanze umiche durante il progredire del processo (Chen and Inbar, 1993).

Se è vero infatti che la letteratura nazionale e internazionale concordano nell'affermare che compostaggio equivale a umificazione, pochi lavori scientifici lo dimostrano in modo inequivocabile. Da un recente studio su 19 processi di compostaggio (15 dei quali ricavati dalla letteratura internazionale), Adani et al. (2001) hanno potuto osservare che non vi era alcun incremento netto di sostanze umiche ed anzi, al contrario, si assisteva ad una generale diminuzione del loro contenuto.

Risulta più corretto interpretare il processo di umificazione durante il compostaggio più come una concentrazione dì molecole umo-simili (degradazione di frazioni pseudo-umiche) piuttosto che un vero e proprio processo di sintesi.

E' evidente che, essendo il contenuto di frazioni umificate frutto di processi di "concentrazione" e di trasformazione, più elevato è il contenuto iniziale di sostanze umo-simili, maggiore sarà il loro contenuto nel compost finale. In tale ottica è evidente che la presenza di frazioni lignocellulosiche sarà favorevole per l'ottenimento di compost di qualità.

1.4. DETERMINAZIONE DELLA STABILITÀ BIOLOGICA.

Per determinare la stabilità biologica di un rifiuto esistono diverse metodologie. In particolare, nella presente trattazione verranno considerate le seguenti:

A. metodo biologico di tipo aerobico: metodi respirometrici ? consumo di ossigeno, produzione di CO_2;
B. metodo biologico di tipo anaerobico: produzione residua del biogas? quantità prodotta di anidride carbonica e metano;
C. metodo chimico: quantità di solidi potenzialmente fermentescibili ? frazione di solidi volatili che viene realmente biodegradata durante i processi biologici.

1.4.1. Metodi biologici aerobi: metodi respirometrici

La stabilità è funzione dell'attività biologica e perciò la sua misura dovrà essere strettamente legata alla determinazione di quest'ultima (Adani et al., 1997).

In passato sono stati proposti molti metodi analitici per determinare la Stabilità Biologica (Iannotti et al., 1992; Adani et al., 1995). Tra di essi i metodi che misurano 1'attività respirometrica hanno ricevuto molta attenzione dai ricercatori (Iannotti et al., 1992). I test di respirazione stimano la produzione di anidride carbonica (Naganawa et al., 1990) o il consumo di ossigeno della biomassa (Iannotti et al., 1992). I metodi basati sull'evoluzione di CO_2 sono economici ma non differenziano tra produzione aerobica ed anaerobica di CO_2 (Lasaridi e Stentiford, 1996) ed inoltre non tengono conto che il grado di ossidazione della materia organica influenza il consumo di ossigeno per mole di CO_2 prodotta (Haug, 1986). La misura del consumo di ossigeno, perciò, è preferita come metodo respirometrico ed è stata proposta come metodo standard per la determinazione della Stabilità Biologica (ASTM, 1992; ASTM, 1996; The US Composting Council, 1997). I test di respirazione basati sulla misura del consumo di ossigeno possono essere classificati in metodi statici e dinamici (Adani e Tambone, 1998), a seconda che la misura del consumo d'ossigeno sia effettuata in assenza (statico) (UNI 10780, 1998) o presenza (dinamico) (ASTM, 1996) di aerazione continua della biomassa. I metodi statici, condotti a volume costante (Nicolardot et al., 1982) o a pressione costante (Van Der Werf et al., 1987), presentano lo svantaggio di limitare la diffusione e la dispersione dell'ossigeno nella biomassa rallentando, di fatto, i processi di degradazione della sostanza organica (Paletski e Young, 1995). Inoltre, 1'impossibilità di allontanare 1'aria esausta dalla biomassa, riduce ulteriormente 1'attività biologica sia in seguito alla diminuzione del pH che per il realizzarsi di fenomeni di tossicità diretta dovuti all'accumulo di CO_2 o di altri

gas di fermentazione (Paletski e Young, 1995). Risulta inoltre difficile, con tali metodi, stimare 1'entità degli spazi vuoti ottenendo quindi un dato respirometrico non rigoroso. Conseguenza di tutto ciò risulta essere la sottostima del consumo di ossigeno (Muller et al., 1998). L'indice dinamico proposto da ASTM (1996) risulta invece macchinoso rendendo la determinazione routinaria di lunga durata e pertanto molto costosa. In tempi recenti è stato messo a punto presso il DiProVe sez. FCA un nuovo metodo di misura per la determinazione dell'indice respirometrico di tipo dinamico (Adani, 1993), metodo ufficiale della Regione lombardia, testato a livello internazionale (Scaglia et al., Adani et al. 2001) ed inoltre recentemente indicato quale misura della stabilità biologica dalla Comunità Europea (Working Paper 2001).

1.4.1.1. Il consumo orario di ossigeno: l'indice di respirazione

Il consumo di ossigeno riferito all'unità di peso (solidi totali: ST, solidi volatili: SV o solidi potenzialmente fermentescibili: SPf, cfr. Adani et al., 1997) ed all'unità di tempo prende il nome di Indice di Respirazione.

L'unità di misura dell'Indice di Respirazione, stante la sua definizione, è:

$mg\ O_2 * kg\ ST^{-1}$ o SV^{-1}o $SPf^{-1} * h^{-1}$

Le procedure analitiche proposte per la misura dell'Indice di Respirazione si rifanno tutte al medesimo concetto, anche se talune differenze, caratterizzanti i diversi metodi, possono risultare fondamentali.

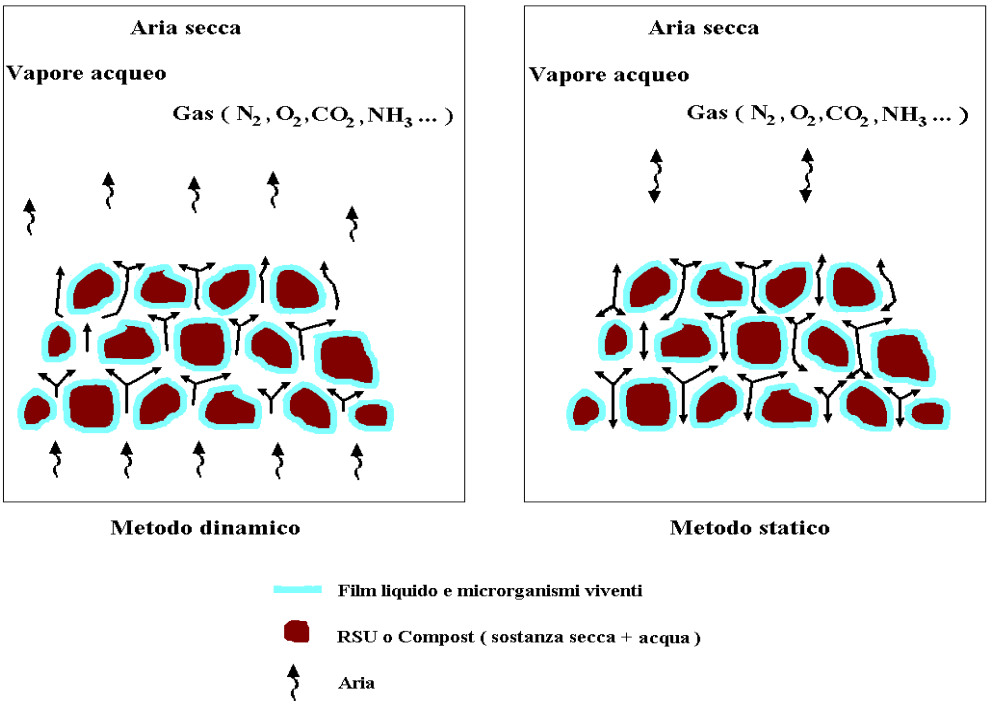


Figura 1.4.1.1.: Differenza di funzionamento per l'indice di respirazione statico e dinamico.

Esistono come già accennato, due tipologie di metodi (fig. 1.4.1.1.):

I. metodi statici;
II. metodi dinamici.

I primi si differenziano dai secondi essenzialmente per il fatto che la misura del consumo orario di ossigeno non viene effettuato in condizioni di aerazione forzata attraverso la biomassa in continuo.

Come già accennato, a loro volta i metodi statici si possono suddividere in:

- metodi a caduta d'ossigeno;
- metodi a concentrazione di ossigeno costante.

La differenza consiste nel fatto che mentre i primi misurano il consumo orario di ossigeno in assenza di aerazione durante un determinato intervallo di tempo (DIVAPRA e IPLA, 1992), consumo che avviene secondo l'equazione di una retta, i secondi prevedono accorgimenti tecnologici che permettono il continuo apporto delle quantità di ossigeno consumato mantenendo così la concentrazione iniziale (Ciccotti e Toller, 1990).

Esiste un'altra categoria di metodi respirometrici di vecchia concezione che fanno invece riferimento alla misura della produzione di anidride carbonica. Questo metodo, anche se presenta l'indubbio vantaggio dell'economicità, permette solo una stima del consumo di ossigeno. Valori più accurati, del tutto analoghi a quelli ottenibili con i metodi statici a caduta di ossigeno, potrebbero realizzarsi solo avendo una perfetta conoscenza dei rapporti molari di reazione O_2: CO_2.

L'orientamento attuale dovrebbe essere in favore dei metodi dinamici. Ciò in particolare emerge dalle considerazioni esposte di seguito.

Nel sistema di tipo dinamico la misura viene effettuata in presenza di aerazione forzata continua garantendo concentrazioni di ossigeno nella biomassa ottimali per l'esplicarsi delle attività biologiche (O_2 > 14 %). A differenza dei sistemi statici, dove non è prevista un'insufflazione diretta di aria, l'adozione di questo sistema consente di ottenere dati più veritieri e, come tali, trasferibili alla realtà operativa.

Dati analitici ottenuti adottando metodi statici (Scaglia et al., 2000) hanno dimostrato una sottostima dei consumi di ossigeno e quindi della stabilità biologica, rispetto ai dati rilevati con il metodo dinamico (le differenze si attenuano con il raggiungimento della stabilità biologica).

Una stretta correlazione deve sussistere tra consumo di ossigeno e le perdite in carbonio (e in sostanza organica) che si osservano durante le prove di digestione aerobiche. Tale relazione è stata evidenziata solo dall'adozione del metodo respirometrico di tipo dinamico (Scaglia et al., 2000).

Semplicità nel calcolo dell'Indice di Respirazione (vedi capitolo 2.5.5): infatti, il metodo dinamico, basandosi sulla differenza di concentrazione di ossigeno tra ingresso e uscita del

respirometro e sulla conoscenza dei flussi di aria adottati, permette di svincolarsi da procedure analitiche artificiose e talvolta scientificamente poco probabili riportate per i metodi statici.

1.4.2. Determinazione del grado di evoluzione della sostanza organica

Recentemente è stato proposto da Adani *et al.* (1995) un nuovo indice l'OMEI (organic matter evolution index), ormai affermatosi anche a livello internazionale (Adani *et al.*, 1997; Chefetz *et al.*, 1998), che permette la misura del grado di evoluzione della sostanza organica:

$$OMEI = \text{core-HA} / HA$$

dove il termine core-HA rappresenta il carbonio degli acidi umici ottenuti dopo un processo di purificazione atto ad eliminare tutte le molecole non umiche (frazioni pseudo-umiche) che inevitabilmente vengono coestratte con le comuni metodiche di determinazione degli acidi umici (Adani *et al.*, 1995) e HA gli acidi umici ottenuti secondo le metodiche tradizionali (Ciavatta *et al.*, 1990).

Questo indice può assumere valori compresi tra 0 e 1 e i termini core-HA e HA finiscono per identificarsi mano a mano che la sostanza organica evolve.

1.4.2.1. Umificazione durante il compostaggio

L'umificazione, ossia il processo di trasformazione quantitativo e qualitativo della sostanza organica in sostanze umiche (Adani *et al.*, 1998), è indicata come il fattore chiave per la qualità del compost in quanto esercita una forte influenza sulla struttura, sull'ecologia e sulla fertilità del suolo, ed in quanto ha un benefico effetto sulla crescita delle piante (Chen e Aviad, 1990).

Molti lavori hanno spiegato il processo di umificazione durante il compostaggio (Chefetz *et al.*, 1996; Deiana *et al.*, 1990; Sugahara e Inoko, 1981).

Tutti i risultati suggeriscono che il compostaggio determina sia una trasformazione chimica della sostanza organica verso le sostanze umiche (aspetto qualitativo) sia una produzione ex novo di queste ultime (aspetto quantitativo).

Mentre la trasformazione qualitativa della sostanza organica è ben documentata in letteratura (Chen e Inbar, 1993), nessun dato scientifico ha confermato con certezza che durante il compostaggio vi sia un aumento del contenuto di sostanze umiche.

Questo è dovuto al fatto che il contenuto di sostanze umiche è generalmente espresso in termini relativi (g / kg TS o g / kg SV), evidenziando cioè incrementi relativi.

Recentemente, Adani *et al.* (1995 e 1997) e Chefetz *et al.* (1998) hanno osservato, studiando processi di compostaggio a lungo termine, come in termini assoluti vi sia una diminuzione del contenuto di sostanze umiche.

Adani *et al.* (1999), infatti, studiando 18 processi di compostaggio, hanno osservato soprattutto nei primi mesi una diminuzione in termini assoluti del contenuto di sostanze umiche, in antitesi con quanto sino ad ora sostenuto. Tale diminuzione è dovuta alla degradazione di sostanze non umiche come lipidi, proteine e carboidrati (materiale interferente), coestratte con le soluzioni alcaline (Adani *et al.*, 1995). Per questo il contenuto di carbonio umificato è in genere sovrastimato (Roletto *et al.*, 1985).

Studi di Adani *et al.* (1999) mostrano come dopo una forte riduzione, i contenuti di HA si stabilizzino.

Ciò suggerisce la presenza, nei materiali compostati, di un nucleo (core-HA) coperto da molecole organiche degradabili (Adani *et al.*, 1997), che vengono eliminate durante il processo dall'attività dei microrganismi.

Adani *et al.* (1997) e Cheftz *et al.* (1998) indicano che bisogna migliorare lo studio del processo di umificazione alla luce dei dati assoluti relativi al contenuto di core-acido umico.

Chefetz *et al.* (1998) hanno osservato l'evoluzione totale di acido umico e core-acido umico durante il processo di compostaggio di residui solidi urbani: il livello di AU diminuisce, mentre il livello di core-HA rimane stabile, senza che avvenga la formazione di ulteriori HA durante il processo di compostaggio.

In conclusione si osserva che, durante il compostaggio, da un punto di vista quantitativo, l'umificazione deve intendersi come una degradazione della frazione organica associata al core - HA (Adani *et al.*, 1999).

2. MATERIALI E METODI

2.1. PIANO SPERIMENTALE

Il programma sperimentale si è proposto come obiettivo la piena acquisizione di informazioni sulla strategia dell'avvio di materiale cartaceo a compostaggio.

La sperimentazione è stata articolata in prove di compostaggio successive mediante l'utilizzo di due tecnologie diverse tra loro:

1- Tecnologia a bio-container (Figura 2.1.1.)

2- Tecnologia a cumuli statici senza rivoltamento.

Figura 2.1.1.: Tecnologia a bio-container.

Il piano sperimentale proposto (Tabella 2.1.1.) è quello delle "prove a carico progressivo", ossia a percentuale crescente di matrici fermentescibili (la parte problematica dal punto di vista processistico), aumentando così progressivamente le condizioni di "criticità" del processo, allo scopo di esplorare l'efficacia dei materiali cartacei come materiale strutturante alternativo agli scarti di manutenzione del verde. Inoltre come seconda variabile è stata modificata la percentuale di sostituzione dello scarto vegetale con il materiale cartaceo.

Tabella 2.1.1.: Schema *proposto* per le prove sperimentali.

Tesi	Proporzioni materiale di struttura / matrici fermentescibili (p/p)	% materiale cartaceo/materiale di struttura (p/p)	% di materiale cartaceo/su totale (p/p)
1	50/50	50%	25%
2	50/50	100%	50%
3	40/60	50%	20%
4	40/60	100%	40%
5	30/70	50%	15%
6	30/70	100%	30%

Una prova preliminare è stata condotta allo scopo di valutare e risolvere eventuali problemi nella gestione della carta.

La pre-prova ha evidenziato alcuni problemi relativi alla buona conduzione del processo: la percentuale elevata di carta ha condizionato negativamente l'innesco del processo.

Ciò ha indotto i tecnici dell'Università degli Studi di Milano a variare le quote di carta riducendo le percentuali di partenza del materiale cartaceo.

Per i problemi riscontrati si è deciso di modificare il piano sperimentale precedentemente ipotizzato, con il seguente (Tabella 2.1.2.).

Tabella 2.1.2.: Schema *adottato* per le prove sperimentali.

Tesi	Proporzioni tra materiale di struttura e matrici fermentescibili (p/p)	% materiale cartaceo su materiale di struttura (p/p)	% di materiale cartaceo su totale (p/p)
1A	50/50	30%	15%
2B1	40/60	30%	12%
1B	40/60	30%	12%
2B2	40/60	45%	18%
1C	30/70	30%	9%
2B3	40/60	60%	24%

Le prove sperimentali sin qui effettuate, sono state eseguite in un impianto con tecnologia di tipo "statico aerato" ossia mediante insufflazione della biomassa e senza rivoltamento. Le tecnologie di tipo "statico", richiedono generalmente una buona condizione strutturale del materiale in partenza e dunque, configurano esigenze diverse per quanto riguarda le percentuali di materiale di supporto (matrici vegetali e cartacee).

Sperimentazione in bio-container: Impianto Compostaggio Lodigiano sito a Villanova Sillaro (Lodi).

I° ciclo.

Sono state approntate le prime tre prove sperimentali:

TESI 1A con rapporto di miscelazione 50/50 ed una percentuale di carta del 15%;

TESI 1B con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 12%;

TESI 1C con rapporto di miscelazione 30/70 ed una percentuale di carta del 9%.

Sulla base dei risultati ottenuti da queste prime prove si è pianificato un secondo ciclo di prove sperimentali adottando delle tipologie di miscelazione ottimali dal punto di vista processistico.

II° ciclo.

TESI 2B1 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 12%;

TESI 2B2 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 18%;

TESI 2B3 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 24%.

Sperimentazione con tecnologia a cumuli statici: Impianto AIMAG sito a Carpi.

III° ciclo.

TESI 3B1 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 12%;

TESI 3B2 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 18%;

TESI 3B3 con rapporto di miscelazione 40/60 ed una percentuale di carta del 24%.

2.2. CAMPIONAMENTO DEL RIFIUTO PER LE ANALISI IN LABORATORIO.

2.2.1. Modalità di campionamento

Per verificare il corretto andamento del processo di compostaggio nell'impianto, sono stati prelevati alcuni campioni di materiale da sottoporre ad analisi respirometrica presso il DiProVe sez. FCA – Università degli Studi di Milano.

Prima di effettuare il campionamento vero e proprio, si è presa visione del processo produttivo e delle condizioni che determinavano la formazione del rifiuto nella situazione operativa, allo scopo di poter meglio stabilire la strategia di campionamento.

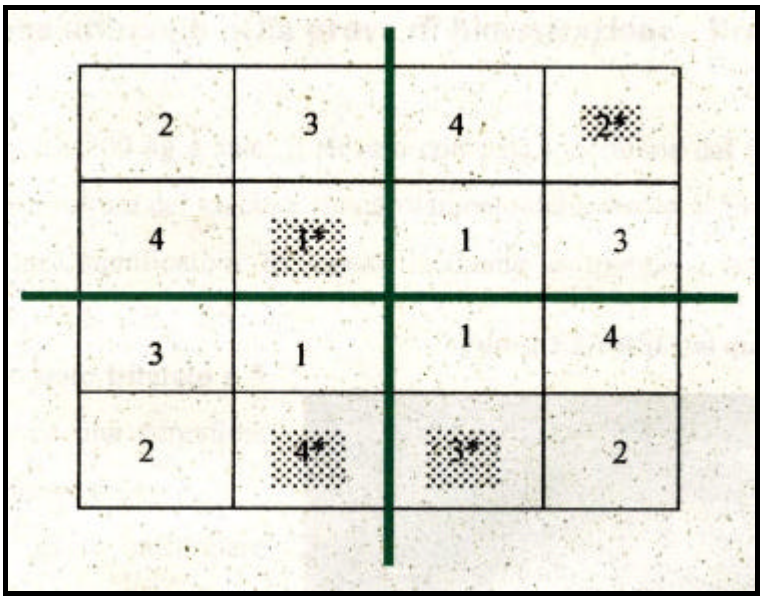


Figura 2.2.1.1. Prelievo a griglia.

Le miscele adottate (in particolare a causa della carta) sono matrici ad elevata eterogeneità chimica – fisica, perciò risulta determinante, ai fini dell'affidabilità dei risultati delle varie analisi condotte, l'accuratezza con cui viene effettuato il campionamento. Per arrivare ad una frazione rappresentativa che è l'obiettivo principale di questa fase, si è adottato quale sistema di prelievo quello a "griglia" (AA.VV., 1995). Lo schema riportato in figura 2.2.1.1 mostra chiaramente la disposizione del rifiuto da campionare.

I campionamenti sono stati effettuati ad inizio e fine processo di biossidazione (Fase Attiva), ad un mese di maturazione e alla fine della stessa.

2.2.2. Confezionamento ed etichettatura

I vari campioni di circa 20-40 kg, ottenuti secondo la procedura riportata nel capitolo 2.3.1, sono stati collocati in sacchetti di plastica opportunamente chiusi in modo da evitare eventuali perdite di sostanza e mantenere l'effettivo tenore d'umidità durante il trasporto in laboratorio, al fine di essere poi utilizzati per gli scopi preposti.
Infine, sul sacchetto viene applicata un'etichetta per identificare il campione, riportando le seguenti informazioni:

I. data del campionamento;
II. numero del campione;
III. breve descrizione del campione;
IV. peso totale del campione.

2.2.3. Ripartizione dei campioni da analizzare in laboratorio

Quando il campione conservato in un sacco di plastica giunge in laboratorio, esso ha un peso che si aggira circa sui 25-40 kg. Dopo l'apertura del sacco, si fanno ulteriori campionamenti (sempre seguendo i criteri esposti precedentemente) e così il rifiuto proveniente dall'impianto reale viene frazionato procedendo nel seguente modo:

a) Una quantità di rifiuti pari a 20-40 kg viene inserita, dopo aver garantito un contenuto di umidità ottimale, nel respirometro e lì rimane fino alla fine dell'analisi.
b) Un porzione di circa 2-4 kg di rifiuto viene collocato in stufa ventilata a 105°C, previa pesatura su un piano di metallo al fine di aumentare la superficie d'evaporazione. Al raggiungimento del peso costante, in media conseguito entro le 48 – 72 ore, i campioni erano di nuovo pesati allo scopo di determinare il contenuto iniziale di acqua; successivamente riposti in sacchetti di plastica, ermeticamente sigillati ed etichettati con le relative

informazioni. Alla fase di prelievo ed essiccazione segue la frantumazione del campione con un mulino a lame elicoidali, fino a ridurre il materiale alla pezzatura di Ø < 5 mm. Al fine di poter svolgere le successive analisi chimiche sul residuo secco è stato eseguito un ultimo campionamento sulla matrice macinata a 5 mm. Pertanto si è disposto su un pianale di metallo il rifiuto triturato ed omogeneizzato di ogni campione e sono state prelevate, attraverso il metodo della quartatura già descritto (paragrafo 2.2.1), due frazioni di peso compreso fra i 20 ed i 30 grammi, che andavano a costituire il campione finale.

c) Alcune tracce si perdono durante le operazioni di smistamento e non vengono recuperate nel timore di inquinare il campione con materiale estraneo.

2.3. IL TEST RESPIROMETRICO

Il test di respirazione viene effettuato in un "respirometro aerobico a flusso continuo" (Costech, Cernusco S.N., Milano, Italia,) (Adani 2001, Scaglia et al. 2000).

2.3.1. Respirometro

Il respirometro (Figura 2.3.1.1.) consta di:

- un corpo reattore adiabatico della capacità di 100 litri;
- un sistema di aerazione munito di regolatore di flusso, misuratore di portata e sistema di umidificazione dell'aria;
- un sistema di rilevamento in/out delle concentrazioni di ossigeno;
- una sonda termometrica per la misura della temperatura esterna ed interna alla biomassa in fermentazione;
- un sistema di registrazione in continuo di concentrazioni di ossigeno, temperature e portate d'aria;
- sistema di raccolta delle condense.

I dati monitorati ed immessi nel Personal Computer possono in seguito essere opportunamente gestiti ed elaborati secondo gli obiettivi che si vogliono perseguire.

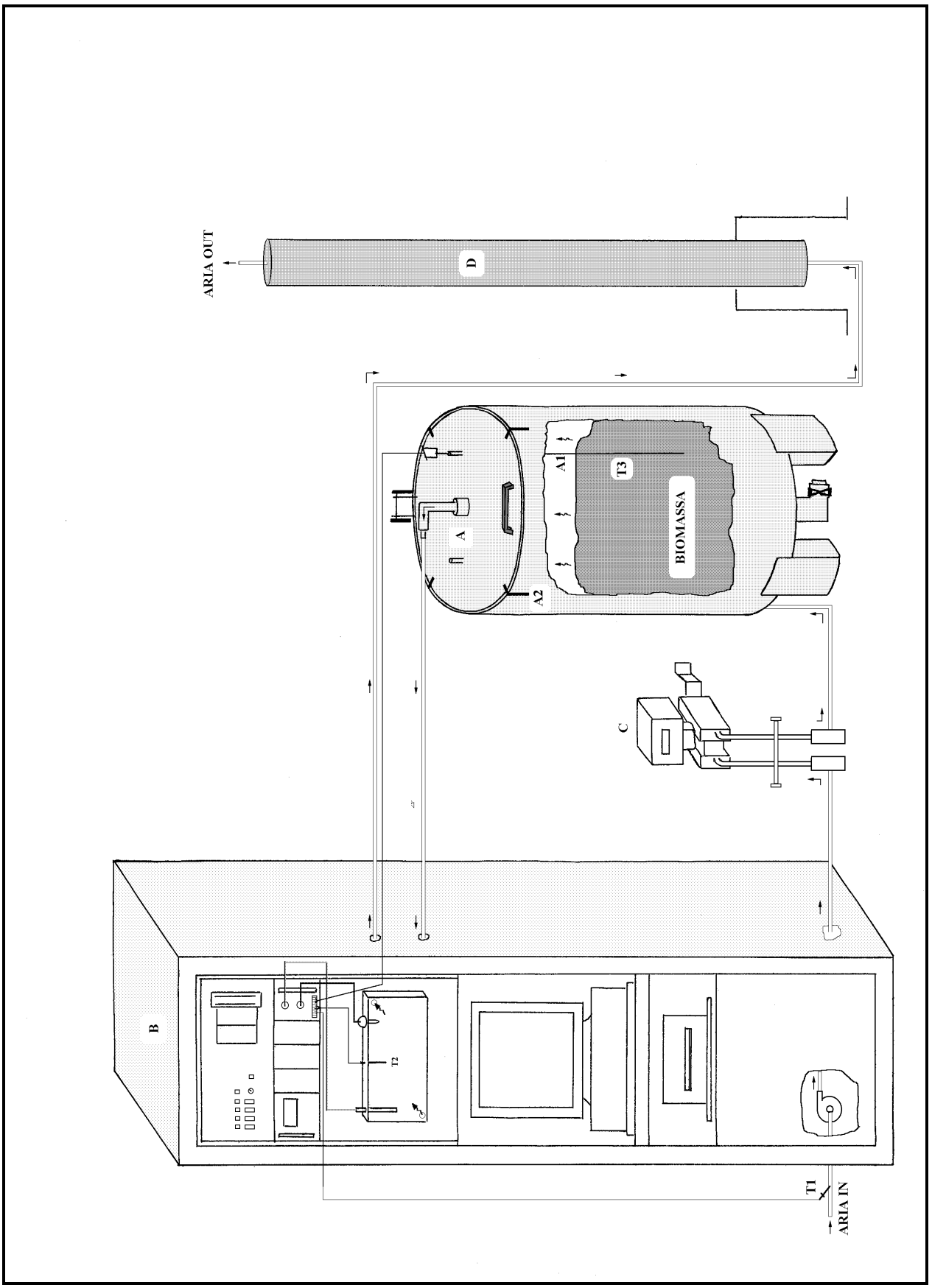


Figura 2.3.1.1. Schema del respirometro.

2.3.2. Rilevamento dei parametri di processo nel respirometro

I diversi parametri di processo sono stati monitorati, registrati e memorizzati in continuo su Personal Computer, munito di un apposito programma per la gestione dei dati registrati durante la durata di tutta la prova.

- Temperatura.

Le temperature rilevate si riferiscono a quelle dell'aria in ingresso nel fermentatore, della cella di misura dei parametri O_2 e CO_2 e della biomassa nel fermentatore.
Le misurazioni sono state effettuate mediante tre sonde termometriche (PT 100), di cui una posta direttamente a contatto con la biomassa.

- Umidità.

La determinazione dell'umidità (DI.VA.PRA., 1992) è stata effettuata sui campioni prelevati secondo quanto già detto (capitolo 2.3.3), esprimendo il contenuto in valore percentuale ed assoluto sul tal quale.

- Portate d'aerazione e concentrazione d'ossigeno.

Le quantità d'aria immesse nel respirometro sono state scelte in modo tale da mantenere concentrazioni d'ossigeno, nel flusso d'aria in uscita, superiori al 14 % (v/v). Questo valore è ritenuto indispensabile per il mantenimento di condizioni aerobiche della biomassa.
Il flusso d'aria, misurato dal sensore in litri/ora, è stato successivamente riferito all'unità di peso dei solidi totali e dei solidi volatili.
In particolare, la concentrazione dell'ossigeno viene misurato con un apposito elettrodo (elettrodo di Clark).

2.4. DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI RESPIRAZIONE DINAMICO.

2.4.1. Considerazioni preliminari

L'Indice di Respirazione Dinamico (IRD) viene determinato valutando il consumo di ossigeno richiesto per la biodegradazione delle frazioni fermentescibili contenute nella massa, per unità di tempo. A seconda delle condizioni operative adottate per l'esecuzione del test respirometrico, si definisce Indice di Respirazione Reale (IRDR) quando il test viene eseguito su di un campione tal quale, così come si presenta al laboratorio, e Indice di Respirazione Potenziale (IRDP) se la determinazione avviene su un campione standardizzato per quanto attiene i principali parametri

di processo (ciò consente di operare in condizioni controllate a vantaggio della confrontabilità dei risultati derivanti dai diversi campioni testati).

Il dato respirometrico potrà esprimersi sull'unità di peso dei Solidi Totali (ST), dei Solidi Volatili (SV) e dei Solidi Potenzialmente Fermentescibili (SPF). Quest'ultima notazione permette di discriminare tra i solidi volatili "non fermentescibili" (quali plastiche, gomme, ecc.) e "fermentescibili", offrendo così un approccio più corretto nella espressione della stabilità per le matrici prima indicate.

2.4.2. Campionamento

Il campione rappresentativo da sottoporsi alla determinazione dell'Indice di Respirazione viene ottenuto seguendo la metodica UNI relativa al campionamento degli RDF (UNI, 1992).

L'obiettivo è l'ottenimento di un campione rappresentativo da sottoporre al test respirometrico di circa 5 - 50 litri di materiale tal quale.

2.4.3. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico Reale (IRDR)

Su un campione ottenuto come prima indicato si procede alla determinazione dell'Indice di Respirazione reale.

2.4.4. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico Potenziale (IRDP)

- ✍ Preparazione del campione.

Il campione ottenuto con le modalità sopra esposte viene essiccato fino a peso costante in stufa ventilata a 25 - 30°C. Si procede quindi alla macinazione del materiale essiccato sino al raggiungimento di una pezzatura omogenea (tutto il campione deve passare attraverso un vaglio a maglie di 5 cm). Su un'aliquota di campione (4-5 litri) si procede alla determinazione della capacità di ritenzione idrica massima, il resto viene conservato a 4°C.

- ✍ Standardizzazione degli altri parametri di processo.

Qualora si volesse determinare l'IRDP, inteso come la misura dell'attività microbiologica in condizioni standardizzate, si procede alla correzione dei seguenti parametri nei limiti di seguito riportati:

- umidità = 75 % capacità idrica massima;
- pH = 6,5 – 8,5;
- densità apparente < 0,65 t/m^3.

- Standardizzazione dell'umidità del campione.

Il campione di rifiuto opportunamente preparato ed esattamente pesato (circa 4-5 litri) viene posto in un contenitore (per esempio un sacchetto in tela) ed immerso in acqua. Dopo circa 12 ore, il campione viene estratto, lasciato sgocciolare per circa 6 ore e pesato. Si ottiene così un campione dalla capacità idrica massima (la variazione in peso ottenuta rappresenta la quantità di acqua assorbita dal peso noto di sostanza secca). Il campione da sottoporsi a prova respirometrica (5 - 50 litri) viene quindi addizionato di una quantità di acqua pari al 75 % della ritenzione idrica massima.

- Standardizzazione del pH del campione.

Il pH del materiale da sottoporsi ad analisi viene corretto durante il riumettamento della massa essiccata utilizzando soluzioni acquose acide (acido solforico) o basiche (bicarbonato di calcio) diluite.

- Standardizzazione della densità apparente.

Vengono utilizzati "bulking agent" (riempitivi) biologicamente inerti.

Nel presente studio si è determinato l'indice di respirazione potenziale, che verrà in seguito indicato come Indice di Respirazione Dinamico (IRD).

2.4.5. Determinazione dell'Indice di Respirazione Dinamico (IRD)

L'Indice di Respirazione (IR) viene determinato quantificando il consumo orario di ossigeno del materiale da testare mediante l'utilizzo di un respirometro a flusso continuo di aria come prima indicato.

Il campione preparato viene immesso nel respirometro e sottoposto ad aerazione continua adottando flussi d'aria tali da garantire valori di concentrazione di ossigeno in uscita dal respirometro superiori al 14 % (v/v). La prova viene condotta tenendo il campione in osservazione nel fermentatore per un periodo compreso tra uno e quattro giorni a seconda della durata della fase di lag, rilevando in automatico il valore dell'indice ad intervalli di due ore.

La misura della quantità di ossigeno consumato per l'attività biologica aerobica viene desunta dalla differenza di concentrazione di ossigeno tra l'aria in ingresso e in uscita dal respirometro e calcolata con la seguente espressione:

$$IRD_i\ (mg\ O_2\ kg\ SV^{-1}\ h^{-1}) = Q * h * ?O_2 * Vg^{-1} * 31{,}98 * 10 * SV^{-1} * h^{-1} \qquad (1)$$

ove:

- ? IRD = Indice di respirazione istantaneo;
- ? Q = portata aria ($L * h^{-1}$);
- ? $?O_2$ = differenza di concentrazione dell'ossigeno in ingresso e in uscita dal respirometro (% v/v);
- ? Vg = volume occupato da una mole di gas. Assumendo il valore standard per T1 = 273,15 °K e P1 = 1 atm pari a Vg1 = 22,4 L/mole, il valore corretto di Vg (Vg2) alla temperatura T2 viene calcolato con la seguente espressione: Vg2 = (Vg1 * T2/T1) dove T rappresenta la temperatura in gradi Kelvin;
- ? 31,98 = peso molecolare dell'ossigeno (g/mole);
- ? 10 = coefficiente moltiplicativo;
- ? SV = solidi volatili (kg). Il dato dell'attività biologica aerobica può essere espresso anche sui solidi totali (ST) o sui solidi potenzialmente fermentescibili (SPF);
- ? h = numero di ore durante le quali viene effettuata la misura.

L'IRD viene calcolato come media dei 12 valori degli indici relativi alle 24 ore durante le quali la respirazione della biomassa è più elevata.

$$IRD_{24} = \frac{\sum_{1}^{12} IRD_i}{12}$$

IRD_i = IRD rilevato ogni due ore.

Il dato finale potrà essere espresso sull'unità di peso adottando:

- kg ST (solidi totali);
- kg SV (solidi volatili);
- kg SPf (solidi potenzialmente fermentescibili).

2.5.TEST DI FITOTOSSICITÀ: PROVA DI VEGETAZIONE IN VASO CON LATTUGA

Scopo del test

Il test di vegetazione ha lo scopo di saggiare gli effetti di matrici complesse (fertilizzanti non convenzionali, ammendanti, fanghi, compost, reflui), solide o liquide, sulla crescita delle piante superiori.

Principio

La crescita delle piante è correlata positivamente- alla presenza di elementi nutritivi nel substrato di crescita e negativamente alla presenza di elementi in eccesso e/o di sostanze tossiche.
Il test viene realizzato allevando una specie vegetale indicatrice su un substrato cui è stata aggiunta, in concentrazione diverse, la matrice da saggiare. La crescita delle piante (biomassa fresca e secca prodotta) viene confrontata con quella ottenuta da medesime piante allevate sul solo substrato (controllo).

Metodo

Il disegno sperimentale prevede la miscelazione, a concentrazioni crescenti (5-10 dosaggi), della sostanza test con un substrato artificiale; sulle miscele ottenute vengono allevate delle plantule di lattuga *(Lactuca sativa* L. cv Ilona) per un periodo prestabilito (14-21 gg); per ciascun dosaggio vengono allestite almeno 4 repliche (4 vasi) e in ciascun vaso vengono allevate rispettivamente 3 piantine di lattuga; la prova viene condotta in serra (16 ore di luce, 8 di buio; 25 ^{0}C giorno, 16 ^{0}C notte) utilizzando vasi della capacità di 0,3 1. Il substrato artificiale utilizzato per la conduzione di test di fitotossicità è composto da sabbia, argilla, torba e terreno agrario; presenta reazione acida (pH 6.0), ridotta capacità di scambio cationico (8 meq/100 g) e scarso potere nutritivo di base.

I dati relativi al peso fresco e secco di ciascun vaso vengono elaborati per determinare, per ciascuna dose, il peso medio e la deviazione standard. Successivamente si esegue I'ANOVA e sulle medie un test di confronto statistico. I risultati così elaborati sono riportati in forma tabulare (Tabella 1) dove, a fianco del valore medio di ciascuna dose, sono riportate le lettere indicanti le differenze significative: le differenze statisticamente significative sono indicative dell'effetto del prodotto testato. I medesimi dati vengono, inoltre, rappresentati graficamente in un diagramma di andamento dose-effetto dove in ascissa si riportano le dosi (espresse in t/ha) e in ordinata le produzioni (espresse come indice di crescita).

I risultati della prova di vegetazione vengono espressi mediante un giudizio di compatibilità con la crescita vegetale ovvero di idoneità all'utilizzo agricolo. Il giudizio d'idoneità si fonda principalmente sull'interpretazione dei risultati del confronto statistico relativo al peso secco medio. Ciò nondimeno, la visualizzazione dell'andamento delle curve dose-risposta, dei dati medi relativi al peso fresco e del confronto statistico relativo possono facilitare l'interpretazione dei risultati e il giudizio di idoneità.

Dosaggi impiegati

In Tabella 2.5.1. vengono riportati, in corrispondenza di ciascuna tesi, i dosaggi di campo corrispondenti ai dosaggi impiegati nel test di vegetazione (espressi in t/ha di s.s.).

Tabella 2.5.1.: Dosaggi impiegati con il Compost

Tesi	t/ha di s.s.
0	0
A	4.4
B	6.7
C	10
D	15
E	20

2.6. PARAMETRI CHIMICO-FISICI

Ogni frazione è stata essiccata in stufa ventilata a 105°C, sino a peso costante e successivamente preparata per le determinazioni analitiche. Queste hanno previsto determinazioni classiche secondo le comuni metodiche analitiche (Metodi ufficiali di analisi, G. U. n. 121, del 25/5/1992): Caratterizzazione dei compost finali secondo i parametri indicati nell'allegato 1.C della Legge n° 748/84.

- pH;
- metalli pesanti;
- OMEI;
- Azoto organico;
- Carbonio Organico;
- Acidi Umici e Fulvici.

I risultati trovano espressione quali valori medi percentuali e assoluti delle due repliche.

2.6.1. Determinazione delle ceneri e dei solidi volatili

La determinazione è stata effettuata previo incenerimento del campione a 650 °C (DI.VA.PRA.,1992) e successiva pesatura dello stesso a raffreddamento avvenuto.

Le determinazioni sono state eseguite in doppio per tutti i campioni oggetto di studio.

Determinazioni analitiche eseguite secondo le metodiche ufficiali di analisi

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE: FASE ATTIVA (BIOSSIDAZIONE)

I migliori andamenti dal punto di vista processistico si sono riscontrati per le tesi 1A, 1B e 1C; dalle figure 3.1.1., 3.1.2., 3.1.3 si osserva infatti che le temperature più alte e costantemente mantenute per tutta la durata della fase attiva (ossidazione accelerata), sono state rilevate per queste tre tesi. Le tesi 2B1, 2B2 e 2B3 (Figure 3.1.4., 3.1.5., 3.1.6.) hanno presentato un andamento non ottimale dovuto, forse, alla elevata percentuale di carta che potrebbe aver creato problemi di impaccamento della miscela e quindi una mediocre distribuzione dell'aria (e quindi dell'ossigeno) all'interno della biomassa; questo ha provocato la formazione di condizioni di parziale anaerobiosi all'interno della biomassa limitando le reazioni di bio-ossidazione.

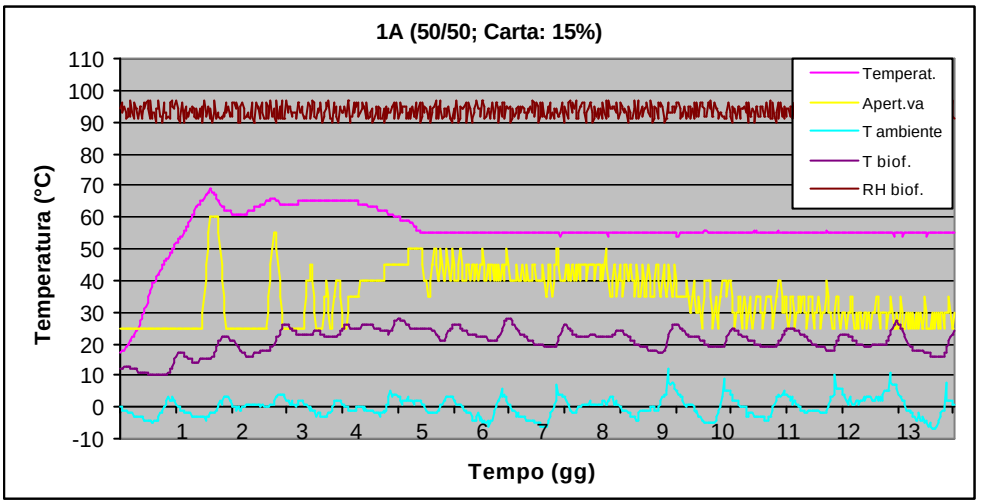


Figura 3.1.1.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container:1A.

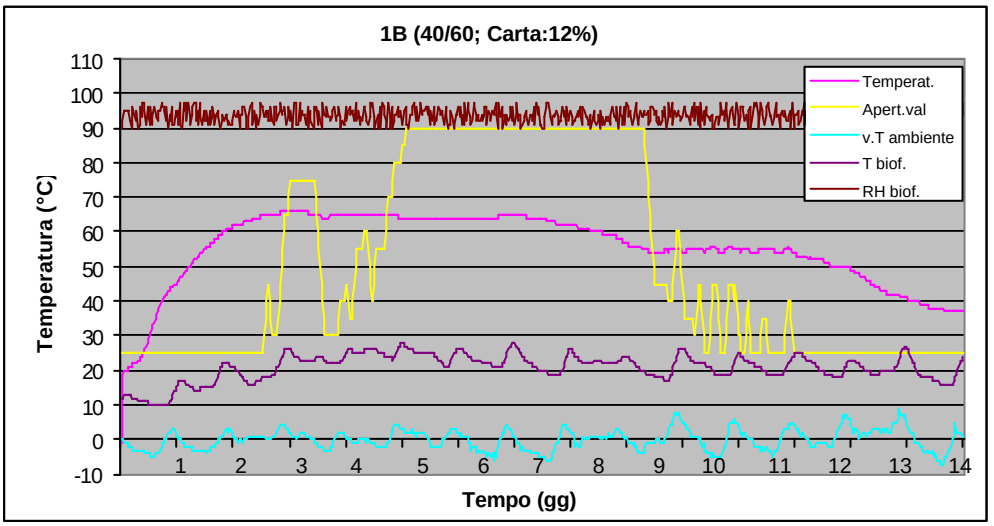


Figura 3.1.2.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container:1B.

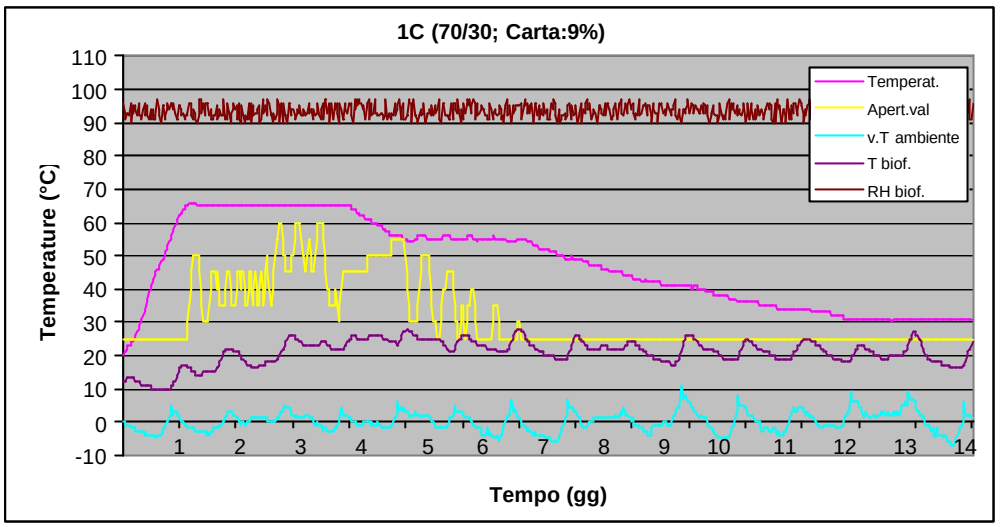


Figura 3.1.3.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container: 1C

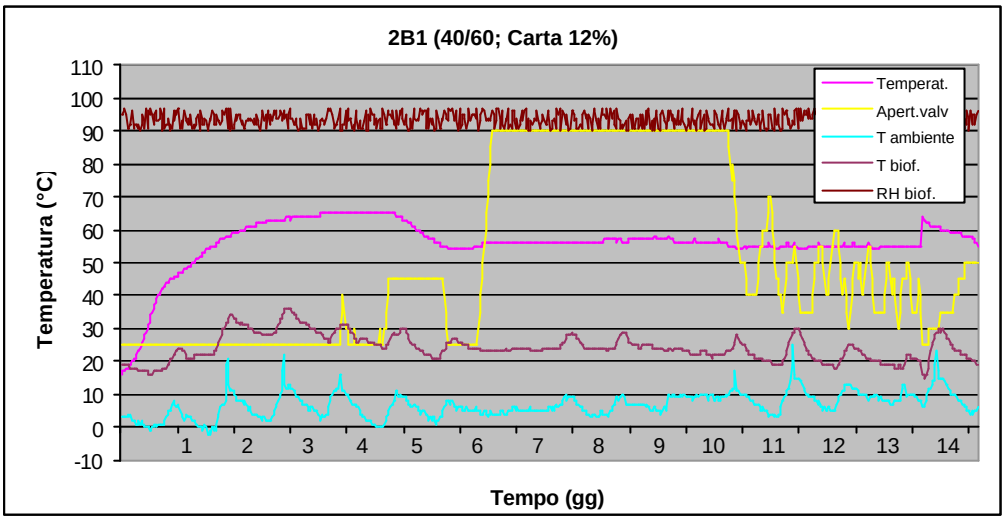


Figura 3.1.4.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container: 2B1.

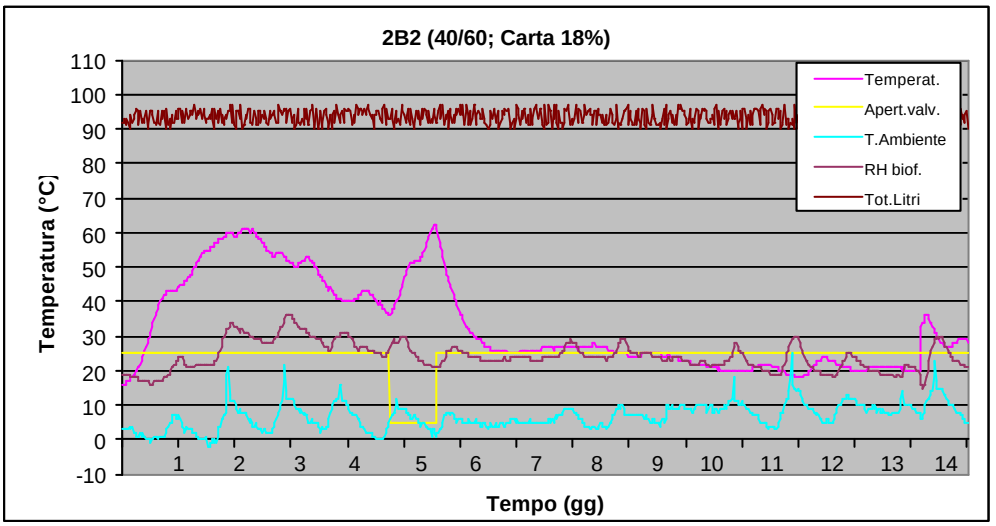


Figura 3.1.5.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container: 2B2

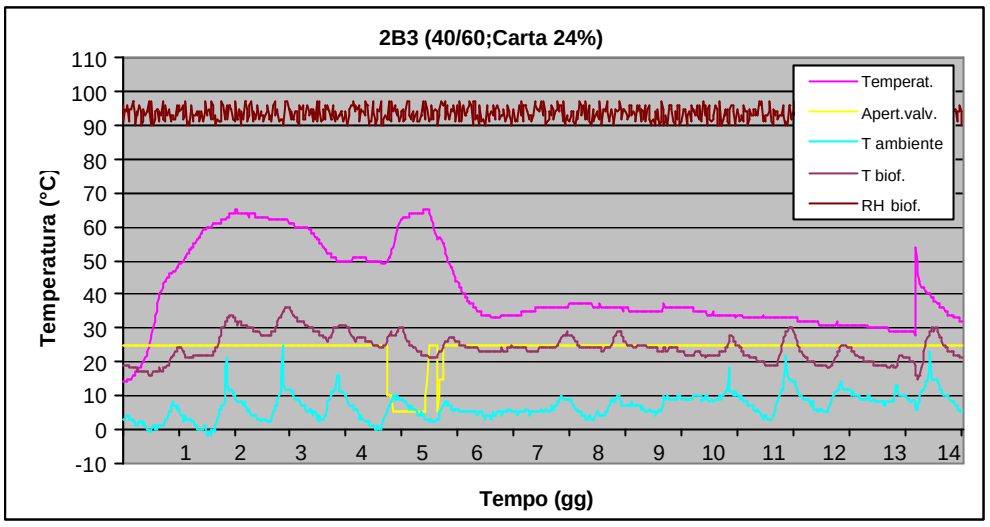


Figura 3.1.6.: Andamento del processo durante la fase attiva in bio-container: 2B3

3.2. ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE: CURING - PHASE

Le temperature rilevate durante i 60 giorni di maturazione, come esemplificato dalle tabelle 3.2.1. e 3.2.2., sono state abbastanza elevate, indice di elevata attività microbica.

Tabella 3.2.1.: Temperature I° ciclo.

TEMPO (gg)	TEMPERATURE (°C)		
	TESI 1A	TESI 1B	TESI 1C
10	71	76	73
17	70	74	73
24	71	74	73
31 + ***Rivoltamento***	71	72	71
38	74	76	74
45 + ***Rivoltamento***	73	76	75
52	69	71	71

Il II° ciclo (Tabella 3.2.2.) ha visto la presenza di problemi legati alla mancanza di valori di umidità ottimale delle miscele che ha causato un cattivo svolgimento delle biossidazioni come testimoniato dalle basse temperature raggiunte all'interno del cumulo. I livelli di stabilità biologica raggiunti sono leggermente più bassi rispetto al primo ciclo, anche se comunque ritenuti accettabili.

Tabella 3.2.2.: Temperature II° ciclo

TEMPO (gg)	TEMPERETURE (°C)		
	TESI 2B1	**TESI 2B2**	**TESI 2B3**
10	72	73	66
17	67	69	68
24	67	65	65
31 ***+ Rivoltamento***	63	52	59
38	56	60	57
45	48	52	45
52	38	33	32

3.3. STABILITÀ BIOLOGICA, pH, sostanza secca (S.S.) e solidi volatili (SV)

La valutazione della bontà del processo è stata effettuata mediante la stima della stabilità biologica utilizzando il metodo Di.Pro.Ve (paragrafo 1.4.).

I risultati sono riportati nelle tabelle 3.3.1., 3.3.2. e 3.3.3., in cui sono elencati inoltre i valori dei parametri pH, sostanza secca e solidi volatili.

pH

Per tutti i cicli sperimentali in esame si può osservare come il pH aumenti durante il corso del processo sinonimo ciò, di fermentazione ottimale.

S.S.

La sostanza secca ha avuto un evidente incremento durante il corso del processo per effetto dell'innalzamento della temperatura della biomassa e conseguente bioessiccamento.

SV

I Solidi Volatili hanno subito una netta diminuzione durante lo svolgimento dei processi, indice di elevata degradazione.

Tabella 3.3.1.: Risultati analitici e respirometrici I° ciclo Lodi

Tesi	*Tempo (gg)*	*RAPPORTO STRUTT./UMIDO*	*pH*	*UMIDITA (% tot.)*	*SOSTANZA SECCA (% tot.)*	*SV (% s.s.)*	*CENERI (% s.s.)*	*IRD ($mg\ O_2\ kg\ SV^{-1}\ h^{-1}$)*
1A	**0**	***50/50 Carta 15%***	7.88	55.75 ± 2.158	44.25 ± 2.158	76.47 ± 0.459	23.53 ± 0.459	1862
	15		8.25	58.79 ± 1.891	41.21 ± 1.891	74.98 ± 0.041	25.02 ± 0.041	1251
	45		8.09	64.10 ± 1.357	35.90 ± 1.357	68.83 ± 0.483	31.17 ± 0.483	736
	75		8.24	56.73 ± 1.811	43.27 ± 1.811	66.71 ± 0.285	33.26 ± 0.285	291
	COMPOST		8.73	48.05 ± 0.044	51.95 ± 0.044	51.05 ± 1.247	48.95 ± 1.247	613
1B	**0**	***40/60 Carta 12%***	5.27	57.30 ± 0.557	42.70 ± 0.557	77.93 ± 0.027	22.07 ± 0.027	3579
	15		8.11	68.06 ± 1.155	31.94 ± 1.155	73.67 ± 0.471	26.33 ± 0.471	930
	45		7.74	62.35 ± 0.342	37.65 ± 0.342	72.97 ± 0.236	27.03 ± 0.236	1007
	75		8.07	45.51 ± 2.557	54.49 ± 2.557	66.72 ± 1.200	33.28 ± 1.200	327
	COMPOST		8.63	49.52 ± 0.673	50.48 ± 0.673	55.79 ± 3.077	44.21 ± 3.077	539
1C	**0**	***30/70 Carta 9%***	4.96	61.40 ± 0.196	38.60 ± 0.196	77.83 ± 0.481	22.17 ± 0.481	3997
	15		7.41	70.18 ± 0.524	29.82 ± 0.524	70.00 ± 0.820	30.00 ± 0.820	2072
	45		7.55	55.37 ± 5.144	44.63 ± 5.144	70.56 ± 0.450	29.44 ± 0.450	1264
	75		8.23	58.21 ± 0.713	41.79 ± 0.713	62.42 ± 1.015	37.58 ± 1.015	482
	COMPOST		8.74	45.66 ± 0.448	54.34 ± 0.448	54.13 ± 0.777	45.87 ± 0.777	632

Tabella 3.3.2.: Risultati analitici e respirometrici II° ciclo Lodi

Tesi	*Tempo (gg)*	*RAPPORTO STRUTT./UMIDO*	*pH*	*UMIDITA (% tot.)*	*SOSTANZA SECCA (% tot.)*	*SV (% s.s.)*	*CENERI (% s.s.)*	*IRD (mg O_2 kg SV^{-1} h^{-1})*
2B1	**0**	***40/60 Carta 12%***	4.81	57.63 ± 1.461	42.37 ± 1.461	77.67 ± 0.027	22.33 ± 0.027	4035
	15		7.77	68.11 ± 0.935	31.89 ± 0.935	77.26 ± 1.463	22.74 ± 1.463	2563
	45		8.37	35.13 ± 1.092	64.87 ± 1.092	75.46 ± 0.863	24.54 ± 0.863	956
	75		7.94	35.85 ± 1.175	64.15 ± 1.175	78.80 ± 0.546	21.20 ± 0.546	1040
	COMPOST		8.42	19.33 ± 0.658	80.67 ± 0.658	62.60 ± 0.252	37.40 ± 0.252	442
2B2	**0**	***40/60 Carta 18%***	7.79	57.27 ± 1.320	42.7 ± 1.320	83.25 ± 0.192	16.75 ± 0.192	4194
	15		7.54	67.71 ± 1.206	32.29 ± 1.206	76.86 ± 0.996	23.14 ± 0.996	1092
	45		7.87	33.06 ± 1.959	66.94 ± 1.959	77.34 ± 0.138	22.66 ± 0.138	1053
	75		8.16	20.82 ± 1.696	79.18 ± 1.696	74.14 ± 0.645	25.86 ± 0.645	860
	COMPOST		8.74	25.87 ± 0.956	74.13 ± 0.956	65.98 ± 0.323	34.02 ± 0.323	681
2B3	**0**	***40/60 Carta 24%***	7.58	58.34 ± 3.570	41.66 ± 3.570	81.65 ± 0.429	18.35 ± 0.429	4416
	15		7.43	68.74 ± 2.233	31.26 ± 2.233	77.22 ± 0.517	22.78 ± 0.517	1070
	45		7.91	25.97 ± 0.063	74.03 ± 0.063	76.67 ± 0.536	23.33 ± 0.536	1362
	75		8.38	17.90 ± 0.633	82.10 ± 0.633	75.11 ± 0.654	24.89 ± 0.654	707
	COMPOST		8.06	33.99 ± 0.129	66.01 ± 0.129	67.35 ± 0.346	32.65 ± 0.346	465

Tabella 3.3.3.: Risultati analitici e respirometrici prove Carpi

Tesi	*Tempo (gg)*	*RAPPORTO STRUTT./UMIDO*	*pH*	*UMIDITA (% tot.)*	*SOSTANZA SECCA (% tot.)*	*SV (% s.s.)*	*CENERI (% s.s.)*	*IRD (mg O_2 kg SV^{-1} h^{-1})*
3B1	**0**	***40/60 Carta 12%***	5.69	55.72 ?0.027	44.28 ? 0.027	67.03 ? 0.397	32.97 ? 0.397	4583
	15		7.31	57.51 ? 0.650	42.48 ? 0.650	69.21 ? 1.100	31.89 ? 1.100	4116
	30		7.94	62.78 ? 1.012	37.22 ? 1.012	60.64 ? 2.138	39.36 ? 2.138	466
	60		8.12	43.45 ? 0.777	56.55 ? 0.777	53.79 ? 0.461	46.21 ? 0.461	216
	COMPOST		8.51	51.38 ? 0.461	48.62 ? 0.461	50.34 ? 0.611	49.66 ? 0.611	80
3B2	**0**	***40/60 Carta 18%***	5.57	56.02 ? 3.518	43.98 ? 3.518	72.06 ? 0.621	28.88 ? 0.621	4870
	15		8.49	53.85 ? 1.210	46.15 ? 1.210	61.66 ? 0.285	38.34 ? 0.285	408
	30		8.15	62.91? 0.860	37.09 ? 0.860	67.55 ? 0.351	32.45 ? 0.351	1269
	60		8.09	43.28 ? 0.995	56.72 ? 0.995	58.97 ? 0.274	41.03 ? 0.274	227
	COMPOST		8.41	53.50 ? 1.125	46.50 ? 1.125	48.46 ? 0.503	51.54 ? 0.503	110
3B3	**0**	***40/60 Carta 24%***	7.26	48.70 ? 0.878	51.30 ? 0.878	71.12 ? 0.180	28.88 ? 0.180	2282
	15		6.26	52.16 ? 0.996	47.84 ? 0.996	67.47 ? 1.310	32.53 ? 1.310	3660
	30		7.53	58.31 ? 1.231	41.69 ? 1.231	60.17 ? 0.760	39.83 ? 0.760	246
	60		8.11	46.68 ? 0.789	54.31 ? 0.789	53.73 ? 0.562	46.27 ? 0.562	60
	COMPOST		8.55	53.02 ? 1.210	46.98 ? 1.210	48.23 ? 0.189	51.77 ? 0.189	123

STABILITÀ BIOLOGICA

Prove I° ciclo

Osservando i valori di IRD delle miscele iniziali (T= 0 gg) si nota come queste siano funzione della percentuale di organico presente nelle diverse miscele (Figura 3.3.1. e Tabella 3.3.1.).

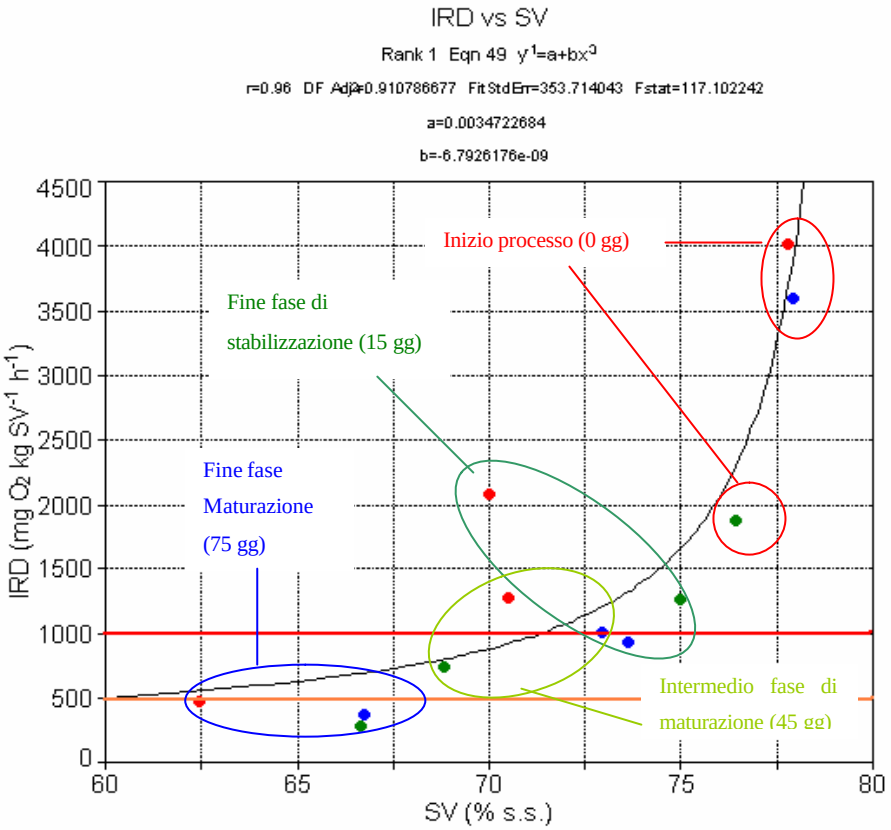


Figura 3.3.1.: Andamento processi I° ciclo

Legenda	
●	Tesi 1A - 15% carta (50/50)
●	Tesi 1B - 12% carta (40/60)
●	Tesi 1C - 9% carta (30/70)

È da osservare che la diminuzione sostanziale dell'Indice di Respirazione Dinamico si attua durante la prima fase del processo, dove già dopo 15 giorni si ottengono valori di circa 1000 mg O_2 kg SV^{-1} h^{-1} indicato dalla Regione Lombardia, quale limite di stabilità biologica (Regione Lombardia, 1999). La successiva fase di maturazione permette il raggiungimento di valori di IRD prossimi a 500 mg O_2 kg SV^{-1} h^{-1}.

Prove II° ciclo

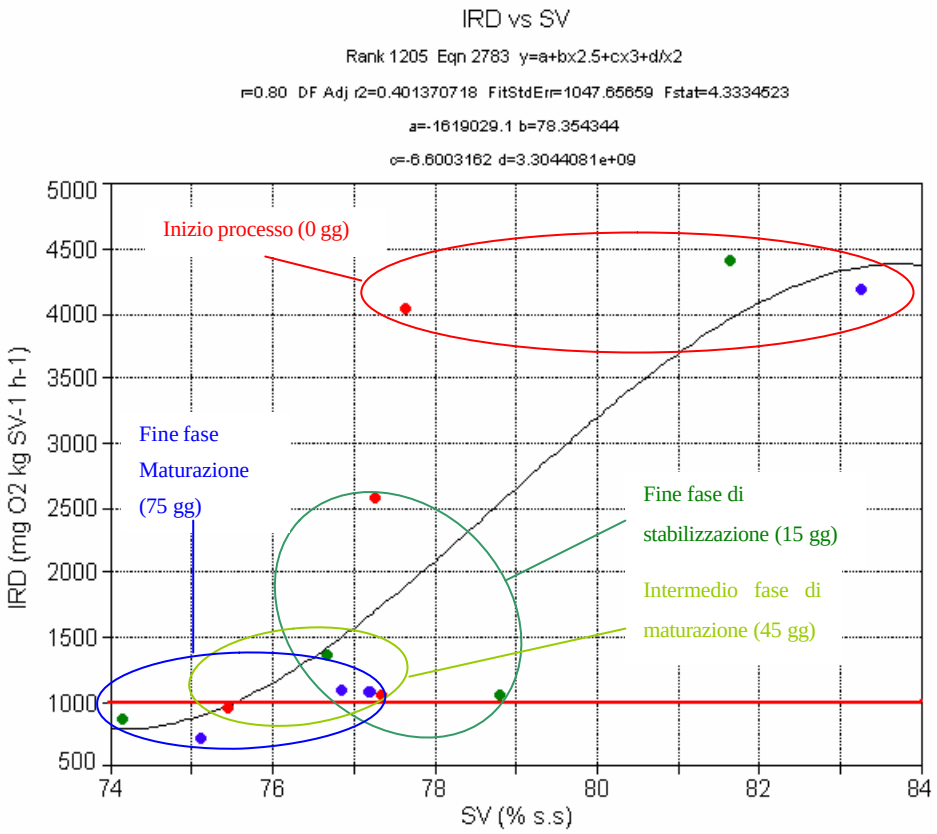


Figura 3.3.2.: Andamento processi II° ciclo.

Legenda	
●	Tesi 2B1 - 12% carta (40/60)
●	Tesi 2B2 - 18% carta (40/60)
●	Tesi 2B3 - 24% carta (40/60)

Osservando i valori di IRD delle miscele iniziali (T= 0 gg) del secondo ciclo di prove (Figura 4.2.1. e Tabella 3.3.2.) si nota come questi siano molto simili in accordo con la percentuale di organico che era mantenuta costante (60%). Al contrario il contenuto in solidi volatili varia con la percentuale di carta presente nelle diverse miscele.

Così come osservato per il primo ciclo di prove si osserva che gli IRD raggiungono dopo 15 giorni di processo valori intorno a 1000 mg O_2 kg SV^{-1} h^{-1}. La successiva fase di curing non ha permesso diminuzioni ulteriori del valore di IRD. Ciò è da imputarsi all'eccessivo abbassamento dell'umidità del materiale che ha causato il blocco dei processi degradativi (Tabella 3.3.2.).

Quanto detto trova conferma del bassa diminuzione del contenuto in SV delle miscele alla fine del processo ritenuto esiguo se confrontato col primo ciclo (Tabella 3.3.1.).

Prove III° ciclo

Dai valori di IRD ottenuti (Figura 3.3.3. e Tabella 3.3.3.) si evince che la degradazione delle sostanze fermentescibili è avvenuta soprattutto nei primi trenta giorni di processo.

I valori di IRD finali si sono collocati ben al di sotto del valore soglia di stabilità biologica (1000 mg O2 kg SV-1 h-1) ottenendo compost biologicamente stabili dopo solo un mese di processo.

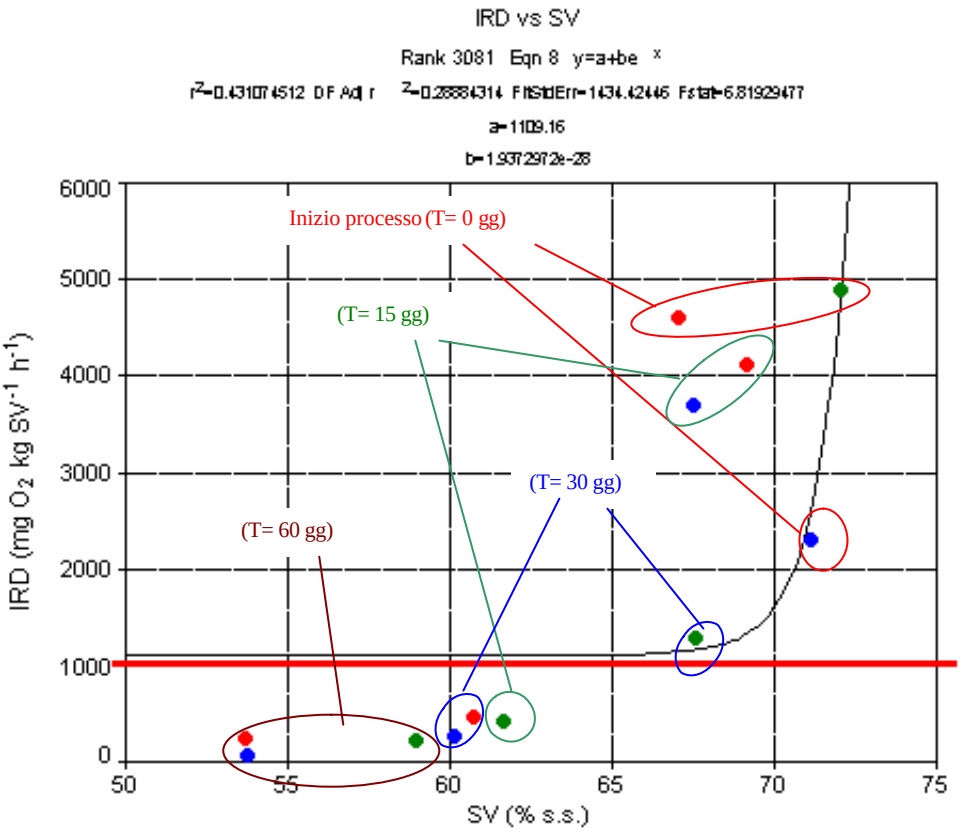


Figura 3.3.3.: Andamento processi II° ciclo

Legenda	
●	Tesi 3B1 - 12% carta (40/60)
●	Tesi 3B2 - 18% carta (40/60)
●	Tesi 3B3 - 24% carta (40/60)

3.4. FITOTOSSICITÀ

Di seguito vengono riportati i risultati riferiti ai test di fitotossicità eseguiti sulle matrici di fine processo scelte in base ai risultati di stablità biologica ma soprattutto, in considerazione della composizione iniziale delle miscele, in modo tale da avere un panorama complessivo di tutte le prove sperimentali effettuate.

Compost 1A

Dalla tabella 3.4.1. e dalle figure 3.4.1. e 3.4.2. si evince che le produzioni medie, fresche e secche, ottenute su substrato trattato con il prodotto in esame sono significativamente superiori a quelle del testimone non trattato, ciò significa che il prodotto in esame non induce effetti avversi sulla crescita delle piante.

Tabella 3.4.1.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1529 a	147 a
A	4.4	2162 ab	191 ab
B	6.7	2732 b	233 b
C	10	2797 bc	214 b
D	15	3821 cd	242 bc
E	20	4413 d	279 c

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

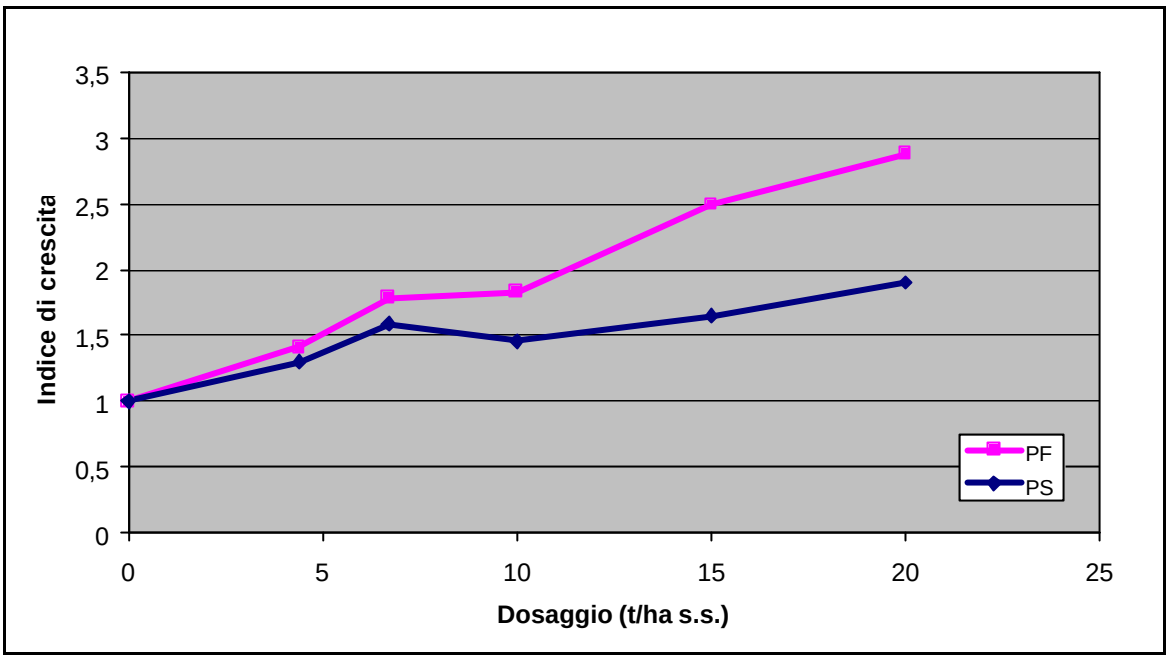


Figura 3.4.1.: Andamento Indici di crescita

Figura 3.4.2.: Prova di vegetazione

Compost 2B2

Dalla tabella 3.4.2. e dalle figure 3.4.3. e 3.4.4. si osserva che le produzioni medie, fresche e secche, ottenute su substrato trattato con il prodotto in esame sono uguali o significativamente inferiori a quelle del testimone non trattato e perciò il prodotto in esame induce effetti avversi sulla crescita delle piante e non si ritiene idoneo all'utilizzo agricolo.

Tabella 3.4.2.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1529 b	147 c
A	4.4	1243 ab	117 bc
B	6.7	1050 ab	101 ab
C	10	783 a	76 a
D	15	735 a	64 a
E	20	1443 b	103 ab

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

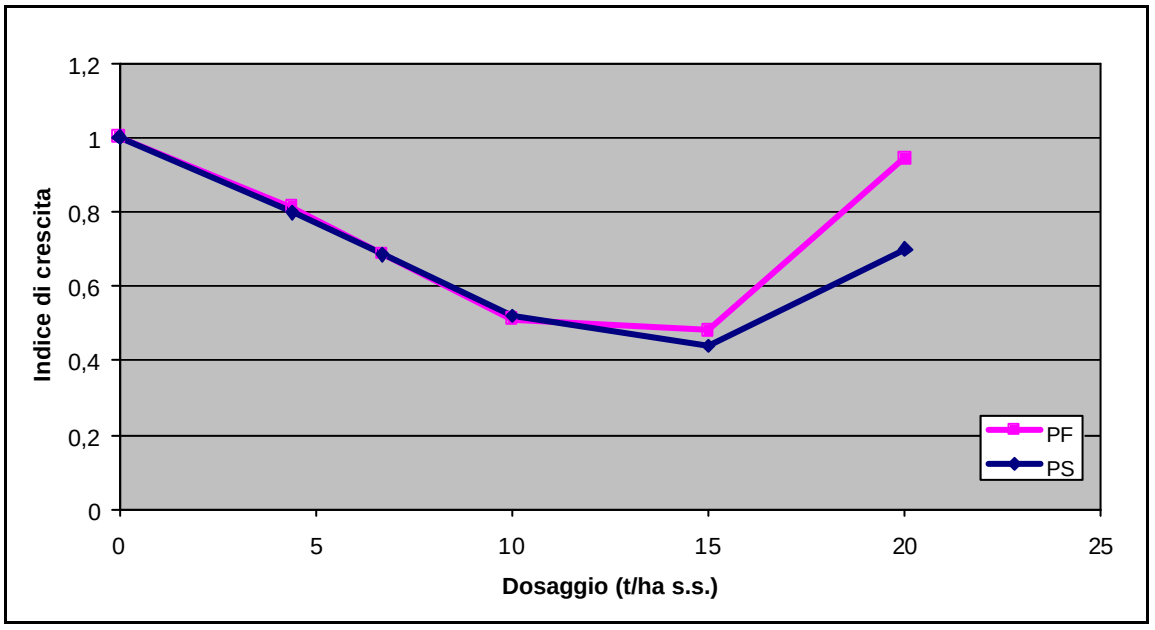


Figura 3.4.3.: Andamento Indici di crescita

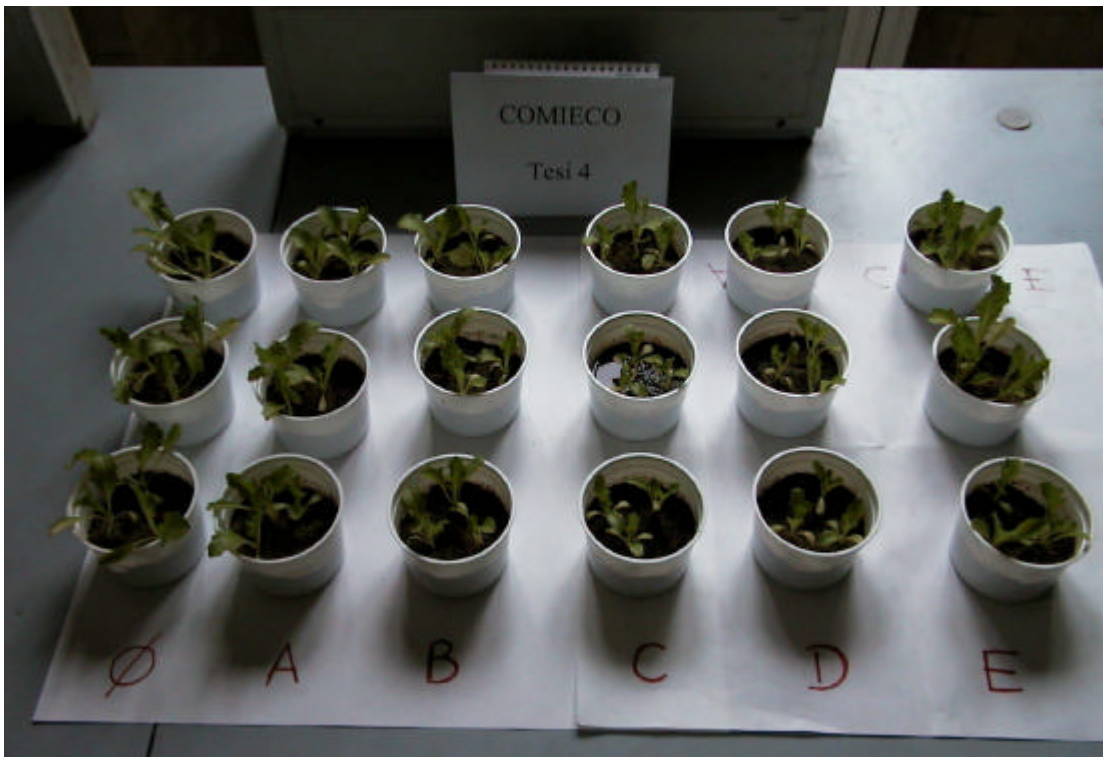


Figura 3.4.4.: Prova di vegetazione

Compost 2B3

Dalla tabella 3.4.3. e dalle figure 3.4.5 e 3.4.6. si deduce che le produzioni medie, fresche e ecche, ottenute su substrato trattato con il prodotto in esame sono uguali o significativamente superiori a quelle del testimone non trattato. Il compost in esame perciò è da ritenersi idoneo e non dannoso all'utilizzo agricolo.

Tabella 3.4.3.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1529 a	147 a
A	4.4	1680 a	155 a
B	6.7	1765 a	154 a
C	10	1731 a	131 a
D	15	2335 ab	141 a
E	20	3226 b	194 a

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

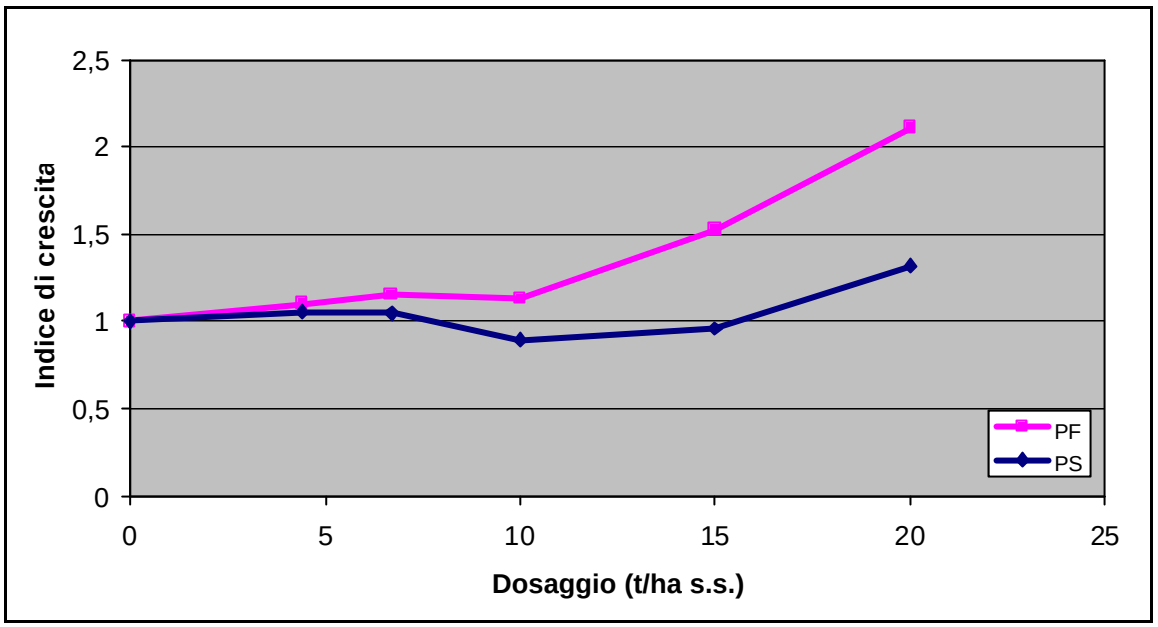


Figura 3.4.5.: Andamento Indici di crescita

Figura 3.4.6.: Prova di vegetazione

Campione 3B1

Dalla tabella 3.4.4. e dalle figure 3.4.7. e 3.4.8. si è dedotto che le produzioni medie, fresche e secche, ottenute su substrato trattato con il prodotto in esame sono nettamente al di sopra di quelle del testimone non trattato, testimoniando l'effettiva idoneità per l'utilizzo agronomico di tale compost.

Tabella: 3.4.4.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1979 a	183 a
A	4.4	2865 ab	257 b
B	6.7	3343 b	284 b
C	10	3601 b	306 b
D	15	5069 c	378 c
E	20	5430 c	410 c

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

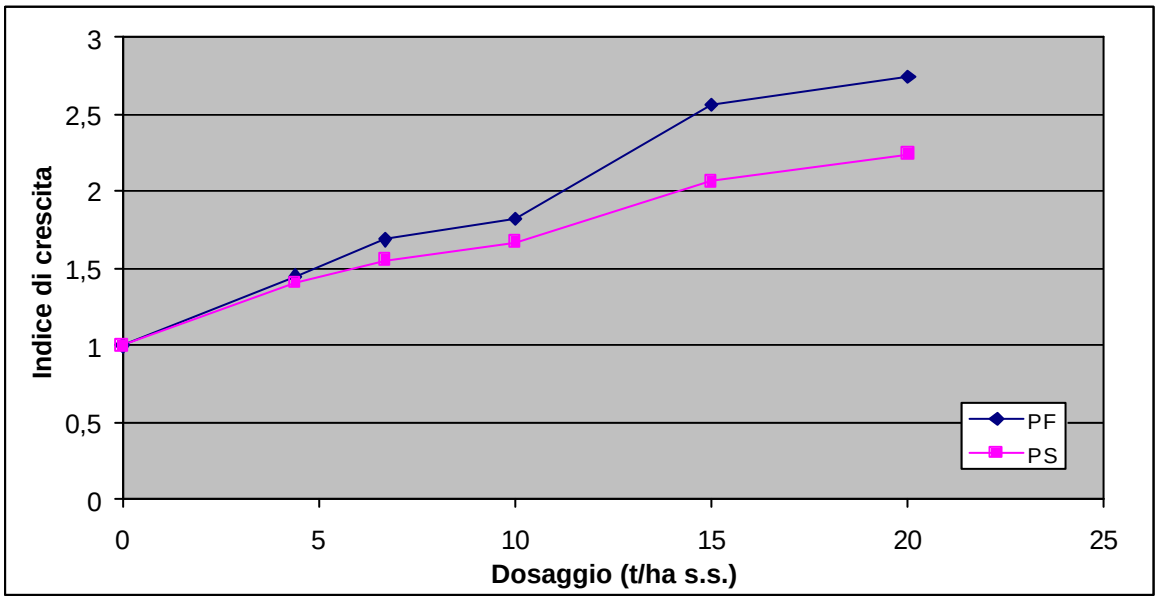


Figura 3.4.7.: Andamento Indici di crescita

Figura 3.4.8.: Prova di vegetazione

Campione 3B2

Dalla tabella 3.4.5. e dalle figure 3.4.9. e 3.4.10. si evince che le produzioni medie, fresche e secche, ottenute su substrato trattato con il prodotto in esame sono significativamente superiori a quelle del testimone non trattato, garantendo perciò un suo vantaggioso uso all'interno del comparto agricolo come ammendante organico.

Tabella 3.4.5.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1979 a	183 a
A	4.4	2758 b	273 b
B	6.7	3402 c	315 bc
C	10	3664 cd	318 bc
D	15	4084 de	341 c
E	20	4612 e	359 c

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

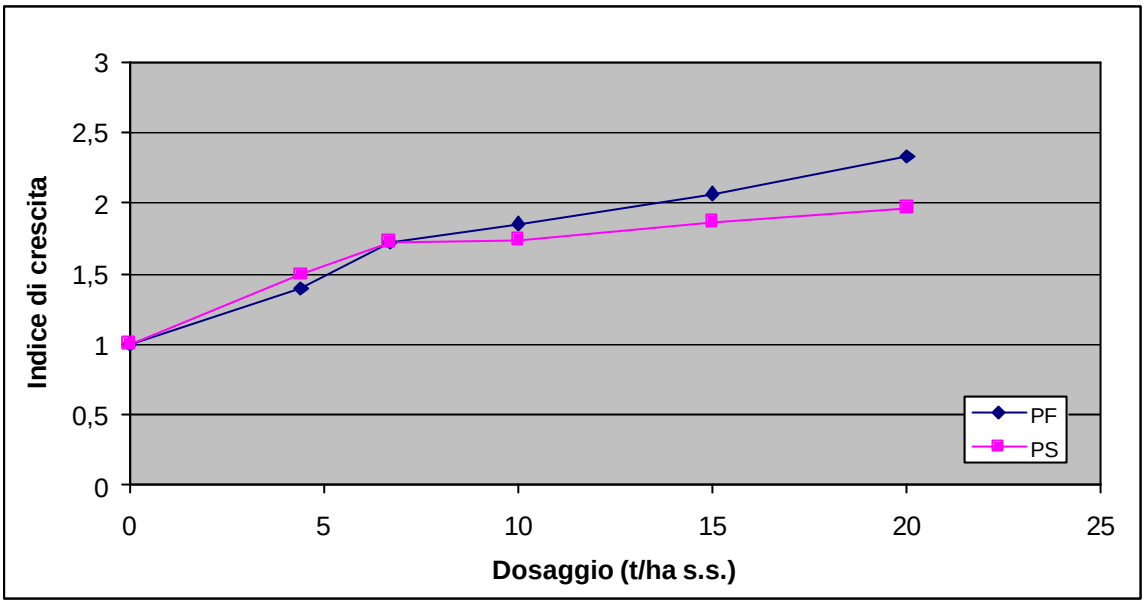


Figura 3.4.9.: Andamento Indici di crescita

Figure 3.4.10.: Prova di vegetazione

Campione 3B3

Dalla tabella 3.4.6. e dalle figure 3.4.11. e 3.4.12. si apprende che anche in quest'ultimo compost, le produzioni medie, fresche e secche, ottenute sono significativamente superiori a quelle del testimone non trattato

Il prodotto in esame non influisce negativamente sulla crescita delle piante, al contrario risulta essere vantaggioso ed idoneo all'utilizzo agricolo.

Tabella 3.4.6.: Produzioni medie fresche e secche (mg/vaso)

Tesi	Dosaggio t/ha s.s.	Peso fresco * (mg/vaso)	Peso secco * (mg/vaso)
0	0	1579 a	183 a
A	4.4	2742 ab	271 b
B	6.7	3620 bc	310 b
C	10	4140 c	348 b
D	15	4295 c	326 bc
E	20	5870 d	414 c

*medie seguite da lettere diverse differiscono tra loro in modo statisticamente significativo (Test di Duncan per ? =0.05).

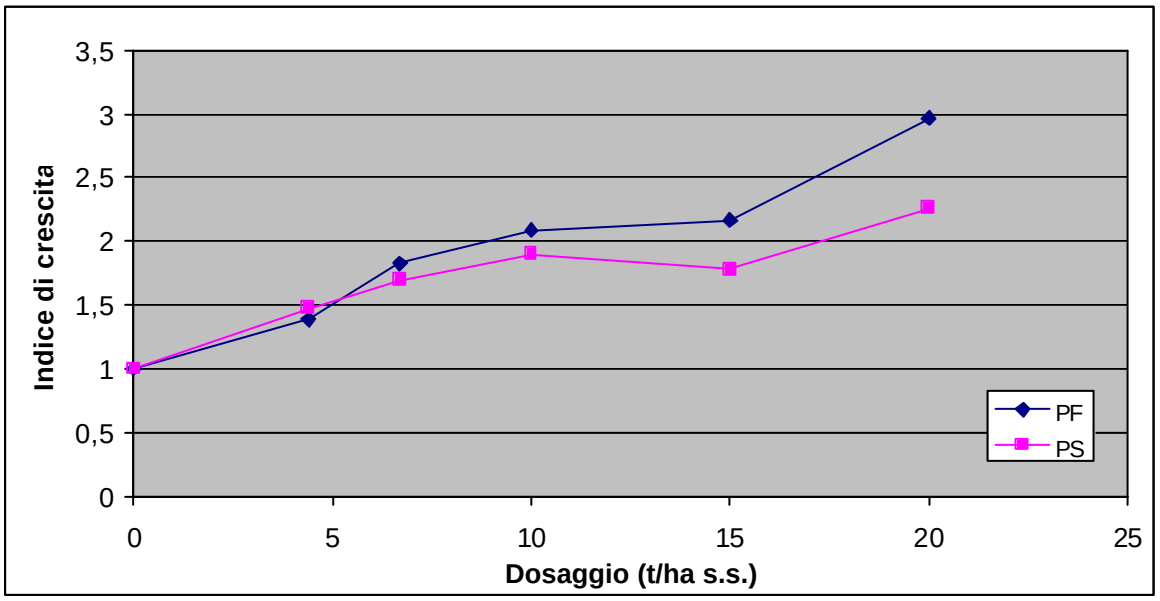


Figura 3.4.11.: Andamento Indici di crescita

Figura 3.4.12.: Prova di vegetazione

3.5. OMEI

La valutazione di tale parametro (Tabella 3.6.1.) non è prevista dalla Legge 748/84, ciononostante è utile per valutare il grado di evoluzione del compost.

L'OMEI varia tra 0 e 1, tendendo al valore superiore col progredire dell'evoluzione.

I valori ottenuti sono elevati, indice di compost molto evoluti.

3.6. Caratterizzazione del Compost: Legge 748/84

In tabella 3.6.1. si possono osservare i risultati analitici relativi ai parametri di qualità del compost come prescritto dalla Legge 748/84 sui fertilizzanti, eseguita sui compost scelti in funzione del livello di stabilità biologica raggiunta e comunque considerando tesi aventi contenuti di carta diversi.

I compost sottoposti a tali analisi sono stati scelti in funzione della stabilità biologica raggiunta considerandone ogni tipologia di composizione in termini di quantità di carta costituente la miscela di partenza.

- pH

Tale parametro è risultato essere leggermente al di sopra dei limiti di legge per i prodotti 1B, 2B2 e 2B3, mentre per tutti gli altri campioni rientra nei limiti prescritti.

- Umidità

Ad eccezione dei compost 3B1, 3B2 e 3B3 che presentano umidità leggermente superiori al limite di legge (50 %), tutti i compost analizzati presentano umidità ottimali.

- Carboni Organico

I compost 3B1, 3B2 e 3B3 hanno un contenuto di Corg inferiore anche se di poco a quello prescritto dalla legge 748/84.

- Azoto Organico

Tutti i compost considerati hanno presentato un contenuto in azoto organico che rientra nei limiti di legge.

- C/N

Tutti i compost considerati presentano un rapporto carbonio/azoto rientrante nei limiti di legge

AU + AF

Tutti i compost considerati hanno presentano contenuti in Acidi Umici e Fulvici che rientranti nei limiti di legge.

Inerti < 3.33 mm

Tutti i compost considerati hanno presentato un contenuto di Inerti < 3.33 mm rientrante nei limiti di legge.

Inerti 3.33 – 10 mm

Il contenuto di inerti del compost 1B, 2B2 e 3B2 risulta essere al di sopra dei limiti di legge.

Plastiche < 3.33 mm

Tutti i compost considerati hanno presentato un contenuto di plastiche < 3.33 mm inferiore ai limiti di legge.

Plastiche 3.33 – 10 mm

Tutti i compost considerati hanno presentato un contenuto in plastiche : 3.33 a 10 mm che inferiore ai limiti di legge.

Plastiche e inerti > 10 mm

I campioni 2B2, 3B1, 3B2 e 3B3 non rispettano il limite di legge prescritto.

Metalli pesanti

Tutti i compost hanno presentato un contenuto in metalli pesanti rientrante nei limiti di legge previsti.

Di tutti i campioni analizzati i compost 3B1, 3B2 e 3B3 hanno evidenziato un contenuto di Pb e Cu superiore ai limiti della Legge 748 e in particolare le tesi 3B1 e 3B2 presentano un contenuto elevato anche di Cd.

Serve evidenziare che dai risultati delle analisi sui metalli pesanti riportate in tabella si apprende come il livello di alcuni di questi sia piuttosto elevato nei compost del III° ciclo mentre quelli del I° e II° ciclo non presentano tali problematiche. Da questo presupposto si può escludere che sia la carta la causa di tali quantità di questi elementi nel compost.

Detto ciò è verosimile sostenere che molto probabilmente è stato il verde la causa dell'apporto abnorme di tali elementi al compost, cosa che si verifica di frequente quando viene utilizzato del "verde" proveniente da zone ad alta intensità di traffico o molto industrializzate, dove i tassi di deposizione atmosferica sono molto elevati.

Tabella 3.6.1.: Caratterizzazione Compost Secondo la Legge 748/84

Parametro	u.m.	limite	1B	2B2	2B3	3B1	3B2	3B3
pH		6 – 8.5	8.63	8.74	8.06	8.51	8.41	8.55
Umidità	*% t.q.*	< 50	49.52	25.87	33.99	51.38	53.50	53.02
Carbonio org.	*% s.s.*	> 25	26.64	28.83	27.13	24.14	24.28	23.48
Azoto org.	*% N tot.*	> 80	88	85	91	85	87	87
C/N		< 25	12.28	12.48	12.28	13.34	13.41	12.97
AU + AF	*% s.s.*	> 7	12.24	12.78	13.16	9.21	10.95	11.74
Inerti < 3,33 mm			1.53	1.17	1.17	4.47	4.05	2.62
Di cui vetri	*% s.s.*	< 0.9	0.41	0.29	0.39	0.31	0.40	0.08
Di cui sassi			1.12	0.88	0.78	4.16	3.65	2.54
Inerti 3,33 – 10 mm			2.08	3.43	2.57	2.46	5.23	3.69
Di cui vetri	*% s.s.*	< 0.1	0.13	0.32	0.06	0.07	0.71	0
Di cui sassi			1.95	3.11	2.51	2.39	4.52	3.69
Plastiche < 3,33 mm	*% s.s.*	< 0.45	0	0.02	0	0.06	0.09	0.10
Plastiche 3,33 – 10 mm	*% s.s.*	< 0.05	0.15	0.28	0.08	0.07	0.24	0.13
Plastica e inerti > 10 mm		Assenti	Assenti	0.07	Assenti	0.05	0.14	0.04
Cd	*mg kg s.s.* $^{-1}$	1,5	0.42	0.58	0.34	2.11	1.36	1.79
Hg	*mg kg s.s.* $^{-1}$	1,5	0.11	0.20	0.52	0.20	0.14	0.17
Ni	*mg kg s.s.* $^{-1}$	50	17.8	13.2	14.5	25.3	24.0	25.3
Pb	*mg kg s.s.* $^{-1}$	140	28.6	18.1	20.3	380	222	289
Cu	*mg kg s.s.* $^{-1}$	150	75.3	57.0	49.7	342	262	279
Zn	*mg kg s.s.* $^{-1}$	500	82.9	53.0	51.5	198	168	203
Cr ^{VI}	*mg kg s.s.* $^{-1}$	0,5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
OMEI	----	n.p.	0.79	0.81	0.78	0.97	0.79	0.75

3.7. BILANCI DI MASSA

Dai grafici 3.7.1.1. a 3.7.3.9. di seguito riportati, si osserva come durante il processo di compostaggio si è avuta una sostanziale diminuzione, in termini assoluti, del peso totale, della biomassa in tutte le prove sperimentali approntate.

Le prove 1B, 2B1 e 2B3 mostrano bilanci di massa anomali. La causa di ciò è da ascriversi alla variabilità nel campionamento

3.7.1. Bilanci di massa I° ciclo

TESI 1A

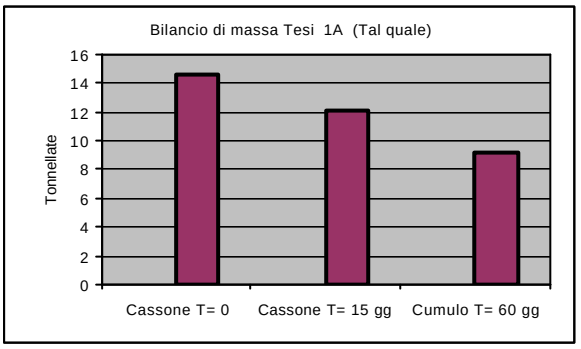


Grafico 3.7.1.1.

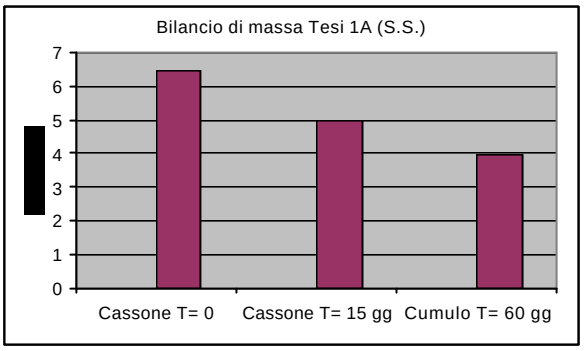


Grafico 3.7.1.2.

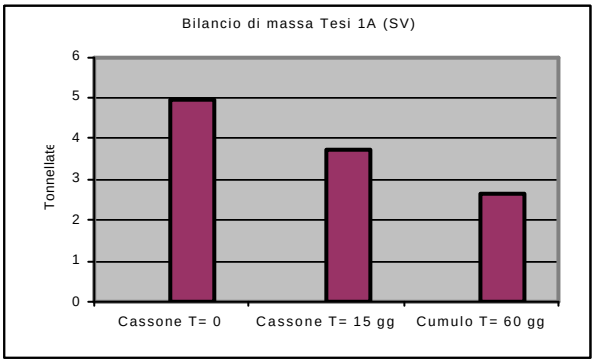


Grafico 3.7.1.3.

TESI 1B

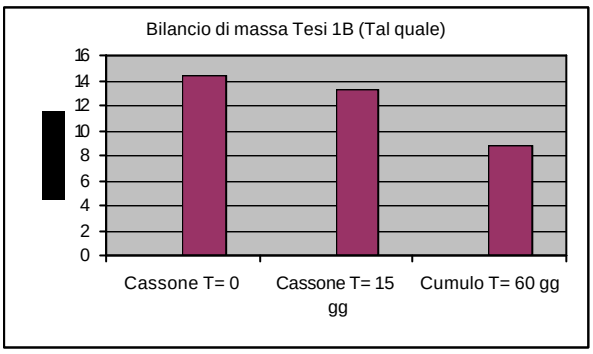


Grafico 3.7.1.4.

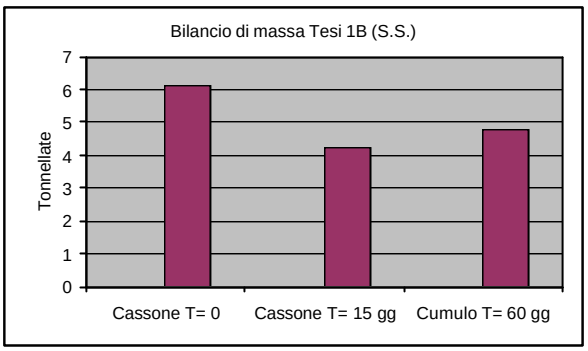


Grafico 3.7.1.5.

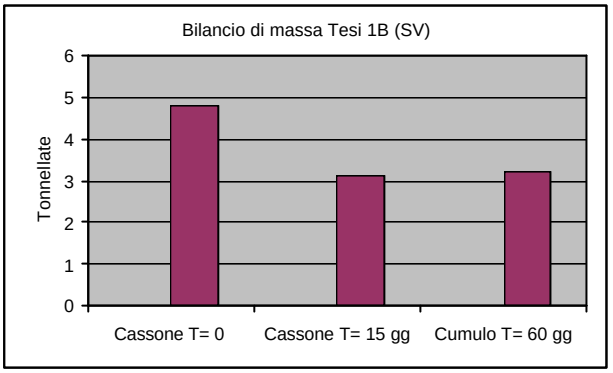


Grafico 3.7.1.6.

TESI 1C

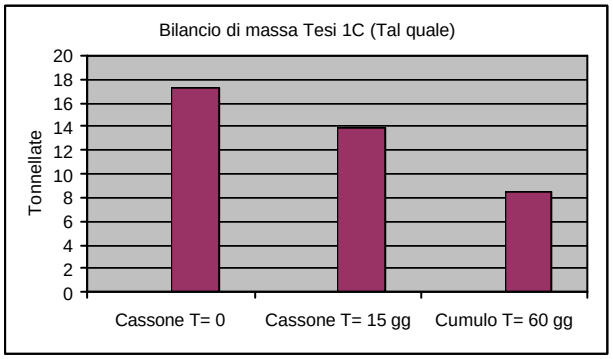


Grafico 3.7.1.7.

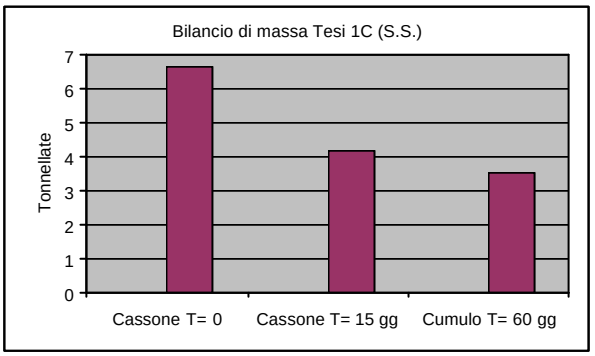


Grafico 3.7.1.8.

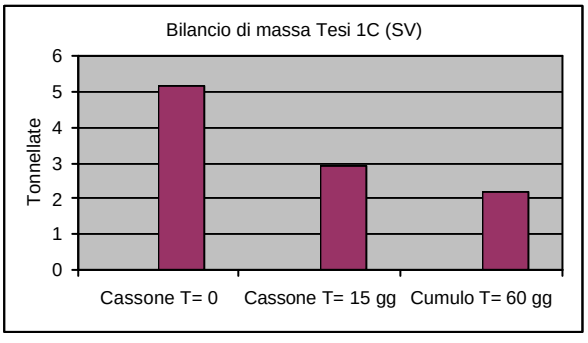


Grafico 3.7.1.9.

3.7.2. Bilanci di massa II° ciclo

TESI 2B1

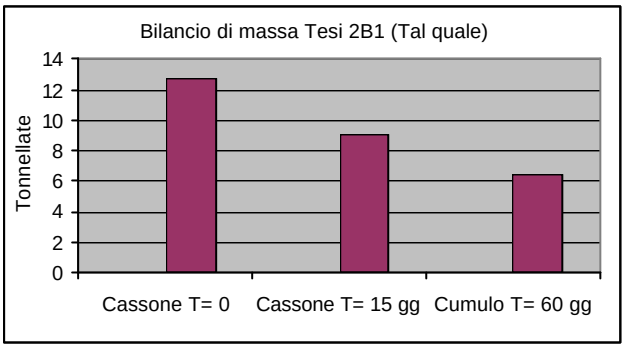


Grafico 3.7.2.1.

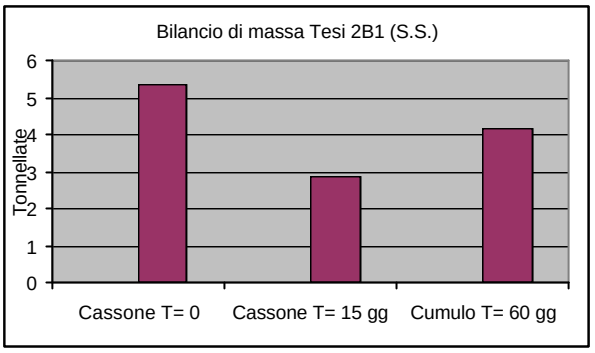


Grafico 3.7.2.2.

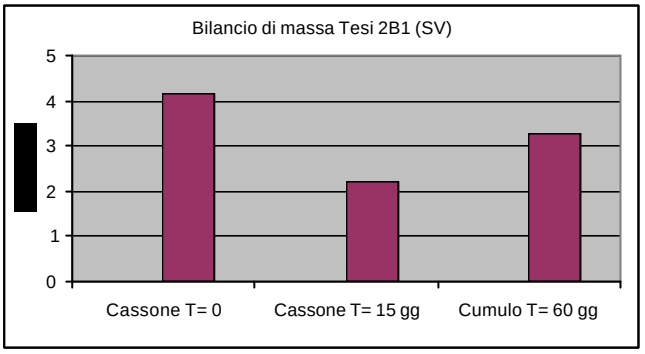


Grafico 3.7.2.3.

TESI 2B2

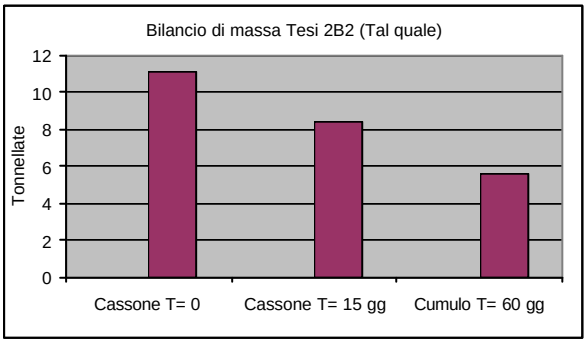


Grafico 3.7.2.4.

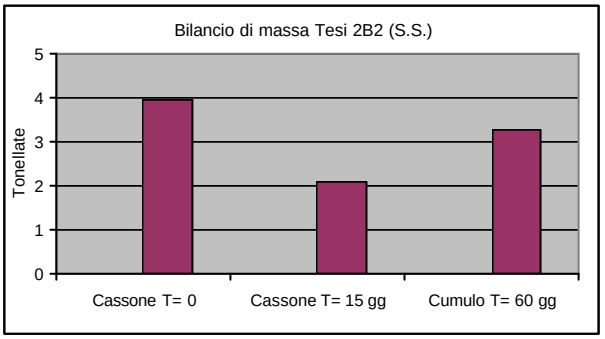


Grafico 3.7.2.5.

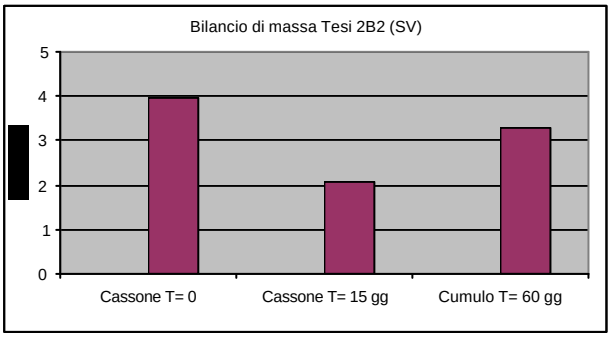


Grafico 3.7.2.6.

TESI 2B3

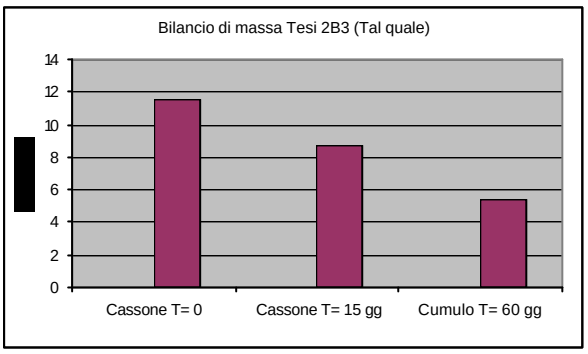


Grafico 3.7.2.7.

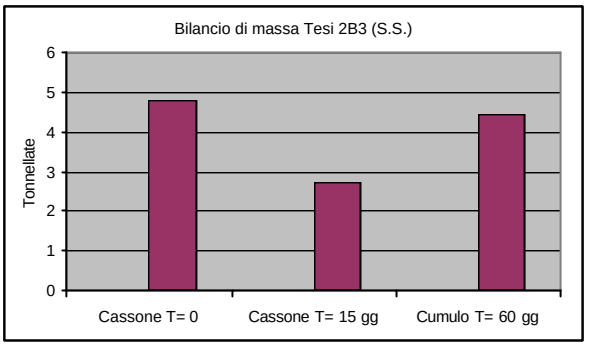


Grafico 3.7.2.8.

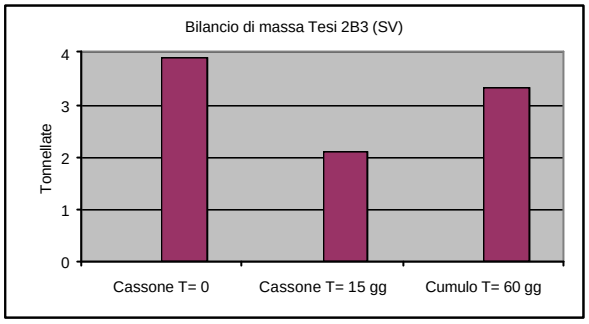


Grafico 3.7.2.9.

3.7.3. Bilanci di massa III° ciclo

Tesi 3B1

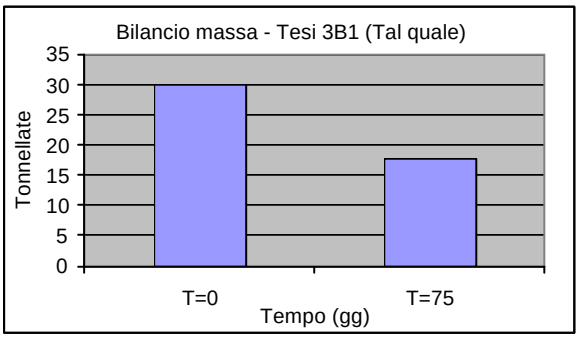


Grafico 3.7.3.1.

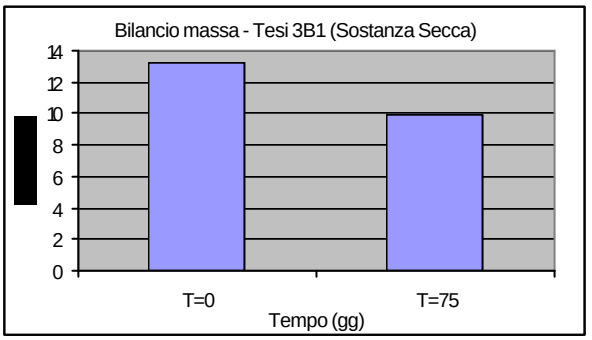


Grafico 3.7.3.2.

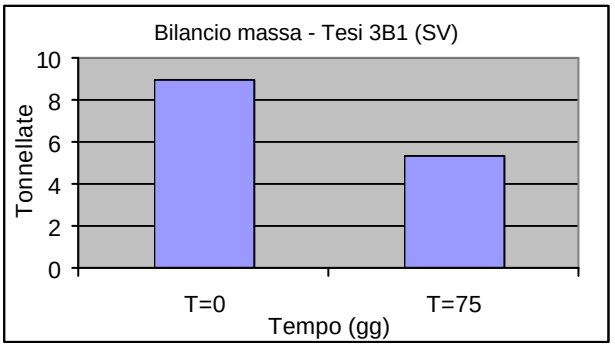


Grafico 3.7.3.3.

Tesi 3B2

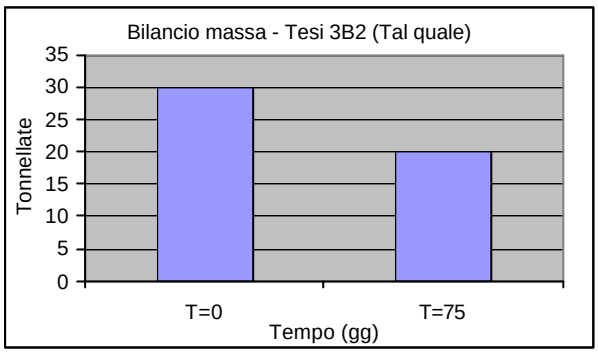


Grafico 3.7.3.4.

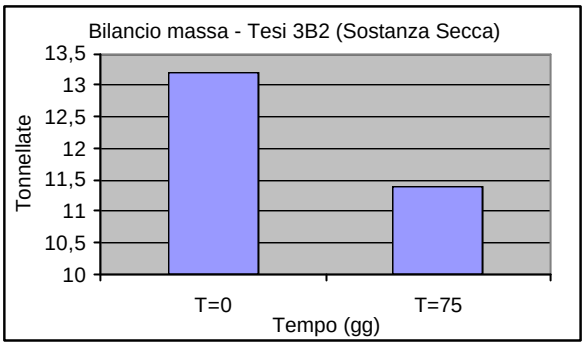


Grafico 3.7.3.5.

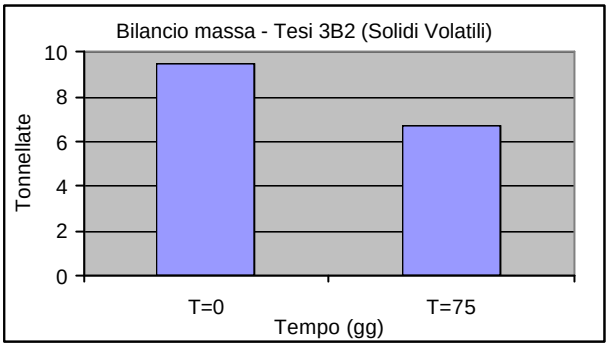


Grafico 3.7.3.6.

Tesi 3B3

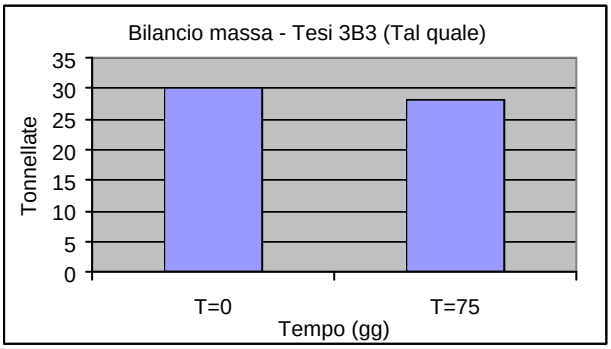


Grafico 3.7.3.7.

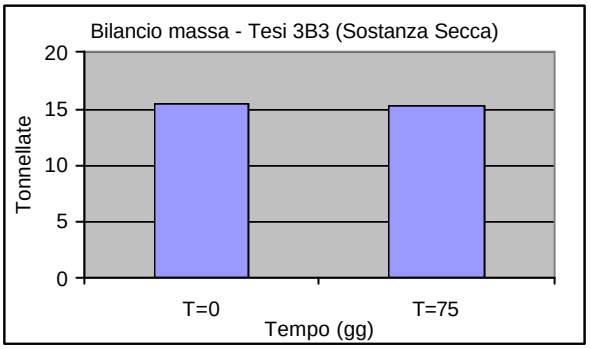


Grafico 3.7.3.8

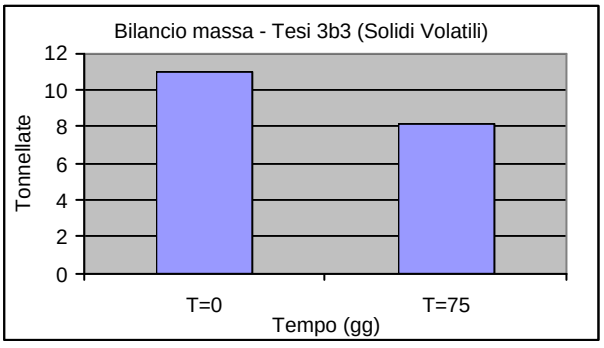


Grafico 3.7.3.9.

Tabella 3.7.3.1.: Dati riassuntivi dei bilanci di massa delle miscele tal quali.

CAMPIONE	Tonnellate			
	T= 0 gg	Fine Bio- ossidazione T= 15 gg	Fine Maturazione T= 75 gg	Perdita peso
1A	14.60	12.14	9.11	5.49
1B	14.40	13.31	8.79	5.61
1C	17.20	13.97	8.44	8.76
2B1	12.70	9.06	6.45	6.25
2B2	11.15	8.36	5.57	5.58
2B3	11.49	8.77	5.39	6.1
3B1	30.00	=	17.59	12.41
3B2	30.00	=	20.09	9.91
3B3	30.00	=	28.04	1.96

La tabella 3.7.3.1. riassume i dati prima esemplificati in forma grafica.

In particolare si evidenzia che le maggiori perdite di peso si sono verificate per quelle prove che prevedevano una percentuale di carta del 12%, che deve ritenersi quindi ottimale anche considerando la qualità del compost ottenuto (vedi paragrafo 3.6.).

I coefficienti di degradazione sono compresi tra il 40 ed il 50% per tutte le prove sperimentali tranne che per le prove 3B3 e 3B2, rispettivamente pari al 6.53% e 33.03%.

4. ANALISI MERCEOLOGICHE

4.1. I° E II° CICLO

Le analisi merceologiche sulle matrici di fine processo dei primi due cicli sperimentali sono state effettuate considerando una frazione con Ø > 20 mm (sovvallo), una di pezzatura compresa tra 10 e 20 mm ed una inferiore a 10 mm (compost finale).

Sulle frazioni > 20 mm e 10 < Ø < 20 è stata eseguita una separazione manuale delle frazioni carta, plastica e legno (Figura: 4.1.1.)

Figura 4.1.1.: Frazioni merceologiche.

Il calcolo della quantità di carta degradata è stata effettuata mediante stima della carta ancora presente nella miscela finale. Le determinazioni sono state effettuate mediante metodica empirica di separazione fisica – visiva, della carta residua presente nel materiale oggetto di studio.

La stima della quantità di carta ancora presente alla fine del processo di compostaggio è stata compiuta riportando i valori quantificati per il materiale tal quale (Figure: 4.1.2. a 4.1.7.), alla

umidità della "matrice carta" all'inizio del processo, questo per rendere confrontabili le quantità in entrata con quelle in uscita dal processo stesso.

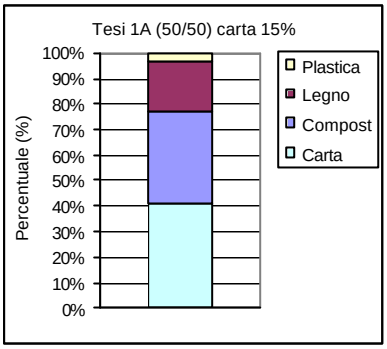


Figura: 4.1.2.

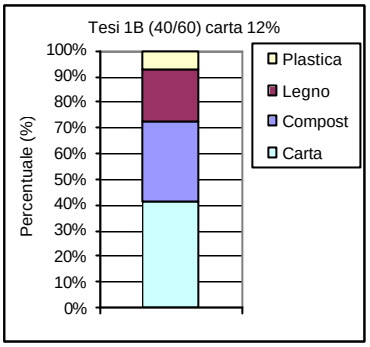


Figura: 4.1.3.

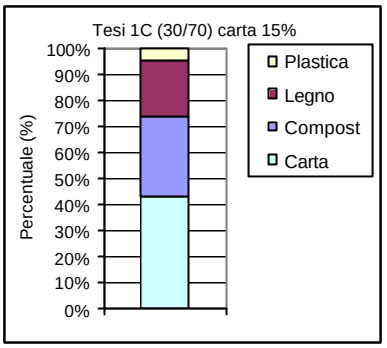


Figura: 4.1.4.

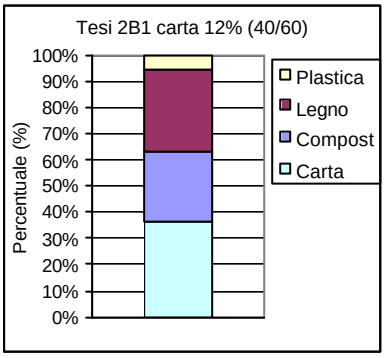


Figura: 4.1.5.

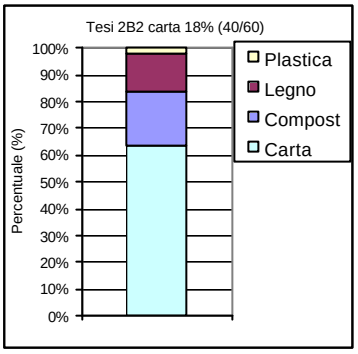


Figura: 4.1.6.

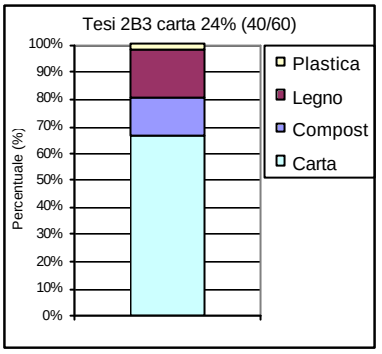


Figura: 4.1.7.

4.2. III° CICLO

La consistenza del prodotto (elevata umidità) a fine processo non ha consentito la vagliatura in laboratorio e si è ricorsi ai vagli meccanici presenti presso l'impianto ottenendo due tipologie di frazioni: il sovvallo ed il compost.

Solo sul sovvallo è stata stimata la presenza di carta residua.

Considerando il valore di umidità della carta residua paria quella riscontrata all'inizio (9%), si è proceduto al bilancio di massa della carta.

I risultati migliori (Tabella 4.1.1.) sono scaturiti dal I° ciclo di prove approntate presso l'impianto di Lodi, dove non si sono registrati problemi a carico del processo come negli altri due.

In particolare come già precedentemente accennato, durante il II° ciclo di prove sperimentali, eseguito presso l'impianto di Lodi a bio-containers, si è verificata una carenza di umidità delle

miscele. Questo ha rallentato i processi degradativi e di conseguenza anche quelli a carico della carta.

Tabella 4.1.1.: Risutati stima carta degradata

CICLO	CAMPIONE	CARTA INIZIALE (Tonnellate)	CARTA NON DEGRADATA (Tonnellate)	CARTA DEGRADATA (% t.q.)
I°	**1A**	2.190	0.733	66.54
	1B	1.728	0.663	60.62
	1C	1.548	0.597	61.45
II°	**2B1**	1.524	0.935	38.65
	2B2	2.007	1.508	24.84
	2B3	2.758	1.540	44.14
III°	**3B1**	3.600	1.477	41.03
	3B2	5.400	1.395	25.83
	3B3	7.200	3.050	42.36

Il terzo ciclo approntato presso l'Impianto di Carpi mostra coefficienti di degradazione inferiori, probabilmente dovuti alla tipologia d'impianto: cumuli statici rivoltati, per i quali si osserva un'elevata umidità a causa dell'eccessiva piovosità di quel periodo.
Le differenze sono con probabilità da imputarsi ai diversi coefficienti di degradazione ottenuti durante i processi.

5. CONCLUSIONI

La carta in quanto cellulosa (matrice carboniosa) è completamente degradabile e quindi compostabile, si deve trovare solo trovare il sistema più efficiente in termini di miscele e tipologia e durata del processo.

Le tipologie di miscele adottate e opportunamente variate nel corso della sperimentazione hanno permesso di individuare nella miscela 40/60 (legno/organico) con il 12 % di carta come quella ideale.

Il sistema di compostaggio più idoneo tra i due utilizzati è risultato essere quello a bio-container.

In effetti, il mantenimento di condizioni ottimali (O_2, H_2O, temperatura, etc..) di processo permette di ottenere compost di elevata qualità con coefficienti di degradazione della carta pari al 60% del contenuto iniziale.

6. BIBLIOGRAFIA

AVV. (1995). Ingegneria dei rifiuti solidi urbani. In Atti del XLIII Corso di aggiornamento in ingegneria sanitaria-ambientale. Milano, Giugno, 1995, pp.260-275.

Adani F., Genevini P.L., Gasperi F., Zorzi G., (1997). Organic Matter Evolution Index (OMEI) as a measure of composting efficiency. Compost Science & Utilization, 5 (2): 25-37.

Adani F., Genevini P.L., Tambone F., (1995). A new index of organic matter stability. Compost Science and Utililization, 3(2): 25-37.

Adani F., Lozzi P., Genevini P.L. (2001). Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products. Compost Science & Utilization, 9 (2): 163-178.

Adani F., Tambone F., (1998). Evoluzione della componente organica. In Compost e Agricoltura, P.L. Genevini (eds.). Fondazione Lombardia per l'Ambiente, pp.75-119.

Adani F., Tambone F., Genevini P.L., Calcaterra E., (1998). Stabilization of Municipal Solid Waste Fractions: A Laboratory Approach. Technology & Environment, 4: 2-8.

Adani, Genevini, Gasperi, Tambone, (1999). Composting and humification (Compost Science & Utilization), Vol.7 (1), pp. 24 – 33.

Adani, Genevini, Tambone, (1995). A new index organic matter stability (Compost Science & Utilization), Vol.3, pp. 25 – 37.

Adani, Genevini, Zaccheo, Zocchi, (1998) The effect of commercial humic acid on tomato plant growth and mineral nutrition (Journal of Plant Nutrition), Vol. 21 (3), pp. 561 – 575.

Ashbolt N. J., Line M. A., (1982). A bench-scale system to study the composting of organic wastes. J. Environ. Qual., 11 (3) : 405-408.

ASTM, (1996). Standard test method for determining the stability of compost by measuring oxygen consumption. American Society for testing and materials , D 5975– 96.

ASTM., (1992). Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions. American Society for testing and materials , D 5338 – 92.

Astori C., (1998). Fitotossicità. In Compost e Agricoltura, P.L. Genevini (eds.), Fondazione Lombardia per l'Ambiente, pp. 186-189.

Barth, (18-19/01/2001). From waste to valuable product – quality assurance schemes for compost production (INFORMA Compost Consultants, Conference "Soil & Biowaste in Southern Europe") Roma.

Caporali, (1991) Ecologia per l'Agricoltura, Utet - Torino).

Chefetz, Adani, Genevini, Tambone, Hadar, Chen, (1998). Humic-acid transformation during composting of municipal solid waste (Journal Environmental Quality) Vol. 27, pp. 794 – 800.

Chefetz, Hatcher, Hadar, Chen, (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste (Journal Environmental Quality) Vol. 25, pp. 776 – 785.

Chen Y. and T. Aviad, (1990). Effect of humic substances on plant growth. In Humic substances in soil and crop sciences: Selected Readings. Proceedings of a symposium cosponsored by the International Humic Substances Society, P. Mac Carty, C.E. Clapp., R.L. Bloom (eds.). Chicago, IL, pp.161-186.

Chen Y., and Y. Inbar, (1993). Chemical and spectroscopical analyses of organic matter trasformation during composting in relation to compost maturity. In Science and Engeneering of Composting: design, Environmental, Microbiology and Utilization Aspects, Hoitink H.A.J., and H.M. Keener (eds.). The Ohio State University, pp. 551-600.

Chino M., Kanazawa S., Mori T., Araragi, M., Kanze B., (1983). Biochemical studies on composting of municipal sewage sludge mixed with rice hull. Soil Sci. Plant Nutr., 29 (2): 159-173.

Ciavatta., Vittori Antisari, Sequi, (1990). An enzymatic approach to the determination of the degree of stabilization of organic carbon in fertilizers (Fertilizers Research), Vol. 25, pp. 167 – 174.

Ciccotti A.M., Toller G., (1990). Rassegna bibliografica di metodi respirometrici e descrizione di in semplice apparecchio per la misura dell'attività respiratoria di compost e terreni. Acqua Aria, 4: 377-384.

Citernesi U., De Bertoldi M., (1979). Il compostaggio dei fanghi miscelati alla frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Inquinamento, 12: 45-50.

Cortellini e Favoino, (18-19/01/2001) Composting and biological treatment in Southern European Countries: an overview (E.U. Conference on "Soil & Biowaste in Southern Europe") Roma.

Costech International, (1999). Manuale del Sistema portatile Dewar-Combi CO_2. Biomass™.

De Bertoldi M., Vallini G., Pera A., (1983). The biology of composting: a review. Waste Management and Research, 1: 157-176.

Deiana, Gessa, Manunza, Rausa e Seeber (1990). Analytical and spectroscopic characterization of humic acids extracted from sewage sludge, manure, and worm compost (Soil Science), Vol. 150, pp. 419 – 424.

DI. VA. P. R. A. and I. P. L. A., (1992). Umidità totale; Umidità residua; Sostanze volatili e ceneri;. In Metodi di Analisi dei Compost, DI. VA. P. R. A. and I. P. L. A (eds). Collana Ambiente, Assessorato all'Ambiente, Regione Piemonte, pp. 15;16; 18; 70-73.

Epstein, Willson, Burge, Muller e Enkiri, (1976). A foced aeration systems for composting wastewater sludge (Journal of Water Pollution Control Federation), Vol. 48, pp. 688 – 693.

European Community, (2001). Working Document – Biological Treatment of Biowaste 2nd draft, 12 february 2001.

Finstein, Cirello, MacGregor, Miller e Psarianos, (1980). Sludge composting and utilization / Rational approach to composting process control. Report, (New Jersey Agricoltural Experiment Station, New Brunswick, NJ).

Finstein, Strom, MacGregor, Miller e Psarianos, (1983). Composting ecosystem management for waste treatment, (Bio - Technology), Vol. 1, pp. 347 – 353.

Genevini, Adani, Villa, (1997). Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry (Soil Science and Plant Nutrition), Vol. 43, N°1, 135 – 147.

Guidi G., (1992). Effetti del compost sulle proprietà fisiche del terreno. Acqua-Aria, 10: 983-987.

Haug, R.T., (1986). Composting process design criteria, part 3. Biocycle, October.

Iannotti D. F., Toth L., Hoitink H.A.J., (1992). Compost stability. BioCycle, November: 62-66.

Lasaridi K.E., Stentiford E.I., (1996). Respirometric techniques in the context of compost stability assessment: principles and practice. In The Science of Composting, De Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes and T. Papi (eds). Blackie Academic & Professional, London, pp. 567-576.

Maniatis K., Ferrero G. L., (1992). Risultati e prospettive per gli impianti di compostaggio realizzati come attività dimostrative della CEE. Acqua Aria, 10: 969-975.

Muller W., Fricke K., Vogtmann H., (1998). Biodegradation of organic matter during mechanical biological treatment of MSW. Compost Science & Utilization, 6, (3): 42-52.

Naganawa T., Kyuma K., Yamamoto H., Tatsuyama K., (1990). Automatic measurement of CO_2 evolution in multiple samples in small chambers. Soil Sci. Plant Nutr. 36 (1): 141-143.

Nicolardot B., Germon J.C., Chaussod R., Cautroux G., (1982). Une technique simple pour dèterminer la maturité des compost urbains. Compost Information, 10 : 2-4.

Paletski W., Young J.C., (1995). Stability Measurement of Biosolids Compost by Aerobic Respirometry. Compost Science & Utilization, 3, (2):16-24.

Regione Lombardia, (1999). Studio degli impianti di produzione di compost e definizione delle corrispondenti linee guida. Approvato nella seduta del Comitato Tecnico, ex art. 17 l.r. 94/80 del 6/4/1999, e nella seduta del CRIAL ex art. 1 l.r. 35/84 in data 12/5/1999: 2-3.

Roletto, (1982). Le caratteristiche chimiche dei materiali organici nel corso del processo di compostaggio. Metodi chimici per la valutazione della maturità dei compost. Determinazione delle sostanze umiche (In Barberis, R. (1984); da ISTITUTO AGRARIO PROVINCIALE di San Michele all'Adige. Corso di aggiornamento e specializzazione "PRODUZIONE E IMPIEGO DEL COMPOST", novembre 1988).

Rynk, (1992). On – farm composting Handbook (Northeast Regional agricoltural Engineering Service, Cooperative Extension, Ithalica, NY), Chapter 4 pp. 24 – 42.

Scaglia B., Tambone F., Genevini P.L., Adani F., (2000). Respiration Index Determination: A Dynamic And Static Approach. Compost Science & Utlization, 8, (2): 90-98.

Scaglia, Tambone, Genevini e Adani, (2000). Respiration Index Determination: Dynamic and Static Approaches (Compost Science & Utilization), Vol. 8, N° 2.

Sequi, (1991). Criteri di qualità del compost: la maturazione della sostanza organica (In: Riciclo di biomasse di rifiuto e di scarto e fertilizzazione organica del suolo. A cura di Senesi e Miano, Patron Editore, Bologna.), pp. 13 – 17.

Stevenson F.J., (1982). Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. John Wiley & Sons; New York, N.Y.

Sugahara e Inoko, (1981) Composition analysis of humus and characterization of humic acid obtained from city refuse compost (Soil Sci. Plant Nutr.), Vol. 27, pp. 471 – 783.

The U.S. Composting Council, (1997). Self Heating. In Test methods for the examination of composting and compost, P.B. Leege and W.H.Thompson (eds.). The U.S. Composting Council, Bethesda, Maryland USA, pp. 9207-9216.

Torretta V., Mecagni L., Kubocz T., Grueneklee E., (1997). Il sistema biobox per il compostaggi. RS Rifiuti Solidi, XI, (1).

UNI., (1992). Combustibili solidi minerali ricavati da rifiuti urbani (RDF) - Indicazioni di base per il campionamento sistematico dei combustibili. UNI-ottobre 1992, n. 9903, parte 3a.

UNI., (1998). Compost - Classificazione, requisiti e modalità di impiego. Metodo 10780. I edizione.

Vallini, (18-19/01/0/2001). Compost biotechnology in an integrated management of degradable organic waste and in the reclamation of disturbed soils (E.U. Conference on "Soil & Biowaste in Southern Europe") Roma.

Vallini, Pera, Storace, Cecchi e Manetti, (1990). Source – collected vegetable waste: Green composting (BioCycle), Vol. 31, pp. 33 – 35.

Van Der Werf H., Verstraete W., (1987). Estimation of active soil microbial biomass by mathematical analysis of respiration curves: development and verification of the model. Soil Biol. Biochem., 19 (3): 253-260.

Willson, Parr, epstein, marsh, Chaney, Colacicco, Burge, Sikora, Tester e Hornick, (1980). Manual for composting Sewage Sludge by the Beltsville Aerated – Pile Method. (EPA / 600 / 8 – 80 – 022, Office of research and Development, U.S.EPA, Cincinnati, OH).

Zorzi G., Pinamonti F., Gasperi F., Cristoforetti A., Nardelli P., Candioli C., (1992). Impiego agricolo del compost. Acqua-Aria, 10: 995-1004.