

COMBINAZIONE TRA COMPOSTAGGIO E VERMICOMPOSTAGGIO DELLA FORSU: UN CASO STUDIO SICILIANO

Gaetano Di Bella^{1*}, Enrico Licitra¹, Antonino Laudani¹, Sabrina Milano¹, Laura Cozzo¹, Graziella Rabbeni¹, Maria Gabriella Giustra¹, Marco Gentile², Roberto Palumbo², Santo Castagna²

¹ Università degli Studi di Enna "Kore", Facoltà di Ingegneria e Architettura, Enna

² EcoEnna Servizi srl, Enna

Sommario

In natura i lombrichi elaborano enormi quantità di detriti vegetali ingerendoli e convertendoli in vermicast, ovvero il prodotto finale del processo di digestione dei lombrichi. Il vermicast è ampiamente riconosciuto come fertilizzante organico adatto alle piante. Ad oggi, il vermicompostaggio controllato di matrici organiche diverse rispetto alle deiezioni bovine, come ad esempio la frazione organica derivata dai rifiuti solidi biodegradabili (FORSU), ha fatto registrare risultati contraddittori limitando, di fatto, l'estensione dei risultati di laboratorio ad iniziative su più ampia scala del vermicompostaggio. I substrati organici più "fruttuosi" rimangono il letame animale e/o rifiuti alimentari selezionati. Al fine di approfondire la tematica, in questo studio è stato analizzato un processo combinato di compostaggio-vermicompostaggio con *Eisenia fetida* per il trattamento della FORSU, mescolata con un substrato più idoneo ai lombrichi costituito da una miscela di lettiere animali e scarti alimentari preselezionati (MO – Materia Organica preselezionata). Per quanto riguarda la FORSU, sono state analizzate tre frazioni differenti provenienti da un impianto reale del settore di Gestione dei rifiuti municipali in Sicilia: FORSU tal quale, pre-compostato (PC, da intendersi come matrice organica che ha completato la fase di biodegradazione termofila) e Compost (C). I test di laboratorio hanno previsto 5 differenti applicazioni

con proporzione di miscelazione differente, in parte coadiuvati dall'aggiunta di materia organica preselezionata (MO). I parametri fisico-chimici e il rapporto di crescita dei vermi nei diversi trattamenti sono stati misurati e confrontati. I risultati hanno mostrato che il processo combinato ha aumentato la qualità del prodotto finale, specialmente per le matrici selezionate e per la FORSU preliminarmente trattata, con un prodotto fertilizzante che appariva omogeneo, granulare, inodore e ricco di nutrienti. In particolare, l'analisi fisico-chimica ha mostrato una significativa riduzione del rapporto C:N quando il vermicompostaggio è stato applicato alle matrici miscelate e MO, con rilevante aumento dell'azoto totale (N) e del fosforo disponibile (P). Il numero di lombrichi durante il processo è aumentato, sia in peso netto che in tasso di crescita, in particolare quando la FORSU è stata miscelata con materiale organico selezionato. Di contro, si è registrato un significativo accumulo di metalli pesanti nel "The di lombrico" (da intendere come fase liquida ottenuta da processi di biodegradazione del materiale organico e soprattutto dall'attività metabolica dei lombrichi), ed un contenuto degli stessi via via inferiore durante il processo.

Parole chiave: *compost, FORSU, Lombrichi, Vermicompostaggio.*

COMBINATION OF COMPOSTING AND VERMICOMPOSTING OF OFMSW: A CASE STUDY IN SICILY

Abstract

Earthworms elaborate huge amounts of plant debris by ingesting it and converting it into vermicast, the final product of the worm digestion process. Vermicast is widely

recognized as a suitable organic fertilizer for plants. To date, controlled vermicomposting of organic matrices, different than bovine manure, such as for example the organic fraction derived from biodegradable solid waste (OFMSW), has recorded contradictory results, effectively limiting the extension of laboratory results to in initiatives on a larger scale than vermicomposting. The most "fruitful" organic substrates remain animal manure and/

IdA



* Facoltà di Ingegneria e Architettura – Università degli Studi di Enna "Kore", Cittadella universitaria, 94100 Enna gaetano.dibella@unikore.it

Ricevuto il 23-3-2023. Modifiche sostanziali richieste il 19-4-2023. Accettazione il 8-5-2023.

or selected food waste. In order to deepen the topic, in this study a combined process of composting-vermicomposting was analyzed with *Eisenia fetida* for the treatment of OFMSW, mixed with a more suitable substrate for earthworms consisting of a mixture of litters animals and pre-selected food waste (OM – pre-selected Organic Matter). As far as OFMSW is concerned, three different fractions from a real plant in the municipal waste management sector (Sicily) were analysed: OFMSW as it is, pre-composted (PC, meant as an organic matrix that has completed the thermophilic biodegradation phase) and Compost (C). The laboratory tests involved 5 different applications with different mixing proportions, partly assisted by the addition of pre-selected organic matter (OM). The physicochemical parameters and growth ratio of the worms in the different treatments were measured and compared. The results showed that the combined process increased the quality of the final product, especially for the selected matrices and for the pre-

treated OFMSW, with a fertilising product that appeared homogeneous, granular, odorless and rich in nutrients. In particular, the physicochemical analysis showed a significant reduction of the C:N ratio when vermicomposting was applied to the mixed matrices and MO, with a significant increase in total nitrogen (N) and available phosphorus (P). The number of earthworms increased during the process, both in net weight and growth rate, particularly when OFMSW was mixed with selected organic material. On the other hand, there was a significant accumulation of heavy metals in the “Tea of earthworm” (meant as a liquid phase obtained from organic material biodegradation processes and especially from the metabolic activity of earthworms), and a content of the same gradually lower during the process.

Keyword: *compost, FORSU, Earthworms, Nutrients, Vermicompost.*

1. Introduzione

La produzione di rifiuti solidi tende inevitabilmente ad accrescersi con la crescita demografica e lo sviluppo economico e sociale (Ebrahimi et al., 2018; Eslami et al., 2018). I rifiuti solidi comprendono i rifiuti municipali, industriali, agricoli e i fanghi di depurazione: nel complesso si prevede un progressivo incremento nella produzione di tali rifiuti (García-Sánchez et al., 2017).

Purtroppo, i convenzionali metodi di smaltimento dei rifiuti (discariche, inceneritori etc) risultano avere impatti ambientali più significativi rispetto ai trattamenti basati su processi biologici. Gli stessi, se basati su strategie di recupero di materia, risultano globalmente più efficienti rispetto ai processi di trasformazione termica.

In particolare, i metodi di trattamento basati su processi biotecnologici presentano molti vantaggi, tra cui alta velocità, facilità di controllo, bassi costi, elevata accettabilità ambientale e sanitaria e potenziale utilizzo a scale differenti (Yadav et al., 2010). Il compostaggio è il processo biologico più utilizzato e studiato per gestione della frazione organica dei rifiuti (Kumar et al., 2012). Il vermicompostaggio, di contro, si ispira ad un processo biologico simile (aerobico) operato dall'attività combinata di lombrichi e batteri, piuttosto che dei soli batteri aerobici (Adhikary, 2012).

Il compostaggio è un processo di biodegradazione dei rifiuti organici in condizioni aerobiche effettuato da microrganismi in cui i rifiuti organici vengono convertiti in composti minerali, come CO_2 , H_2O , NH_4 , così come composti organici ricchi di humus. Questi ultimi, sono adatti per migliorare le proprietà fisiche del suolo (Lim et al., 2016; Qian et al., 2014).

Il processo di vermicompostaggio, simile al processo di compostaggio, è un processo biologico non esclusivamente batterico, in cui i nutrienti nei rifiuti organici si trasformano in un prodotto stabile, disponibile e nutriente per la crescita delle piante (Rupani et al., 2017). Nel processo di vermicompostaggio, infatti, l'ossidazione e la stabilizzazione biologica dei rifiuti organici dipendono dall'interazione tra lombrichi e microrganismi nel processo mesofilo di trasformazione. Specificatamente, l'attività dei lombrichi aumenta e migliora la matrice organica destinata al consumo di microrganismi. (Lazcano et al., 2008; Oluseyi et al., 2016; Pigatin et al., 2016). Il vermicompost finale è un materiale stabilizzato ed omogeneo ad alto contenuto di nutrienti e materiali a bassa tossicità che presenta molti vantaggi, come un'ottima capacità di scambio cationico, una maggiore capacità di ritenzione un'elevata concentrazione di nutrienti (Adi e Noor, 2009).

I lombrichi sono gli animali che elaborarono le maggiori quantità di suolo in natura (Feller et al., 2003; Premalatha et al., 2010 e 2013): ingeriscono detriti di piante morte ed escrementi di animali e suolo, contribuendo così alle positive trasformazioni del terreno e contemporaneamente, favorendo la mineralizzazione della fitomassa morta (Edwards et al., 2011). Ma, nonostante la quantità e tipologie di lombrichi in natura, l'uso controllato dei lombrichi per trattare i rifiuti organici è stato finora in gran parte limitato al compostaggio dei vermi del letame animale e in minor misura dei rifiuti alimentari domestici (Tauseef et al., 2013). Nella gestione dei rifiuti municipali, tuttavia, accanto ai rifiuti alimentari esistono altre frazioni più recalcitranti di origine vegetale come i rifiuti di foglie, erbacce o scarti delle colture, nonché elementi

tossici derivati dalla non perfetta separazione a monte. Per questo motivo il vermicompostaggio applicato alla FORSU ha evidenziato molti limiti e risultati contrastanti limitando l'applicazione su larga scala. Nonostante, il vermicompostaggio sia un processo intrinsecamente pulito, che richiede molta meno energia rispetto al compostaggio, in quanto le temperature raggiunte durante il processo risultano essere decisamente inferiori e non richiede rivoltamento periodico dei cumuli, né aerazione forzata grazie all'attività dei lombrichi, i dubbi sui risultati di lungo periodo e delle reali influenze negative dovute alla presenza di alcuni inquinanti nei rifiuti municipali, seppur selezionati, confinano oggi l'applicazione del vermicompostaggio prevalentemente alle trasformazioni di scarti provenienti dalla zootecnica, di letame bovino e rifiuti alimentari selezionati a livello mono-residenziale.

In questo contesto, ad esempio, non può essere ignorato che la presenza di potenziali elementi tossici, come i metalli pesanti presenti nei rifiuti, può minacciare la qualità del suolo e l'ambiente di accrescimento dei lombrichi. In ogni caso, le trasformazioni biochimica dei metalli pesanti durante il processo di vermicompostaggio sono ancora controversi nonostante l'attuale standard sul compost ponga limiti alle concentrazioni totali di alcuni metalli tossici. Diversi studi hanno riportato aumenti di concentrazioni totali di metalli pesanti durante il processo di vermicompostaggio (Khawairakpam e Bhargava, 2009; Suthar, 2010; Hait e Tare, 2012), mentre altri studi hanno ottenuto un comportamento totalmente inverso (Gupta e Garg, 2008). Probabilmente, i diversi modelli di sviluppo osservati sono strettamente legati ai meccanismi di bioaccumulo sito-specifici istaurati e all'evoluzione della riduzione di quantità di sostanza organica in termini di adattamento biologico (Suthar e Singh, 2008; Ngo et al., 2011). Pertanto, l'attività dei lombrichi può influenzare la reale solubilità e biodisponibilità dei metalli pesanti, modificandone la speciazione del vermicast (Wong e Selvam, 2006; Singh e Kalamdhad, 2012).

In questo scenario, risulta molto attuale l'interesse scientifico volto alla combinazione dei processi di compostaggio e vermicompostaggio. In questa filiera di trasformazione, opportunamente ottimizzata, un'ampia gamma di rifiuti organici anche resistenti alla decomposizione, possono essere potenzialmente decomposti senza compromettere l'efficienza del processo. In tal senso, la combinazione del compostaggio con il processo di vermicompostaggio potrebbe risultare idoneo alla biodegradazione di rifiuti solidi provenienti dalla raccolta differenziata cittadina, ad alta o bassa qualità (Lim et al., 2016; Sanchez-Monedero et al., 2010).

Considerando il grande volume di FORSU prodotta e la necessità di una corretta gestione e trasformazione di questi scarti in prodotto riutilizzabile ed ecologico, questo studio mira a valutare il processo combinato di composting-vermicompostaggio per la gestione della FORSU, eventualmente coadiuvando il processo con l'aggiunta di matrici organiche preselezionate. La sperimentazione è stata basata su test in batch di laboratorio, con impianti di vermicompostaggio pilota, su cui sono stati monitorati e misurati i parametri fisico-chimici, il tasso di crescita dei lombrichi e le loro caratteristiche di accrescimento (Accumulo di metalli nei tessuti, produzioni di "the di lombrico" etc.) durante i processi di trasformazioni di matrici reali provenienti da un impianto di compostaggio nella provincia di Catania, in Sicilia (Italia).

2. Materiali e metodi

2.1. Analisi chimico fisiche

Le misure di umidità, pH e temperature sono state effettuate con sonde ad infissione, direttamente sulla matrice solida.

Il contenuto di azoto è stato valutato per mezzo di un metodo pseudo-standardizzato (Corsino et al., 2021). Questo metodo ha previsto una prima fase di preparazione, con triturazione delle matrici organiche da analizzare, e valutazione preliminare dell'umidità (in stufa, per 24 ore a 105°C). Partendo dal valore di umidità iniziale si procedeva a calcolare l'aliquota necessaria di matrice triturata da porre in agitazione con acqua deionizzata in modo tale da garantire un corretto rapporto sostanza secca/acqua (0,5 grammi di sostanza secca e 500 mL di acqua o 1 g SS con 1 L di acqua).

La fase successiva prevedeva una prima agitazione meccanica, volta a rompere/sfaldare i granuli di dimensioni maggiori e creare una sospensione omogenea, e una agitazione blanda dei campioni (in piastra magnetica) per 30 minuti.

Al termine della fase di agitazione veniva prelevata l'aliquota di slurry necessaria per l'analisi dell'azoto totale eseguita per spettrofotometria (metodo acido cromatropico).

Il contenuto di fosforo è stato valutato tramite spettrometria ICP (*Inductively Coupled Plasma*). La preparazione dei campioni ha previsto l'iniziale triturazione, o pestellamento tramite mortaio, volta a rendere la matrice solida omogenea e destrutturata. Successivamente ad 1 g umido di campione venivano aggiunti 6 ml di acido nitrico e 3 ml di acido cloridrico, al fine di predisporre la fase di digestione dei campioni a 145°C per 2 ore. Una volta filtrato (0,45 micron) un campione di 50 ml si è proceduto all'analisi spettrometrica.

Per quanto riguarda il contenuto di materia organica nei campioni e nel vermicast di ogni test, sono state avanzate due misure: Contenuto di carbonio organico e di sostanza organica con metodo Walkley-Black (Violante 2000). Il carbonio organico (C.O.) è una componente misurabile della sostanza organica (S.O.) del suolo. In particolare, il C.O. (< S.O.) è la componente biologicamente “disponibile” misurabile della materia organica del suolo che costituisce una piccola porzione del terreno ma svolge un ruolo fondamentale nella funzione fisica, chimica e biologica del suolo. Il contenuto di carbonio organico dei suoli varia con il tipo di suolo, ma anche al variare dell’uso del suolo e, in misura ancora maggiore, con le diverse pratiche colturali (es. concimazione organica nelle zone dove è diffuso l’allevamento). Per questo motivo, i rapporti C/N sono stati riferiti al contenuto di C.O.

2.2 Impianto di compostaggio

L’impianto da cui sono state campionate le matrici oggetto di studio è ubicato all’interno del territorio della Provincia di Catania (Sicilia), dislocato su una superficie di circa 25.500 mq. Il layout comprende:

- area di pretrattamento iniziale, stoccaggio e miscelazione;
- area di biostabilizzazione (costituita da 8 biocelle);
- area di maturazione post-biostabilizzazione e stoccaggio prodotto finito;
- bacino di contenimento del colaticcio;
- area per presidio trattamento aria esausta tramite biofiltro e scrubber;
- locali tecnici e area lavaggio ruote.

La potenzialità ricettiva dell’impianto è attualmente di 150.000 T/anno di rifiuto organico (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani) con una linea di processo che prevede:

- pesa e ricevimento;
- scarico e stoccaggio rifiuti ligneo-cellulosici;
- triturazione legno e stoccaggio legno triturato;
- scarico e stoccaggio rifiuti organici;

- miscelazione rifiuti;
- bio-ossidazione accelerata e intermedia;
- stabilizzazione, maturazione e stoccaggio compost grezzo;
- vagliatura finale;
- stoccaggio compost finito.

All’interno dell’area di ricevimento e preparazione è prevista l’operazione preliminare di miscelazione dei diversi rifiuti con legno triturato, in modo da migliorare le caratteristiche della miscela, in termini di composizione e umidità, per lo sviluppo dei processi biochimici e la qualità del prodotto finale. In seguito a miscelazione, il materiale viene trasportato all’interno delle biocelle (superficie lorda di 670 mq cadauna), dove inizia il processo di compostaggio. La pavimentazione impermeabile è dotata di una rete di raccolta del percolato. Il sistema di aerazione può essere attivato sia in modalità “ad immissione” che “in aspirazione”: l’aerazione garantisce il controllo della temperatura e del contenuto di ossigeno. Terminata la fase di bio-ossidazione, generalmente dalla durata media di 14 giorni il materiale viene trasferito alla sezione di stabilizzazione-maturazione, dalla durata di almeno 75 giorni e nella quale avviene il completamento del processo di trasformazione dato dalla formazione di composti organici più stabili (con rivoltamento periodico dei cumuli). Completata la fase di maturazione, il prodotto è soggetto ad operazione di raffinazione finale, costituita dalla vagliatura per la rimozione dei materiali grossolani.

I campioni oggetto dei test sperimentali condotti presso il LISA (Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale) dell’Università di Enna, hanno previsto il prelievo di tre campioni di circa 30 kg:

- FORSU, prelevato dalla sezione 5 del precedente elenco puntato, prima della fase di miscelazione con i bulking agents (legno triturato);
- PRE-COMPOSTATO, prelevato dopo la bio-ossidazione accelerata (sezione 6);
- COMPOST, prelevato dopo la fase di maturazione, prima della vagliatura (sezione 7).

Tabella 1. Caratterizzazione substrati iniziali.

PARAMETRI	UM	FORSU	Pre-compost (PC)	Compost (C)	Materia Organica selezionata (MO)
Contenuto organico	[g/kgss]	323,5	284,9	268,5	321,8
Contenuto Azotato (N)	[g/kgss]	10,97	12,89	13,84	7,54
Contenuto fosforo (P)	[g/kgss]	0,525	0,809	0,881	0,389
C/N	--	29,5	22,1	19,4	42,7
N/P	--	20,9	15,9	15,7	19,4
pH	--	4,0	6,0	6,0	5,5
umidità	%	85	85	85	95

Al fine di provvedere all'indagine sperimentale comparata con matrici ordinarie, è stato parallelamente preparato un campione di matrice organica selezionata da scarti in ambiente domestico, che rappresenta il campione "bianco" esente da impurità. La caratterizzazione analitica di ogni campione (iniziale) è riportata in Tabella 1.

La pianificazione dei test di laboratorio e l'approntamento delle vermicompostiere è descritto nel prossimo paragrafo.

2.3. Installazione sperimentale

Lo studio sperimentale ha previsto l'utilizzo di vermicompostiere "prefabbricate" fornite dall'azienda CONITALO leader nel settore della lombricoltura dal 1979 (<https://www.conitalo.it/>).

Ogni compostiera era costituita da un comparto inferiore per l'accumulo di percolato, e da ulteriori 3 comparti (di cui solo 2 sono stati utilizzati per gli scopi dello studio proposto) per l'alloggiamento delle matrici da compostare. Il comparto di bio-trattamento era fondamentalmente costituito da un sistema a lettiera in cui i lombrichi possono essere inoculati in un sottile strato di matrice organica che viene consumato nel tempo e a cui vengono aggiunti ulteriori strati nelle piattaforme superiori, raggiungibili liberamente dai lombrichi presenti negli strati inferiori. È importante che i vari strati di sostanza organica in ogni comparto non fossero troppo spessi (dimensione massima 4-5 cm) per permettere ai lombrichi di colonizzare e degradare l'intera profondità.

Sono stati previsti 5 test in 5 differenti compostiere, studiando le 4 matrici descritte nel paragrafo precedente, a cui si è aggiunto un test "misto" miscelando COMPOST e MATERIA ORGANICA SELEZIONATA, al fine di garantire l'eventuale e ulteriore supporto organico qualora la matrice compostata nell'impianto di compostaggio reale fosse stata esageratamente impoverita di substrato.

Ogni vermicompostiera è stata avviata con 3 kg di matrice/lettiera da analizzare.

Lo schema delle vermicompostiere e l'installazione sperimentale sono riportate in Figura 1, mentre in Tabella 2 sono riportate le composizioni percentuali delle matrici predisposte in ogni comparto dei 5 test.

2.4. Analisi della crescita della biomassa vermifuga

I lombrichi, *Eisenia fetida* (Pramanik e Chung, 2011), sono stati forniti dalla stessa azienda che ha fornito le vermicompostiere.

I vermi forniti erano giovani, conservati nella cultura madre in confezioni di 200 grammi. Inizialmente, la biomassa vermiforme è stata prelevata e adattata in colture miste letame-organico selezionato prima della messa in dimora nelle compostiere, fornite dalla stessa azienda. In particolare, prima dell'esperimento di vermicompostaggio, letame di coniglio e scarti vegetali sono stati mescolati in rapporti 2:1 (w/w), per i primi 10 giorni, e in rapporto 1:1 (w/w) nei successivi 10 giorni. Per fornire una migliore aerazione e controllo dell'umidità, rimuovendo al contempo eventuali gas tossici, si è garantita una miscelazione (manuale) giornaliera della lettiera. La matrice così preparata è stata posta nella prima vaschetta (comparto inferiore), di ogni vermicompostiera. I lombrichi localizzati nella vaschetta inferiore erano liberi di muoversi verso la vaschetta superiore in cui al giorno 0 (t=0 giorni) è stata allocata la matrice da investigare come descritto nel paragrafo precedente.

L'inoculo iniziale è stato realizzato con 200 grammi di lombrichi pre-acclimatati, inseriti nel comparto inferiore di ogni vermicompostiera.

La misura della crescita vermiforme è stata valutata in modo completo solamente alla fine della sperimentazione (t=180 giorni), quando scarti di anguria sono stati disposti all'interno delle vermicompostiere, in vaschette diverse da quelle in cui erano contenute le ma-

Tabella 2. Composizione dei diversi trattamenti.

Ripiano vermicompostiera	TEST	FORSU	Pre-compost (PC)	Compost (C)	Materia Organica selezionata (MO)
Comparto superiore	C1	100%	-	-	-
	C2	-	100%	-	-
	C3	-	-	100%	-
	C4	-	-	50%	50%
	C5	-	-	-	100%
Comparto inferiore	C1	-	-	-	100%
	C2	-	-	-	100%
	C3	-	-	-	100%
	C4	-	-	-	100%
	C5	-	-	-	100%

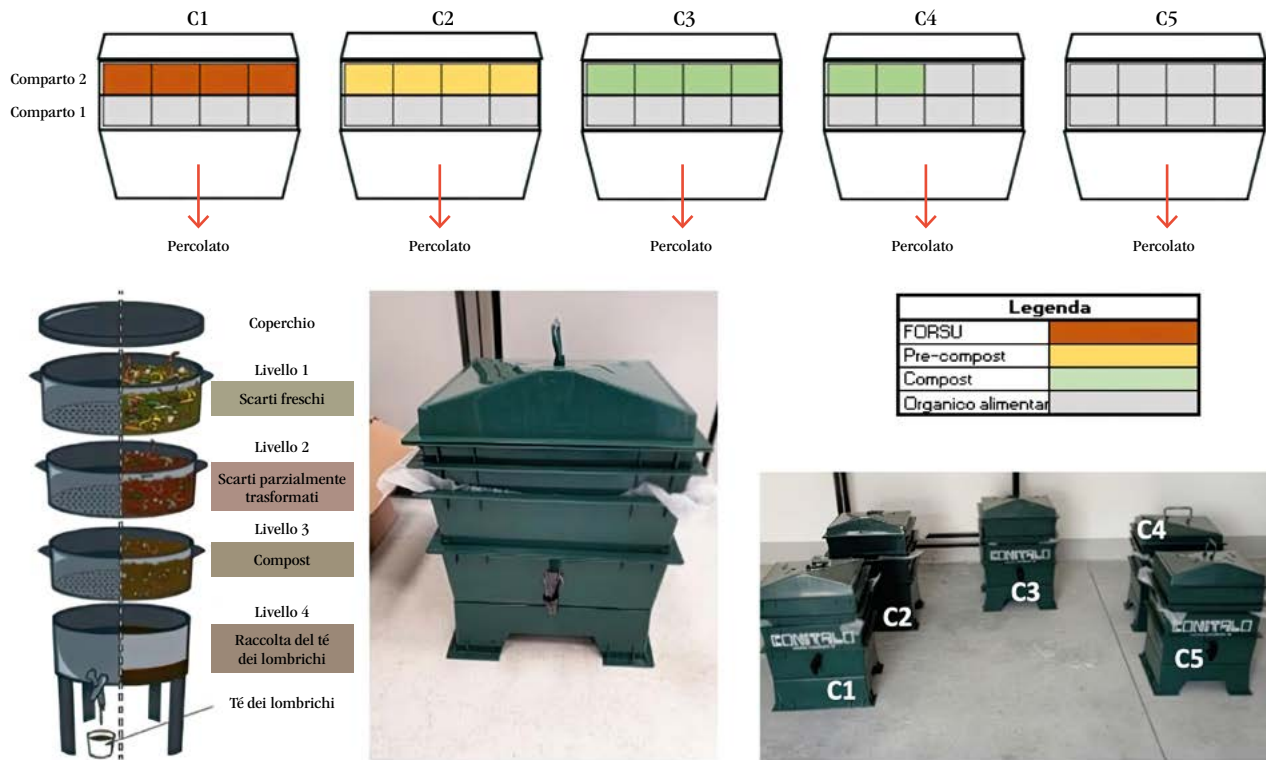


Figura 1. Batteria e particolari delle vermicompostiere installate.

trici trasformate, in modo da poter separare quotidianamente i vermi attratti dalla particolare tipologia di sostanza organica (abbondanza di acqua e zuccheri). Di contro, le analisi intermedie a 15 e 90 giorni sono state condotte su 5 campioni statisticamente rilevanti prelevati al centro e alle 4 estremità del cumulo di entrambe le vaschette. I lombrichi presenti nei campioni venivano pesati e rapportati all'intera massa. Più specificatamente, le analisi intermedie hanno previsto il campionamento di 5 aliquote (50 grammi) omogeneizzate per ogni vaschetta. Al fine di procedere all'analisi fisico-chimica (vedi paragrafo 2.1), i campioni sono stati inizialmente essiccati all'aria a temperatura ambiente, frantumati e setacciati a 0,5 mm. I vermi, preliminarmente rimossi manualmente, sono stati rapportati alla massa totale dopo averli lavati con acqua deionizzata per rimuovere il materiale aderente: gli stessi sono stati re-inseriti nella vermicompostiera specifica, una volta pesati.

Per la valutazione del bioaccumulo di metalli, circa 50 g di vermi, per ogni comparto significativo C1-C5, sono stati selezionati casualmente e tenuti al buio per 24 ore. Questo è stato necessario al fine di permettere ai lombrichi di rilasciare il contenuto intestinale che potrebbe pregiudicare la misura corretta, soprattutto nel caso abbiano ingerito materiale organico in quantità rilevante rispetto al loro peso. Quindi, dopo averli lavati con acqua ultrapura, si è proceduto alla liofilizzazione per l'analisi dei metalli pesanti (solo per il giorno 180). (Song et al. 2014).

3. Discussione e risultati

3.1. Variazioni di pH, temperatura e umidità e volume della massa compostabile

La Figura 2 riporta le misure dei parametri di controllo del processo, oltre alla variazione dei volumi relativa ad ogni vermicompostiera (C1-C5).

Tutti i reattori sono stati mantenuti a temperature ambiente, in un'area di stoccaggio ombreggiata e aerata. Conseguentemente, la temperatura della massa compostabile ha seguito le normali oscillazioni stagionali mantenendosi, a regime, dopo il 60esimo giorno attorno a 25 ± 3 °C.

L'umidità è stata monitorata tramite continui e opportuni interventi correttivi di "umidificazione". Nello specifico l'obiettivo era quello di mantenere l'umidità attorno al $70 \pm 10\%$, in modo da non ostacolare l'azione dei lombrichi e le condizioni aerobiche necessarie per il loro sviluppo. Solamente per i campioni C4 e C5, è stato necessario inserire nella fase iniziale una opportuna quantità di fibre di cocco in modo da ridurre l'eccessivo valore iniziale di umidità ($>90\%$), tipica degli ammassi di organico selezionato.

Per quanto riguarda i valori di pH, si è osservato che il vermicompost in ogni test ha raggiunto un valore pressoché neutro, partendo tuttavia da valori differenti fra loro. I valori di partenza risultavano particolarmente acidi, per il compost e l'organico selezionato (C1 e C5) e debolmente acido per tutti gli altri.

Possibili contributi alle variazioni di pH potrebbero essere dovuti alla differente produzione di CO_2 , $\text{NO}_3\text{-N}$

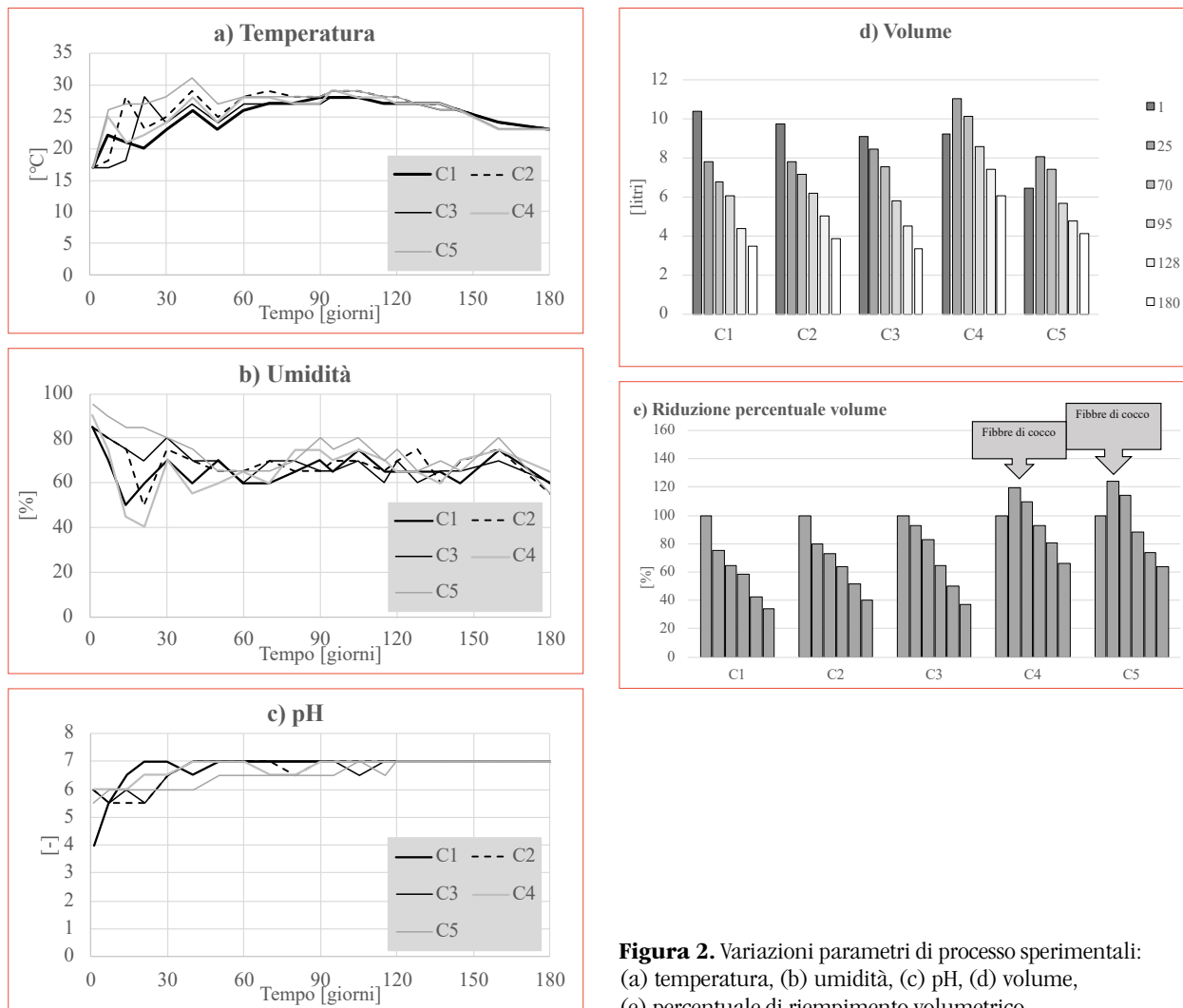


Figura 2. Variazioni parametri di processo sperimentali: (a) temperatura, (b) umidità, (c) pH, (d) volume, (e) percentuale di riempimento volumetrico.

e acidi organici durante il processo (Yadav e Garg, 2011). In generale l'aumento del pH del vermicompost, rispetto ad altri processi di compostaggio (Yadav e Garg, 2011; Arancon e Edwards, 2011), è dovuto alla maggiore perdita di materia organica e al maggiore accumulo di diversi sali minerali nelle forme disponibili (ad esempio fosfato, ammonio, potassio) del vermicompost.

Parallelamente al processo di trasformazione, la massa di materiale nella compostiera ha raggiunto una densità via via maggiore a scapito di una significativa riduzione del volume. La riduzione di volume più significativa è stata osservata nel test C1 riferita al compost (oltre il 65%), mentre per i test C2 e C3 si attestava a valori minori (massimo 37-40%). Gli ultimi due test, condotti con materia organica opportunamente selezionata, hanno fatto registrare minori riduzioni di volume ed una densità maggiore, in questo caso occorre sottolineare che dopo le prime due settimane il volume della massa da trasformare risultava addirittura maggiore a causa del dosaggio di fibre di cocco.

3.2. Variazioni della sostanza organica e rapporto C/N (inizio-metà e fine)

La Figura 3 riporta l'andamento della componente organica, dei nutrienti e del rapporto C/N (N/P) durante la sperimentazione, per i 5 test di vermicompostaggio.

Come sottolineato in precedenza, si è registrata la perdita di sostanza organica. In generale, la perdita di massa organica più significativa (S.O. e C.O.) è stata osservata per le matrici inizialmente più "biodegradabili", nell'ordine C5-C1 (~ 8.5%) e C4 (~ 6.5%). Le matrici relative al pre-compost e compost provenienti dall'impianto reale, essendo state precedentemente trasformate dall'azione batterica attuata nell'impianto di compostaggio, hanno fatto registrare una minore perdita di componente organica (massimo 1-3%).

In modo complementare, ma con percentuale più rilevante, l'aumento dell'azoto totale (N) è stato registrato molto nel vermicompost ottenuto dai test C5, C4 e C1 (rispettivamente 198,6%, 138,5% e 128,5%) rispetto ai test C2 e C3 (ovvero 106,3%, 70,8%, rispettiva-

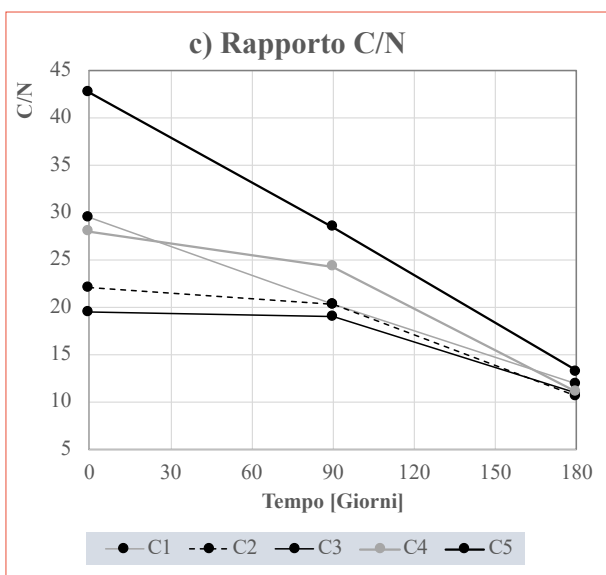
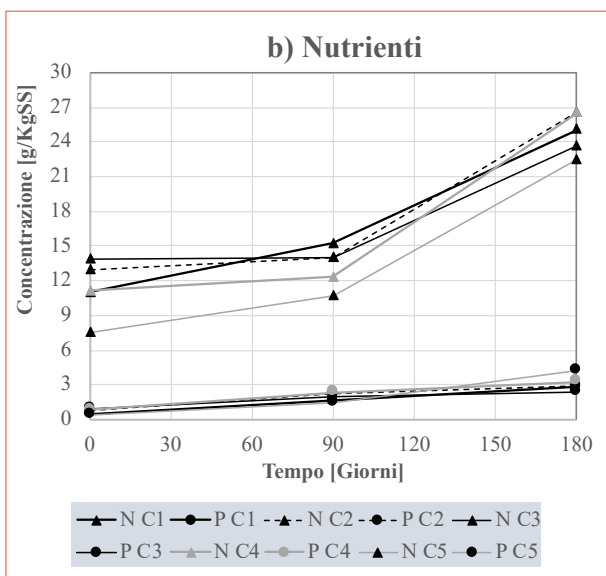
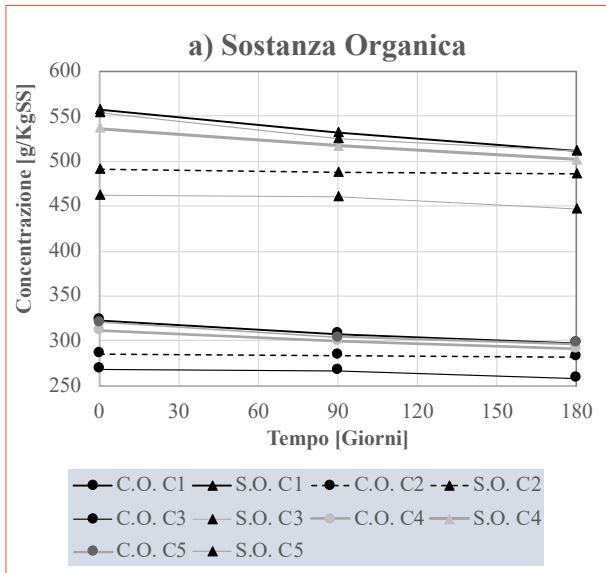


Figura 3. Variazioni durante la sperimentazione del contenuto di Sostanza Organica (a), Nutrienti (b) e rapporto C/N (c) in ogni test

riori a quello di partenza). È interessante sottolineare che mentre l'aumento del fosforo ha un andamento lineare, l'azoto è significativamente aumentato nella seconda metà del periodo sperimentale, una volta stabilizzatasi la fase stazionaria.

Per quanto riguarda lo sviluppo del vermicast, è evidente che la riduzione della sostanza organica è correlabile alla riduzione della massa secca dei rifiuti organici discussi nel paragrafo precedente: questo, a sua volta, è effetto del differente grado di decomposizione e mineralizzazione delle matrici di partenza e delle trasformazioni in vermicompost, con differenti e specifiche concentrazioni di azoto arricchito (Gupta e Garg, 2008). Inoltre, l'aumento significativo dei nutrienti può essere anche addebitato all'attività dei lombrichi che favorivano il rilascio di prodotti metabolici azotati attraverso le deiezioni del lombrico, urina e muco (Suthar e Singh, 2008).

Infine, il rapporto carbonio/azoto (C/N), dove la componente organica è stata riferita alla quota biodegradabile riferita al C.O., è uno dei più comuni indicatori utilizzati per stimare la maturità del compost e successivamente essere adatto per applicazioni sul campo (Suthar, 2010).

Il vermicompostaggio ha ridotto il rapporto C/N del 69,1% per C5, 60,8% per C4, 59,9% per C1, 52,1% per C3, 43,5% per C2. Questi valori sono tendenzialmente maggiori a quelli che in letteratura sono stati osservati nella trasformazione biologica da compostaggio (Song et al., 2014). Questo conferma il concomitante e contrario andamento del C.O. e N.

In termini assoluti, il rapporto C/N è risultato essere inferiore a 14 in tutti i test, con i valori inferiori osservati per le matrici provenienti dalla FORSU e dall'impianto di compostaggio (≤ 11). Valori leggermente più alti sono stati osservati per le matrici contenenti organico selezionato, comunque inferiori a 12 per C4 e $\leq 13,5$ per C5. In questo contesto, occorre sottolineare che già in passato Padmavatiamma et al. (2008) riportava che un rapporto C/N < 20 indichi una maturità accettabile nel compost finito, ma un rapporto 15 è preferito per l'applicazione agronomica.

Pertanto, il rapporto C/N inferiore a 12 indicava che il vermicompost aveva le proprietà preferibili per potenziali applicazioni sul campo (Suthar, 2010).

mente). Un andamento simile è stato osservato per il fosforo (P) anche se, data l'esigua concentrazione di partenza, il risultato dell'aumento % sembra più marcato (valori di concentrazione anche 8-9 volte supe-

3.3. Crescita di biomassa

La Figura 4 riporta l'andamento della crescita della massa di lombrichi nelle 5 vermicompostiere.

Alla fine dell'esperimento, la massa totale del lombrico è cresciuta in tutti i test. In particolare, come prevedibile, l'aumento più significativo è stato raggiunto per C5, dove è stata investigata la matrice ottenuta da materiale organico selezionato. In questo caso la massa di lombrico è quasi triplicata.

Nel caso delle matrici intermedie, C2, C3 e C4, l'aumento di massa vermiforme si è attestata a poco più del doppio rispetto al valore iniziale.

Nel caso di C1, invece, la massa di lombrichi è aumentata del solo 87%.

Sicuramente i risultati della crescita sono direttamente collegati alla disponibilità di nutrienti e sostanza organica ma, soprattutto, all'ambiente di crescita iniziale. A tal proposito, le misure intermedie rilevate dopo 2 settimane hanno evidenziato una significativa perdita di biomassa dovuta alle condizioni non idonee della matrice di partenza.

Più specificatamente, i lombrichi "coltivati" nel primo scomparto (lettiera ottimale), uguale per tutti i test, si sono ritrovati a trasformare una matrice molto differente nel secondo scomparto. Alcune matrici, tra l'altro, risultavano molto "complicate" e non idonee allo scenario di crescita ordinario: di conseguenza la maggior parte dei lombrichi è "morta".

La mortalità è stata rilevante per C1 e C2 (65% e 60%) e significativa per C3 (50%). Al contrario in C5 non si è registrata nessuna mortalità. In C4, dove compost e materia organica selezionata sono stati miscelati, la mortalità è stata contenuta a meno del 50%. Probabilmente, la causa di questa iniziale "stabilizzazione" è stata dovuta all'ambiente particolarmente acido e putrescibile della matrice (più accentuato in C1, come mostrato dalla Figura 2c), profondamente differente rispetto alla matrice degradabile ottenuta da miscela di organico e letame della lettiera di accrescimento (primo comparto).

È importante evidenziare, che la biomassa sopravvissuta si è rapidamente adattata generando nuova biomassa vermifuga, adattata alle condizioni ostili

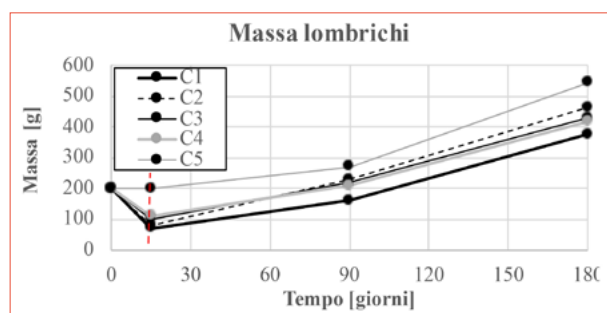


Figura 4. Crescita della massa vermiforme nei 5 test.

di accrescimento, come dimostrano i valori in crescita del 90esimo giorno. Il risultato finale ha permesso di definire una matrice comunque attiva composta da lombrichi adulti e "in fase di sviluppo" (che in alcuni test arrivava anche al 50% del totale) che hanno comunque contribuito alla trasformazione del vermicast ma con risultanze di crescita comunque inferiore a quelli ottenuti in altre sperimentazioni basate su matrici differenti da quella dei rifiuti organici municipali.

È possibile, infine, che la crescita e la necessità di "adattamento iniziale" sia stata influenzata dal bioaccumulo di metalli pesanti nel tessuto degli stessi, come confermano gli studi di Suthar e Singh (2008) e Song et al., (2014), o la specifica fisiologia del metallo (Lukkari et al., 2006).

In particolare, il lombrico può potenzialmente accumulare una certa quantità di sostanze tossiche quali metalli nei loro tessuti, e inevitabilmente introdurre metalli nelle catene alimentari terrestri. Tale aspetto è approfondito nel paragrafo successivo.

3.4. Biodisponibilità di metalli pesanti

Innanzitutto, occorre evidenziare che l'effettivo bioaccumulo dei metalli nel tessuto dei lombrichi è risultato molto inferiore a quello osservato da altri ricercatori (Song et al., 2014). Probabilmente, questo è stato dovuto al fatto che i lombrichi hanno richiesto un tempo di adattamento significativo alle condizioni di lavoro, con tassi di mortalità iniziali abbastanza significativi: inoltre, la crescita netta registrata, alla fine dei sei mesi di osservazioni, è stata inferiore a quelle osservate nella trasformazione di letame animale.

Per questo motivo, parte dei metalli pesanti è stata "concentrata" nel vermicast e nel liquido eluito (e in parte prodotto dalla biomassa), piuttosto che nei lombrichi. In questo contesto la Figura 5, riporta il contenuto di 4 metalli di interesse (Cu, Zn, Ni, Cd) nel vermicast e nel percolato dei 5 test.

La scelta dei metalli investigati, è stata fatta sulla base della caratterizzazione delle matrici iniziali che, a causa della loro origine (rifiuti solidi urbani), contenevano rilevanti concentrazioni di alcuni metalli pesanti rispetto ad altri: questa circostanza era in parte addebitabile alle importanti impurità della matrice di partenza (batterie, plastiche e microplastiche, lattine etc.).

Innanzitutto, occorre evidenziare che la concentrazione di metalli pesanti nelle matrici iniziali erano maggiori nella matrice grezza non lavorata (FORSU, C1), rispetto alle matrici lavorate (pre-compost, C2 e Compost C3). Il contenuto minore è stato registrato nelle matrici che contenevano la materia selezionata pura (C5) o combinata (C4). In ogni caso, in tutti i test, e per tutti i metalli analizzati, i valori di partenza

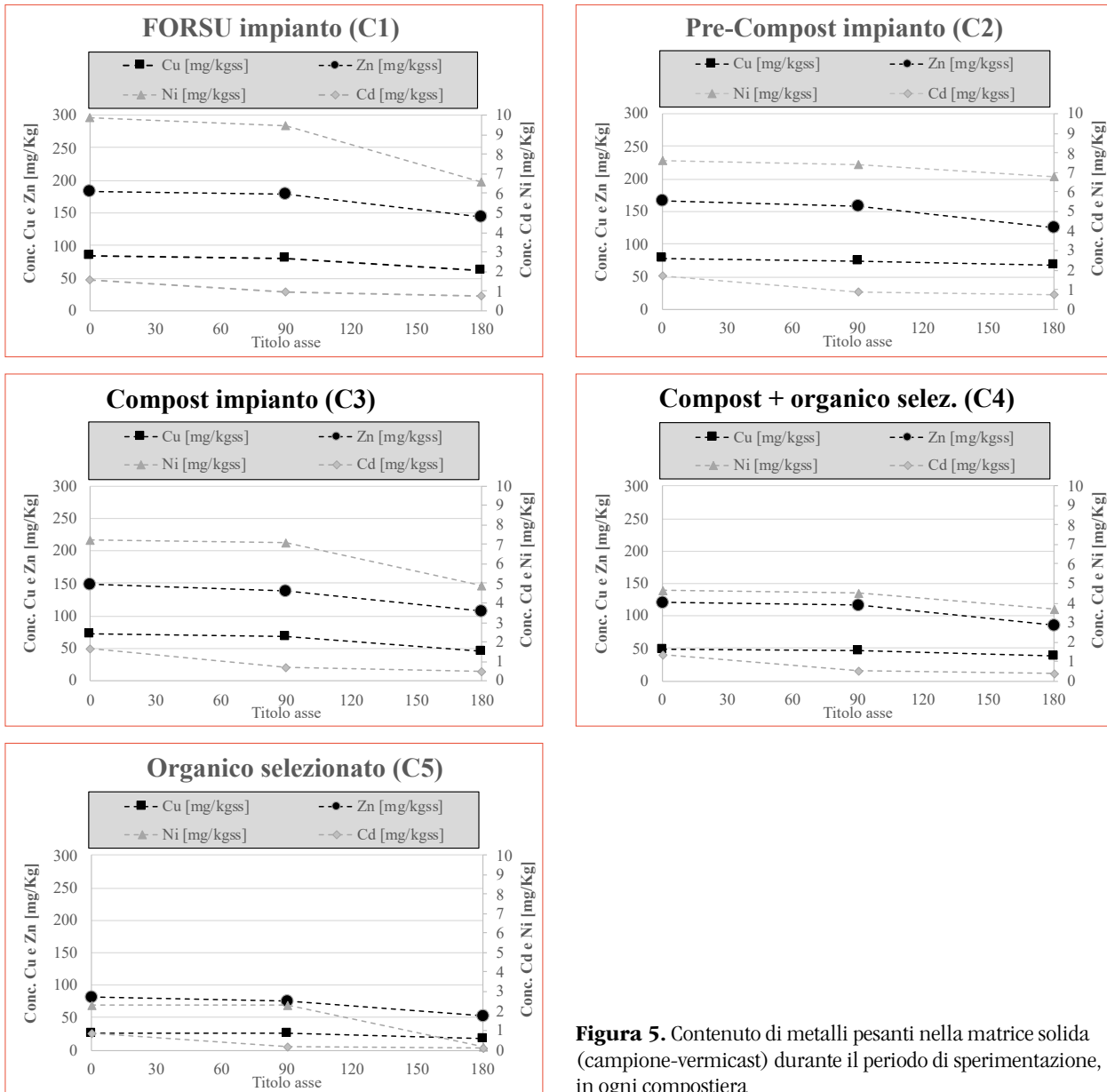


Figura 5. Contenuto di metalli pesanti nella matrice solida (campione-vermicast) durante il periodo di sperimentazione, in ogni compostiera

sono stati ridotti durante il processo di vermicompostaggio. Nel seguito, alcune interessanti osservazioni rilevabili dalla Figura 5. In nessuna matrice, di partenza o finale, si sono registrati valori superiori ai limiti imposti dal D.Lgv 75/2010.

Il Cd ha evidenziato la riduzione più significativa della concentrazione nel vermicast finale, superiore al 50% per C1 e C2, quasi del 70% per C3, e superiore al 70% per C4. La matrice di riferimento relativa a C5, materia organica selezionata, ha evidenziato una riduzione del Cd di circa il 90%.

Ad eccezione del Cd, tutti gli altri metalli pesanti hanno evidenziato una cinetica generale di riduzione prevalentemente concentrata nel secondo periodo del test (tra il giorno 90 e 180).

Come era prevedibile, le concentrazioni di metalli pesanti nel vermicast ottenuto da matrice organica “pura (C5) sono state trascurabili.

Quanto osservato nella matrice solida, è stato confermato dalle concentrazioni di metalli ottenute nel liquido raccolto da ogni compostiera. In Figura 6 sono riportati i volumi e le concentrazioni di metalli nei campioni liquidi di ogni test.

Si osserva che il volume di “percolato” prodotto dalle matrici organiche “domestiche” è risultato nettamente maggiore a quello prelevato dai test condotti con matrici grezze (FORSU in C1) e semilavorate (pre-compost e compost, C2 e C3). Questo è dovuto probabilmente alla differente consistenza/densità delle matrici analizzate e del vermicast sviluppato (Figura 7): in particolare, questo aspetto influenzava il valore di partenza di CIC (capacità idrica di campo) e quindi la percolazione. Dall’altro lato, anche i valori di differente umidità iniziale, discussi in precedenza, avvalorano le differenze volumetriche di raccolta.

In ogni caso, come riportato in Figura 6b le concen-

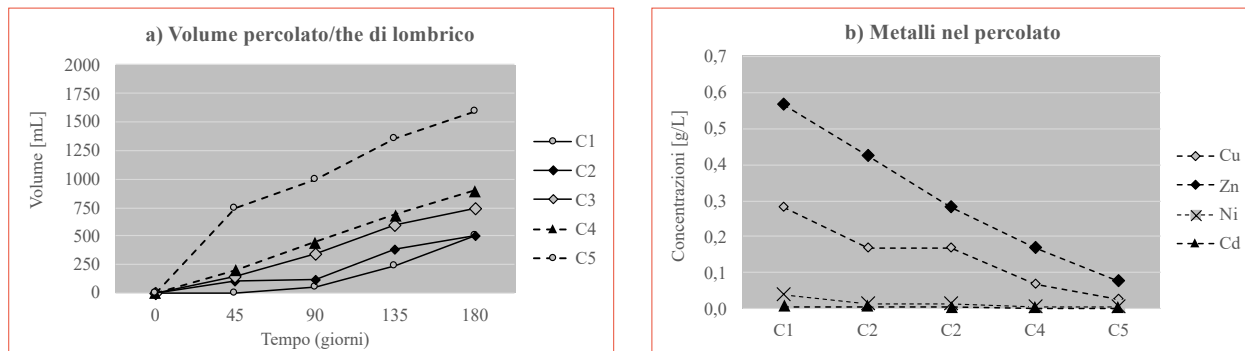


Figura 6. Volume (a) e contenuto di metalli (b) del percolato (the di lombrico) prodotto in ogni test.

trazioni di metalli sono significativamente alte in C1, C2 e C3; risultano nettamente inferiori in C4, e trascurabili in C5. Questo risultato suggerisce che l'eventuale utilizzo di "the di lombrico", come fertilizzante ottenuto da matrici della FORSU (grezze o lavorate) deve essere seriamente valutato/attenzionato se la purezza delle matrici viene inficiata da una raccolta differenziata non ottimale. D'altronde, per lo stesso motivo, nel caso studiato si è preferito definire in "percolato" il liquido raccolto nella vaschetta delle vermicompostiere, in quanto il processo di formazione dominante coinvolge prevalentemente processi di eluizione piuttosto che quelli biologici di formazione dovuti al metabolismo dei lombrichi. Al contrario, il liquido raccolto dai test condotti con Materiale organico selezionato da ambiente domestico, miscelato (C4) o puro (C5), sono

risultati essere in linea con le ricerche condotte in letteratura (Abbassi et al., 2015; Furlong et al., 2017; Gomez-Brand et al., 2021; Hu et al., 2021).

Infine, occorre ribadire che in questa esperienza, il bioaccumulo nel tessuto dei lombrichi è risultato essere secondario rispetto ai processi di eluizione sopra descritti. In generale, si è osservato (Figura 8) che il metallo più bioaccumulabile è risultato essere il Cd, seguito dallo Zn. Al contrario Cu e Ni, sono stati rinvenuti prevalentemente nel liquido eluito piuttosto che nei tessuti dei lombrichi. In generale, i test hanno comunque confermato quanto osservato da Song et al. (2014), per cui i lombrichi contribuiscono a diminuire le concentrazioni di metalli pesanti per mezzo del bioaccumulo di quantità più o meno elevate nei loro tessuti, specialmente per Cu e Zn.

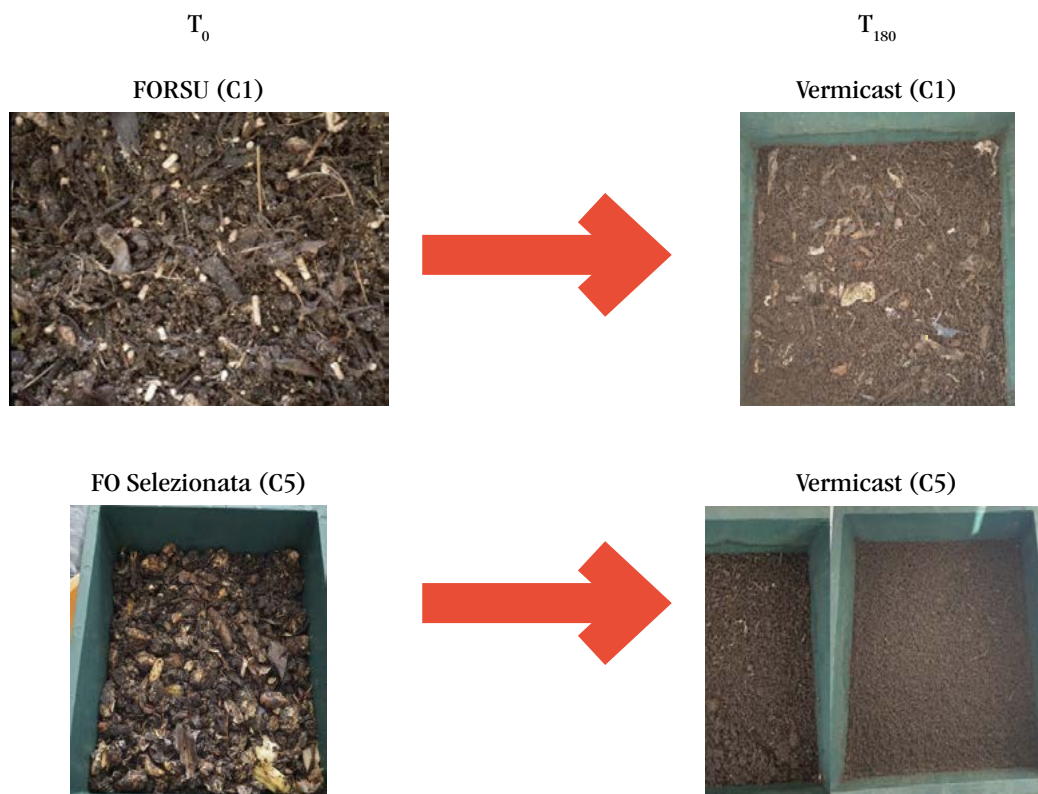


Figura 7. Aspetto delle matrici non trattate e trattate, relative alla FORSU (C1) e all'organico selezionato (C5).

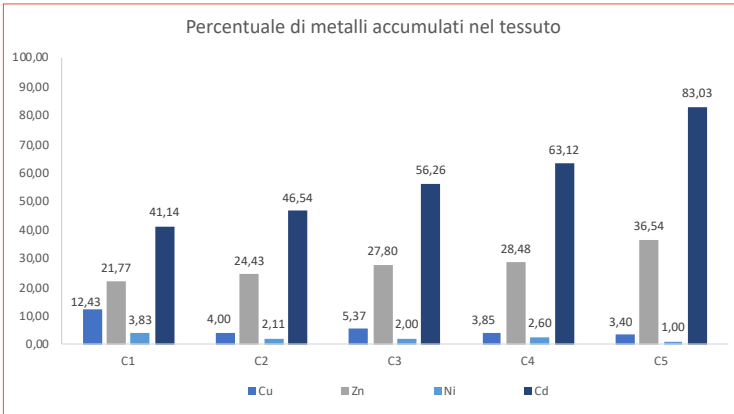


Figura 8. Percentuali di metalli accumulati nei tessuti dei lombrichi nei diversi test.

3.5. Aspetti di approfondimento futuri: prove di fito-accrescimento in ambiente controllato

Le concentrazioni totali di metalli pesanti sono importanti per valutare i potenziali rischi per l'ambiente: in particolare la frazione ancora disponibile nel vermicast ed ancora potenzialmente estraibile rappresenta un potenziale aspetto fitotossico per piante (Zheng et al., 2007). Come osservato in precedenza, rispetto al compost e pre-compostato iniziale, le concentrazioni di metalli estraibili nel prodotto finale sono diminuite significativamente. In generale, le proporzioni delle frazioni disponibili al totale coincidevano quasi "a specchio" con gli andamenti delle concentrazioni dei metalli contenuti nella fase liquida raccolta. La frazione residua può essere considerata come "indisponibile" in quanto concentrata nel tessuto del lombrico, seguito dalla sua stessa attività. Anche altri studi hanno trovato differenti disponibilità di metallo, che comunque diminuisce sempre durante il periodo di vermicompostaggio e maturazione (Walter et al., 2006; Singh e Kalamdhad, 2012, 2013; Song et al., 2014).

La diminuzione della disponibilità di metalli nel vermicompost si verifica per almeno due ragioni. In primo luogo, il vermicompost elaborato dai lombrichi ha generalmente i livelli più elevati di frazione di acido umico, che favorisce l'effetto di assorbimento più forte sulla formazione di metallo-humus, con formazione di stabili complessi specialmente per Cu e Zn (Kang et al., 2011). In secondo luogo, coerentemente con il bioaccumulo nei tessuti dei lombrichi, lo strato epiteliale e il fluido corporeo del lombrico potrebbero assorbire i metalli durante il transito tra i rifiuti organici (Walter et al., 2006; Suthar e Singh, 2008).

In ultima analisi, al fine di valutare il potenziale rischio di trasferimento di metalli pesanti residui dal vermicast alla pianta, una serie di test di "germinazione" dovrebbe essere predisposta per lo studio di questo aspetto specifico. L'argomento non è annoverato tra gli obiettivi della presente memoria: tuttavia, è stata già predisposta una installazione sperimentale che, in futu-

ro, mirerà a testare il vermicast ottenuto dai test C1-C5, sulla base dell'osservazione dei ritmi di crescita e del bio-accumulo di specifici metalli sulle radici, sulle foglie o frutto di differenti specie. Le specie analizzate saranno differenziate per la loro capacità di accumulare metalli a livello radicale (per esempio ricino) o sul frutto/foglie (per esempio tabacco).

4. Conclusioni

Lo studio ha confermato che è possibile ottenere vermicompost da differenti frazioni organiche di rifiuti municipali, grezze o pretrattate.

In generale, il vermicompost ottenibile potrebbe risultare migliore al compost e alle miscele iniziali in termini di proprietà nutritive e attraverso la mineralizzazione rafforzata e umificazione. Sicuramente risulta fondamentale in tal senso, la fase iniziale di adattamento dei lombrichi in contesti di crescita tendenzialmente più ostili, che possono comportare la mortalità degli stessi.

Di contro, le matrici trasformate devono essere opportunamente caratterizzate, di volta in volta, per il contenuto di metalli. Sebbene le concentrazioni più alte di metalli pesanti siano comunque risultate inferiori al di sotto dei valori soglia consentiti per il compost, questo aspetto non è "scontato" per il percolato/the di lombrico ottenuto.

In particolare, la disponibilità di metalli pesanti nel vermicompost risulta essere inferiore rispetto alle matrici di partenza e al compost ottenuto da impianto: il lombrico facilita la loro trasformazione in frazione indisponibile attraverso il bioaccumulo e la stabilizzazione associata all'humus.

Quindi, la tecnologia di vermicompostaggio potrebbe amplificare la qualità dei nutrienti rispetto al compost tradizionale (e dunque il prodotto finale potrebbe essere considerato un ammendante più efficace) e può potenzialmente mitigare il rischio ambientale dei metalli pesanti per lo smaltimento dei rifiuti organici solidi. In ogni caso, la ricerca futura dovrebbe valutare gli impatti a lungo termine dell'applicazione sul terreno. ■

Riferimenti bibliografici

- Abbasi S.A., Nayeem-Shah M., Abbasi T. (2015). Vermicomposting of phytomass: limitations of the past approaches and the emerging directions. *Journal of Cleaner Production* 93 (2015), 103-114.
- Adhikary S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: a review. *Agric. Sci.* 3, 905-917.
- Adi A. e Noor, Z. (2009). Waste recycling: utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresour. Technol.* 100, 1027-1030.
- Arancon N.Q., Edwards C.A. (2011). The use of vermicomposts as soil amendments for production of field crops. In: Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L. (Eds.), *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press, Boca Raton, 129-151.
- Corsino S.F., Torregrossa M., Viviani G. (2021). Biomethane production from anaerobic co-digestion of selected organic fraction of municipal solid waste (Ofmsw) with sewage sludge: Effect of the inoculum to substrate ratio (ISR) and mixture composition on process performances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Volume 18, Issue 24, Article number 13048.
- Ebrahimi A., Hashemi H., Eslami H., Fallahzadeh R.A., Khosravi R., Askari R., Ghahramani E. (2018). Kinetics of biogas production and chemical oxygen demand removal from compost leachate in an anaerobic migrating blanket reactor. *J. Environ. Manag.* 206, 707-714.
- Edwards C.A., Norman Q.A., Sherman R. (2011). *Vermiculture Technology, Earthworms, Organic Waste and Environmental Management*. CRC Press, 17-19.
- Eslami H., Ehrampoush M.H., Esmaeili A., Ebrahimi A.A., Salmani M.H., Ghaneian M.T., Falahzadeh H. (2018). Efficient photocatalytic oxidation of arsenite from contaminated water by Fe₂O₃-Mn₂O₃ nanocomposite under UVA radiation and process optimization with experimental design. *Chemosphere* 207, 303-312.
- Feller C., Brown G.G., Blanchart E., Deleporte P., Cheryanskii S.S. (2003). Charles Darwin, earthworms and natural sciences: various lessons from past to future. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99, 29-49.
- Furlong C., Rajapaksha N.S., Butt K.R., Gibson W.T. (2017). Is composting worm availability the main barrier to large-scale adoption of worm-based organic waste processing technologies? *Journal of Cleaner Production* 164, 1026-1033.
- García-Sánchez M., Tausnerova H., Hanc A., Tlustos P. (2017). Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuous-feeding system: changes in chemical and biological parameters. *Waste Manag.* 62, 33-42.
- Gomez-Brand M., Martínez-Cordeiro H., Domínguez J. (2021). Changes in the nutrient dynamics and microbiological properties of grape marc in a continuous-feeding vermicomposting system. *Waste Management* 135, 1-10.
- Gupta R., Garg V. (2008). Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. *J. Hazard. Mater.* 153, 1023-1030.
- Hait S., Tare V. (2012). Transformation and availability of nutrients and heavy metals during integrated composting-vermicomposting of sewage sludges. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 79, 214-224.
- Hu X., Zhang T., Tian G., Zhang L., Bian B. (2021). Pilot-scale vermicomposting of sewage sludge mixed with mature vermicompost using earthworm reactor of frame composite structure. *Science of the Total Environment* 767 (2021) 144217.
- Kang J., Zhang Z., Wang J.J. (2011). Influence of humic substances on bioavailability of Cu and Zn during sewage sludge composting. *Bioresour. Technol.* 102, 8022-8026.
- Khwairakpam M. e Bhargava R. (2009). Vermitechnology for sewage sludge recycling. *J. Hazard. Mater.* 161, 948-954.
- Kumar V.V., Shanmugaprasanth M., Aravind J., Namasivayam S.K.R. (2012). Pilot scale study of efficient vermicomposting of agro-industrial wastes. *Environ. Technol.* 33, 975-981.
- Lazcano C., Gomez-Brand M., Domínguez J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* 72, 1013-1019.
- Lim S.L., Lee L.H., Wu T.Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *J. Clean. Prod.* 111, 262-278.
- Lukkari T., Teno S., Väisänen A., Haimi J. (2006). Effects of earthworms on decomposition and metal availability in contaminated soil: microcosm studies of populations with different exposure histories. *Soil Biol. Biochem.* 38, 359-370.
- Ngo P.T., Rumpel C., Dignac M.F., Billou D., Duc T.T., Jouquet P. (2011). Transformation of buffalo manure

- by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils. *Ecol. Eng.* 37, 269–276.
- Oluseyi E.E., Ewemoje T., Adedeji A. (2016). Comparative analysis of pit composting and vermicomposting in a tropical environment. *Agric. Biosyst. Eng.* 731, 39757.
 - Padmavathiamma P.K., Li L.Y., Kumari U.R. (2008). An experimental study of vermibio-waste composting for agricultural soil improvement. *Bioresour. Technol.* 99, 1672–1681.
 - Pigatin L.B.F., Atoloye I.A., Obikoya O.A., Borsato A.V., Rezende M.O.O. (2016). Chemical study of vermicomposted agroindustrial wastes. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 5, 55–63.
 - Pramanik P. e Chung, Y.R. (2011). Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: documentation of cellulase isozymes in vermicompost. *Waste Manag.* 31, 1169–1175.
 - Qian X., Shen G., Wang Z., Guo C., Liu Y., Lei Z., Zhang Z. (2014). Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system. *Waste Manag.* 34, 530–535.
 - Rupani P.F., Embrandiri A., Ibrahim M.H., Shahadat M., Hansen S.B., Mansor N.N.A. (2017). Bioremediation of palm industry wastes using vermicomposting technology: its environmental application as green fertilizer. *3 Biotech* 7, 155.
 - Sanchez-Monedero M.A., Serrami N., Civantos C.G.-O., Fernandez-Hernandez A., Roig A. (2010). Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere* 81, 18–25.
 - Singh J., Kalamdhad A.S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresour. Technol.* 124, 169–179.
 - Singh J., Kalamdhad A.S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresour. Technol.* 124, 169–179.
 - Singh J., Kalamdhad A.S. (2013). Assessment of bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of green waste (Water hyacinth). *Ecol. Eng.* 52, 59–69.
 - Song X., Liu N., Wu D., Qi L., Ye C., Jiao J., Hu F. (2014). Heavy metal and nutrient changes during vermicomposting animal manure spiked with mushroom residues. *Waste Management* 34 (2014) 1977–1983.
 - Suthar S., 2010. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology. *Ecol. Eng.* 36, 1028–1036.
 - Suthar S., Singh S. (2008). Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry. *Sci. Total. Environ.* 394, 237–243.
 - Suthar S. e Singh S. (2008). Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry. *Sci. Total. Environ.* 394, 237–243.
 - Tauseef S.M., Abbasi T., Banupriya D., Vaishnavi V., Abbasi S.A. (2013). HEVSPAR: a novel vermireactor system for treating paper waste. *Off. J. Pat. Off.* 24, 12726.
 - Thiruneelakandan R. e Subbulakshmi G. (2014). Vermicomposting: a superlative for soil, plant, and environment. *Int J Innov Res Sci Engg Technol* 3, 930e938. Available online at: <http://www.rroij.com/peer-reviewed/vermicomposting-a-superlative-for-soil-plantand-environment-51236.html>
 - Violante P. (2000). *Metodi di analisi chimica del suolo*. Editore: Franco Angeli Collana: *Metodi analitici per l'agricoltura* Data di Pubblicazione: 1 luglio 2000 ISBN: 8846422406.
 - Walter I., Martinez F., Cala V. (2006). Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environ. Pollut.* 139, 507–514.
 - Wong J. e Selvam A. (2006). Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere* 63, 980–986.
 - Yadav A. e Garg, V., 2011. Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. *Bioresour. Technol.* 102, 2874–2880.
 - Yadav K.D., Tare V., Ahammed M.M. (2010). Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Manag.* 30, 50–56.
 - Zheng G.D., Gao D., Chen T.B., Luo W. (2007). Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting. *J. Hazard. Mater.* 142, 216–221.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare l'azienda CONITALO (CONSORZIO ITALIANO ALLEVATORI DI LOMBRICHI) per il continuo supporto e i suggerimenti nella gestione delle vermicompostiere e dei lombrichi inoculati.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2023 è sostenuta da:

