

# ANALISI SPERIMENTALE SULLA DISINTEGRAZIONE IN PROVE DI COMPOSTAGGIO DI VASCHEE A BASE CARTA PER IL CIBO D'ASPORTO

Floriana Fava\*, Giovanni Dolci, Valeria Venturelli, Mario Grosso

Politecnico di Milano, DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Sez. Ambientale

## Sommario

La frazione organica è in Italia la più rilevante tra i materiali raccolti per via differenziata. Oltre al rifiuto alimentare e al verde (per lo più scarti di potatura), si rileva anche una certa quantità di frazioni cellulosiche (2,5%) come tovaglioli e stoviglie. Questo studio si pone l'obiettivo di valutare la disintegrazione in condizioni aerobiche di quattro imballaggi a base carta utilizzati per confezionare il cibo d'asporto. Sono state analizzate due vaschette in cartoncino ondulato, una in cartoncino con accoppiato un film in acido polilattico (PLA) e una vaschetta con coperchio realizzati in cartoncino sottoposto a un trattamento barriera. Le prove sono state svolte riproducendo, dove possibile, le condizioni presenti negli impianti di compostaggio, prendendo come riferimento la norma europea EN 14045:2003, volta a valutare la disintegrazione di imballaggi in prove di compostaggio in condizioni controllate su scala pilota. In particolare, le vaschette sono state tagliate in pezzi quadrati di lato 5 cm e sottoposte a compostaggio insieme a rifiuto alimentare, inoculo e materiale strutturante. Per renderne possibile il riconoscimento durante la prova, ogni pezzo è stato inserito all'interno di una sottile rete in plastica. Le quattro vaschette hanno mostrato comportamenti differenti. Le due realizzate in sola carta sono risultate disintegrate e indistinguibili dal compost già dopo le prime quattro settimane. La vaschetta in cartoncino con accoppiato il film in PLA ha invece mostrato limitate variazioni nella struttura dei pezzi inseriti al termine delle prime quattro settimane di prova. Dopo otto settimane, la perdita in peso media dei pezzi inseriti è cresciuta fino al 75%. Infine, la vaschetta con coperchio (con trattamento barriera) ha mostrato una struttura integra dopo quattro settimane, distinguibile dopo otto settimane e, solamente dopo dodici settimane, il livello di disintegrazione è risultato comparabile a quello degli altri manufatti analizzati.

**Parole chiave:** *compostaggio, degradazione aerobica, carta, bioplastica, imballaggi.*

## EXPERIMENTAL ANALYSIS ON THE DISINTEGRATION OF PAPER BOXES FOR FOOD DELIVERY IN COMPOSTING TESTS

### Abstract

In Italy, the organic fraction is the most relevant among the source separated materials collected with municipal solid waste. In addition to food waste and garden waste, the number of compostable bioplastics and cellulosic fractions (2.5%) are not negligible. In addition to paper products such as napkins, kitchen paper and tableware, the cellulosic fraction also includes a growing share of products for catering and food delivery. The use of these items has been growing rapidly, especially since the recent pandemic situation. On the market there are products made of paper only, with paper subjected to barrier treatments or paper coupled with bioplastic. According to the Italian legislation, products certified compostable compliant to the European standards EN 13432:2002 and EN 14995:2007 must be conferred with organic waste when dirty. Although the tests included in these standards allow for simple execution and replicability at laboratory scale, they are not representative of the management of the organic waste in industrial composting plants. Accordingly, this study aims at reproducing the conditions of industrial plants. In this regard, the European standard EN 14045:2003 "Evaluation of the disintegration of packaging materials in practical oriented tests under defined composting conditions" has been taken as reference. In particular, the aerobic degradation of four paper-based (EN 13432:2002 certified) packaging for food delivery was assessed. The tested items have different characteristics: two corrugated cardboard boxes, one cartonboard box coupled with a film in polylactic acid (PLA) and a cartonboard box (with a lid) subjected to a barrier treatment for fats and humidity. Before the tests, the boxes were cut into square pieces with a 5 cm side. Each piece was inserted inside a thin plastic net in order to be recognised during the testing period. The pieces were then composted together with food waste, inoculum, and

\* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci, 32. 20133, Milano.  
Tel 02.23996418.  
floriana.fava@mail.polimi.it

Ricevuto il 16-11-2022; Modifiche sostanziali richieste il 20-12-2022;  
Accettazione finale il 9-1-2023

bulking agents. As indicated by the technical standard EN 14045:2003, the tests were performed for twelve weeks, divided between a first phase (*active composting time*) with thermal insulation, aeration and periodic turning and a subsequent maturation phase with only turning and humidity control. To verify the degradation level of the tested boxes, extractions were carried out every four weeks. Each extracted piece was removed from the net, cleaned of compost residues on the surface, dried for 24 hours at ambient temperature, and sieved with a 2 mm mesh. The fraction above 2 mm was then weighed in order to evaluate the weight loss with respect to the piece inserted at the beginning of the test. The four boxes showed different behaviours. The two boxes made of paper only were found to be disintegrated and indistinguishable from the compost already after the first four weeks. Analysing the box with the PLA film, at the end of the first four weeks of testing, limited variations were observed in the structure of the pieces inserted. On the contrary, after eight weeks

the average weight loss of the inserted pieces increased up to 75%. Finally, the box subjected to the barrier treatment and the corresponding lid showed an intact structure after four weeks, still distinguishable after eight weeks. Only after twelve weeks the level of degradation resulted comparable to that of the other boxes. These results are in agreement with the characteristics of the tested boxes. The best results were obtained for the paper-only boxes, a material highly compatible with the composting process. Regarding the box with the PLA film, its slower degradation is reasonably related to the presence of the bioplastic film. For the box subjected to the barrier treatment, although the treatment allows the use of the box in a temperature range wider than the other boxes, it is potentially the cause of its slower degradation.

---

**Keyword:** *composting, aerobic degradation, paper, bioplastic, packaging.*

---

## 1. Introduzione

Tra tutti i materiali raccolti in modo differenziato nei rifiuti solidi urbani in Italia, la frazione organica è quella quantitativamente più rilevante. Nell'anno 2020, 6,6 milioni di tonnellate di rifiuti organici sono stati trattati in impianti di compostaggio o di digestione anaerobica (ISPRA, 2021). La frazione organica è composta principalmente da "rifiuti biodegradabili di cucine e mense" (oltre il 70%) e da "rifiuti biodegradabili di giardini e parchi". Oltre a tali componenti, le bioplastiche compostabili risultano presenti in quantità non trascurabili (83.000 tonnellate all'anno, secondo CIC-COREPLA, 2020). In aggiunta ai sacchetti utilizzati per il conferimento del rifiuto, è infatti in continua crescita la quantità di bioplastica flessibile e rigida ascrivibile a imballaggi e prodotti monouso sostitutivi dei corrispondenti in plastica tradizionale. Parallelamente, nel rifiuto organico, sono presenti frazioni cellulosiche in quantità medie pari al 2,5% (dati 2021 in Bonori, 2022). In aggiunta ai diversi prodotti in carta quali tovaglioli, carta da cucina e stoviglie (63,3%), il 28,3% delle frazioni cellulosiche è costituito da imballaggi (Bonori, 2022) che includono una quota crescente di manufatti utilizzati per il catering e il cibo d'asporto. Tale crescita è stata ulteriormente enfatizzata dalle mutate consuetudini dei cittadini durante e a valle della recente crisi pandemica. L'aumento di carta e bioplastica compostabile è anche legato all'emanazione della Direttiva Europea 904/2019 "Single Use Plastics" contro il *littering* marino, che vieta l'immissione sul mercato di prodotti in plastica monouso per cui sono facilmente disponibili soluzio-

ni alternative adeguate e più sostenibili della plastica tradizionale.

Tra i manufatti con una crescente diffusione si riscontrano le vaschette utilizzate per il cibo d'asporto costituite prevalentemente da carta. In dettaglio, sul mercato sono presenti prodotti realizzati in sola carta, in carta sottoposta a trattamenti barriera o accoppiati in carta e bioplastica. Questi imballaggi, destinati prioritariamente ad essere separati insieme alla carta, se contenenti residui di cibo e certificati compostabili possono essere conferiti con il rifiuto organico.

La normativa italiana riconosce la compostabilità dei manufatti e il loro conferimento con il rifiuto organico in accordo con gli standard europei EN 13432:2002 ed EN 14995:2007. In particolare, lo standard EN 13432:2002 indica i requisiti per gli imballaggi recuperabili mediante compostaggio e biodegradazione, mentre lo standard EN 14995:2007 specifica i requisiti e le procedure per la determinazione della compostabilità dei manufatti diversi dagli imballaggi seguendo un approccio comparabile a quello della norma EN 13432:2002 (EN, 2002; EN, 2007).

In accordo con la norma EN 13432:2002, la biodegradabilità aerobica è valutata con la metodologia della norma tecnica EN ISO 14855:2012 e riconosciuta a tutti i materiali che, se sottoposti a degradazione aerobica ad una temperatura di  $58 \pm 2^\circ\text{C}$  per un periodo massimo di sei mesi, si biodegradano per almeno il 90% (in totale o rispetto alla degradazione di un substrato di riferimento) in termini di conversione del carbonio in anidride carbonica e biomassa. In relazione alla disintegrabilità, la percentuale di materiale resi-

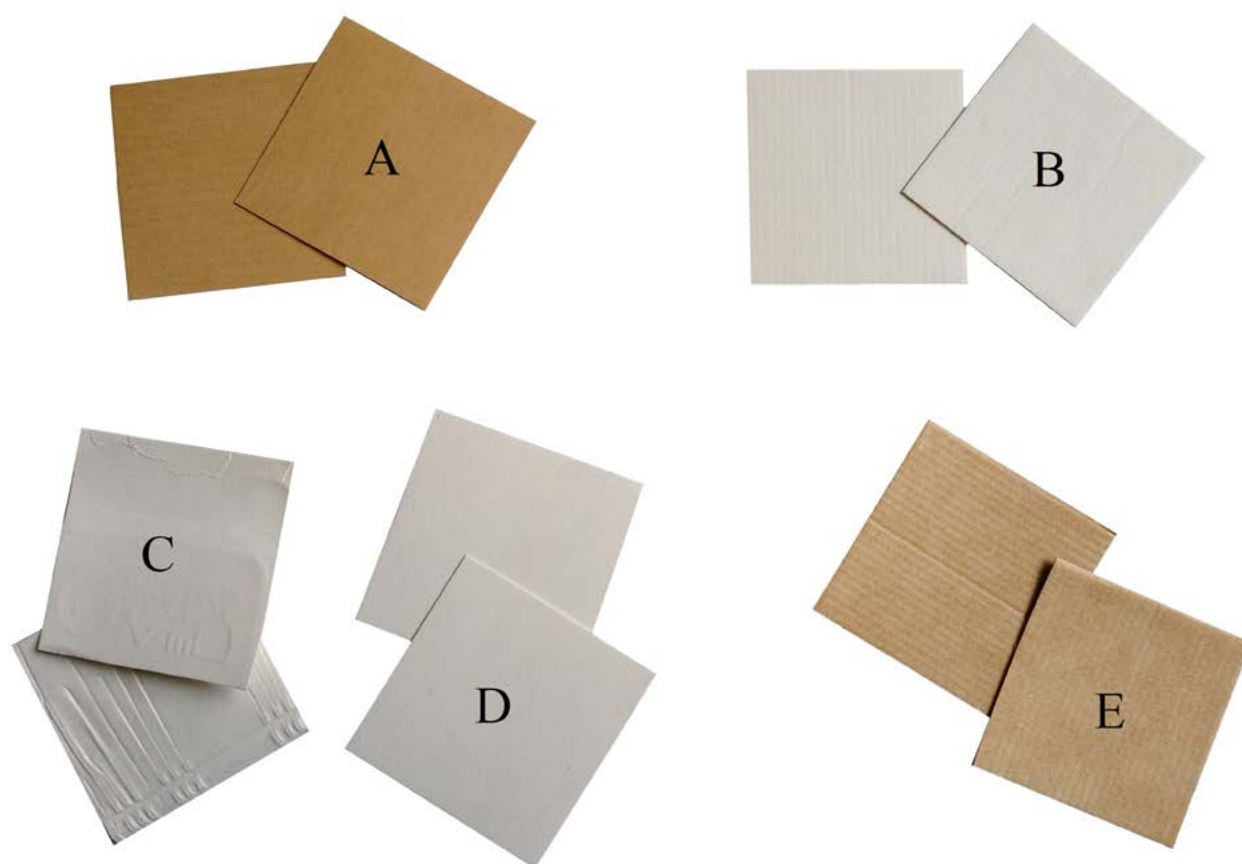
duo con dimensioni  $\geq 2$  mm non deve superare il 10% della massa secca di partenza del materiale analizzato (EN, 2002). Sebbene tali condizioni permettano una semplice esecuzione e la replicabilità di prove a scala di laboratorio, esse non sono rappresentative della gestione del rifiuto organico negli impianti di compostaggio industriale. La prima importante differenza si riscontra in termini di temperatura della prova. Al contrario della normativa tecnica che prevede il mantenimento forzato di condizioni termofile per tutta la durata della prova (fino a 6 mesi), i requisiti per gli impianti, sebbene resi più restrittivi dal nuovo Regolamento UE 2019/1009, richiedono il rispetto di una delle seguenti condizioni: 70°C per almeno 3 giorni, 65°C per almeno 5 giorni, 60°C per almeno 7 giorni o 55°C per almeno 14 giorni, ovvero una fase termofila non necessariamente superiore a due settimane (UE, 2019). Sensibilmente differenti risultano anche i volumi di prova che vengono limitati dalla norma EN 13432:2002 a soli 3 litri. La terza differenza è invece relativa al periodo di prova: tipicamente la durata del processo di compostaggio industriale non supera infatti i tre mesi ma si riscontrano anche processi della durata di soli due mesi.

Questo studio si pone quindi l'obiettivo di riprodurre, per quanto possibile, le condizioni presenti negli impianti di compostaggio per valutare il livello di di-

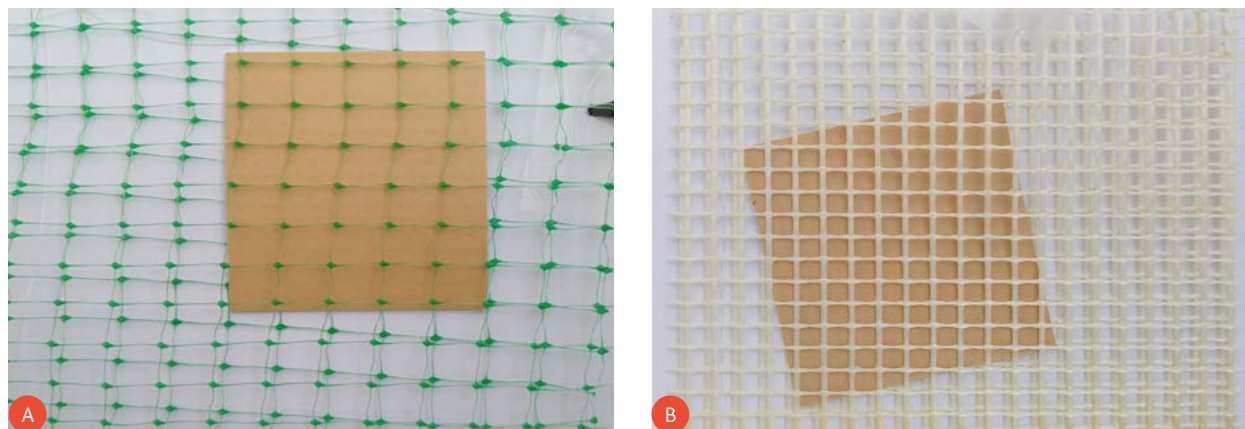
sintegrazione in condizioni aerobiche di quattro vaschette a base carta per il cibo d'asporto certificate EN 13432:2002. La letteratura riporta alcuni esempi di prove di compostaggio a scala pilota per valutare la disintegrazione in condizioni aerobiche di manufatti a base cellulosa (Leppänen et al., 2020; Francou et al., 2008) e bioplastiche (Kawashima et al., 2021; Adamcová et al., 2017; Weng et al., 2010). L'esecuzione delle prove riportate in tali studi è generalmente basata sulle norme tecniche EN ISO 16929:2021, relativa alla determinazione del grado di disintegrazione dei materiali plastici in condizioni di compostaggio definite in una prova su scala pilota (EN, 2021), ed EN 14045:2003, volta a valutare la disintegrazione degli imballaggi in prove di compostaggio in condizioni controllate su scala pilota (EN, 2003). In particolare, in questo lavoro i quattro imballaggi selezionati sono stati analizzati con l'applicazione della norma tecnica EN 14045:2003.

## 2. Materiali e metodi

Nel capitolo si descrivono le modalità di preparazione e caratterizzazione dei substrati impiegati nelle prove di compostaggio (vaschette, rifiuto alimentare, inoculo e materiale strutturante) e le modalità di allestimento e conduzione delle prove stesse.



**Figura 1.** Pezzi di vaschetta analizzati nella prova di compostaggio: vaschetta V1 (A), vaschetta V2 (B), vaschetta V3 (C), coperchio V3C (D), vaschetta V4 (E).



**Figura 2.** Pezzi di vaschetta inseriti nella rete di maglia 12 mm (A) e nella rete di maglia 3 mm (B).

## 2.1. Preparazione e caratterizzazione dei substrati

### 2.1.1. Vaschette

Sono stati analizzati quattro imballaggi disponibili sul mercato, che presentano caratteristiche e possibili utilizzi differenti:

- Vaschetta 1 (V1) – cartoncino (88%) con accoppiato un film in acido polilattico – PLA – (12%) utilizzabile tra  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $+85^{\circ}\text{C}$  (la presenza del film in PLA preclude il suo utilizzo per la cottura degli alimenti).
- Vaschetta 2 (V2) – cartoncino ondulato. Il cartoncino è sottoposto a soli trattamenti fisici per ottenere un effetto barriera. I tre strati sono incollati con amido. È riscaldabile fino a  $220^{\circ}\text{C}$  per un massimo di 30 minuti.
- Vaschetta 3 (V3) – cartoncino sottoposto a un trattamento barriera per grassi e umidità. La vaschetta è dotata di coperchio (V3C) realizzato nello stesso materiale. È utilizzabile tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+215^{\circ}\text{C}$  per un massimo di 40 minuti di cottura.
- Vaschetta 4 (V4) – cartoncino ondulato. Il cartoncino è sottoposto a soli trattamenti fisici per ottenere un effetto barriera. I tre strati sono incollati con amido. È riscaldabile fino a  $220^{\circ}\text{C}$  per un massimo di 60 minuti.

Al fine di essere analizzate nella prova di compostaggio, le vaschette sono state tagliate in pezzi quadrati di lato 5 cm (Figura 1).

Per renderne possibile il riconoscimento durante la prova, ogni pezzo è stato inserito all'interno di una sottile rete in plastica. La metà dei pezzi è stata inserita in reti di maglia 12 mm, i restanti in reti di maglia 3 mm<sup>1</sup>, così da monitorare più efficacemente lo stato di disintegrazione nel corso delle prove (Figura 2).

Per tutte le vaschette sono stati determinati il peso su base umida, lo spessore, i solidi totali (ST), i solidi volatili (SV). ST e SV sono stati determinati secondo la procedura indicata in Standard Methods 2540 (Rice et al., 2017). Lo spessore è stato misurato per mezzo di un calibro digitale.

### 2.1.2. Rifiuto alimentare

Per le prove di compostaggio è stato preparato un rifiuto alimentare sintetico con una composizione basata sui risultati ottenuti da 90 analisi merceologiche della frazione organica ricevuta in tre impianti di compostaggio e in un inceneritore (Tabella 1).

Le diverse frazioni del rifiuto alimentare sono state tagliate fino a raggiungere una dimensione inferiore a 50 mm, in accordo con la norma tecnica EN 14045:2003 e, per conservarne le caratteristiche, congelate a una temperatura di  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Un campione del rifiuto preparato è stato quindi triturato e analizzato in termini di ST, SV e azoto totale Kjeldahl (TKN) seguendo il metodo riportato nella norma tecnica ISO 5663 (ISO, 1984).

È stato quindi determinato il rapporto tra carbonio e azoto totale (C/N), parametro fondamentale per l'allestimento delle prove. In dettaglio, il contenuto di car-

**Tabella 1.** Composizione del rifiuto alimentare.

Frazione	Quantità (%)	
Frutta e verdura	porzione edibile	44
	bucce di mele, patate e carote	15
	bucce di agrumi	8
	altre parti non edibili	19
Carne e pesce	7	
Pane e cereali	3	
Pasta e riso	3	
Latticini e uova	1	

1. Tutti i pezzi sono stati inseriti inizialmente nelle reti con maglia 12 mm. La metà è stata poi trasferita in reti di maglia 3 mm solo al termine della fase termofila per non ostacolare il contatto tra le vaschette e i restanti substrati in tale fase.



**Tabella 2.** Composizione e rapporto C/N (ANPA, 2002) del mix strutturante.

Frazione	Quantità (%)	C/N teorico
Compost misto	47	12
Erba	19	17
Foglie	14	50
Legno medio/grosso	14	0*
Legno fino	6	50-600
Totale	100	19-49

\* Il rapporto C/N del legno medio/grosso è stato ipotizzato pari a zero in quanto non si prevede una degradazione significativa di tale frazione durante le 12 settimane di prova. Tale materiale è stato inserito per garantire la porosità necessaria.

bonio è stato calcolato come il 58% del contenuto di SV (Tatàno et al., 2015). Per una corretta conduzione del processo di compostaggio, è infatti opportuno garantire un rapporto C/N all'interno dell'intervallo 20-30, come indicato dalla norma tecnica EN 14045:2003.

### 2.1.3. Inoculo e materiale strutturante

I componenti del materiale strutturante (erba, foglie, legno medio/grosso, legno fino) sono stati innanzitutto ridotti a dimensioni inferiori a 50 mm e successivamente miscelati con l'inoculo (compost misto) per ottenere un composto omogeneo, denominato in seguito mix strutturante. La composizione del mix strutturante è stata determinata a partire dai rapporti C/N teorici delle diverse componenti (Tabella 2) in modo da ottenere, in aggiunta al rifiuto alimentare, un valore compatibile con le necessità del processo.

Un campione del mix strutturante è stato analizzato in termini di ST, SV e TKN. È stato quindi determinato il rapporto C/N effettivo.

### 2.2. Prove di compostaggio

Le prove di compostaggio sono state effettuate in doppio utilizzando come reattori dei vasi rettangolari in plastica forati sul fondo. Sul fondo di ciascun reattore è stato realizzato un sistema di drenaggio per mezzo di uno strato di cortecce di spessore pari a 10 cm, volto a favorire la fuoriuscita del percolato evitando ristagni alla base del reattore e a permettere il passaggio dell'aria. All'interno di questo strato sono state posizionate due tubazioni forate collegate ad una pompa (caratterizzata da una portata d'aria massima di 275 L/h) per fornire l'aerazione necessaria al sistema. Una rete in plastica a maglia 15 mm è stata posizionata a copertura dello strato di drenaggio, per evitare la dispersione del materiale sperimentale all'interno di tale strato.

**Tabella 3.** Substrati impiegati in ogni reattore per le prove di compostaggio.

Frazione		Quantità	
		(kg)	(%)
Rifiuto alimentare		21,3	75
Mix strutturante	materiale strutturante	3,3	12
	compost misto	3,0	11
Segatura		0,7	2
Totale		28,3	100

Successivamente, si è provveduto al riempimento dei reattori (con un volume operativo di 100 L) con rifiuto alimentare e mix strutturante (Tabella 3)<sup>2</sup>.

Come indicato dalla norma tecnica EN 14045:2003, nel definire le proporzioni tra i substrati si è dosata una quantità di materiale strutturante compresa tra il 10% e il 60% (Tabella 3).

Per quanto riguarda il rapporto C/N, come indicato in Tabella 4, le analisi svolte mostrano valori inferiori a 20 sia per il rifiuto alimentare che per il mix strutturante. È stato quindi necessario aggiungere segatura (C/N = 440) fino ad ottenere un rapporto C/N pari a 21,5, ovvero all'interno dell'intervallo 20-30.

Nella fase di allestimento sono stati quindi inseriti sei pezzi di ciascuna vaschetta in ogni reattore, per un totale di 30 pezzi (quattro vaschette + un coperchio), distribuendoli in modo omogeneo nel volume di prova.

Come richiesto dalla norma tecnica EN 14045:2003, le prove sono state condotte per una durata di dodici settimane, suddivise tra una prima fase *active composting time* (ACT) e una successiva fase di maturazione.

Per la fase ACT è stata prevista una durata di quattro settimane durante le quali, per mezzo di sonde, sono state effettuate misure di temperatura giornaliera in tre differenti punti all'interno del reattore. Si è inoltre provveduto ad effettuare il rivoltamento del materiale una volta a settimana. Ad ogni rivoltamento è stato misurato il pH del materiale di prova (per mezzo di una sonda multiparametrica portatile) in accordo con le modalità indicate dalla norma tecnica EN 14045:2003. Per evitare un'eccessiva evaporazione, durante la fase ACT i reattori sono stati coperti con dei teli di plastica forati (Figura 3).

Per mantenere i reattori termicamente isolati dall'ambiente esterno, in accordo con quanto indicato dalla norma tecnica EN 14045:2003 e similmente

2. Successivamente al riempimento dei reattori si è rapidamente verificata la compattazione del materiale, con una riduzione del volume operativo del 35%.



**Figura 3.** Reattore di prova (fase ACT).

a quanto avviene nelle biocelle degli impianti industriali, sono stati utilizzati dei pannelli di polistirolo di spessore 20 mm, assemblati per realizzare un contenitore esterno.

Durante la successiva fase di maturazione, durata otto settimane, le misure di temperatura sono state effettuate a giorni alterni e il rivoltamento del materiale nei reattori è stato effettuato ogni settimana per la prima metà della fase di maturazione e ogni due settimane successivamente. Il sistema di coibentazione in polistirolo è stato rimosso e, a metà della fase di maturazione, è stato rimosso anche il sistema di aerazione. Infine, il controllo dell'umidità è stato effettuato mediante irrigazioni periodiche.

Per monitorare lo stato di disintegrazione delle vaschette, sono state effettuate estrazioni ogni quattro settimane. Per ogni estrazione si è provveduto a svuotare completamente il materiale presente nel reattore, separando tutti i pezzi di vaschetta presenti al suo interno. Si è provveduto quindi a scegliere in modo casuale due pezzi di ciascuna vaschetta, uno nella rete a maglia 12 mm e l'altro nella rete a

maglia 3 mm (Figura 4). I residui di ciascun pezzo sono stati rimossi dalle reti, puliti dal compost adesivo alla superficie, essiccati per 24 ore a temperatura ambiente e setacciati con maglia 2 mm. La frazione superiore a 2 mm è stata quindi pesata per valutare la perdita in peso rispetto al pezzo inserito all'inizio della prova. Durante la seconda e la terza estrazione è stata inoltre valutata l'efficacia del processo mediante un bilancio di massa considerando gli input (substrati e acqua) e gli output del processo (compost e percolato).

### 3. Risultati e discussione

#### 3.1. Caratterizzazione dei substrati

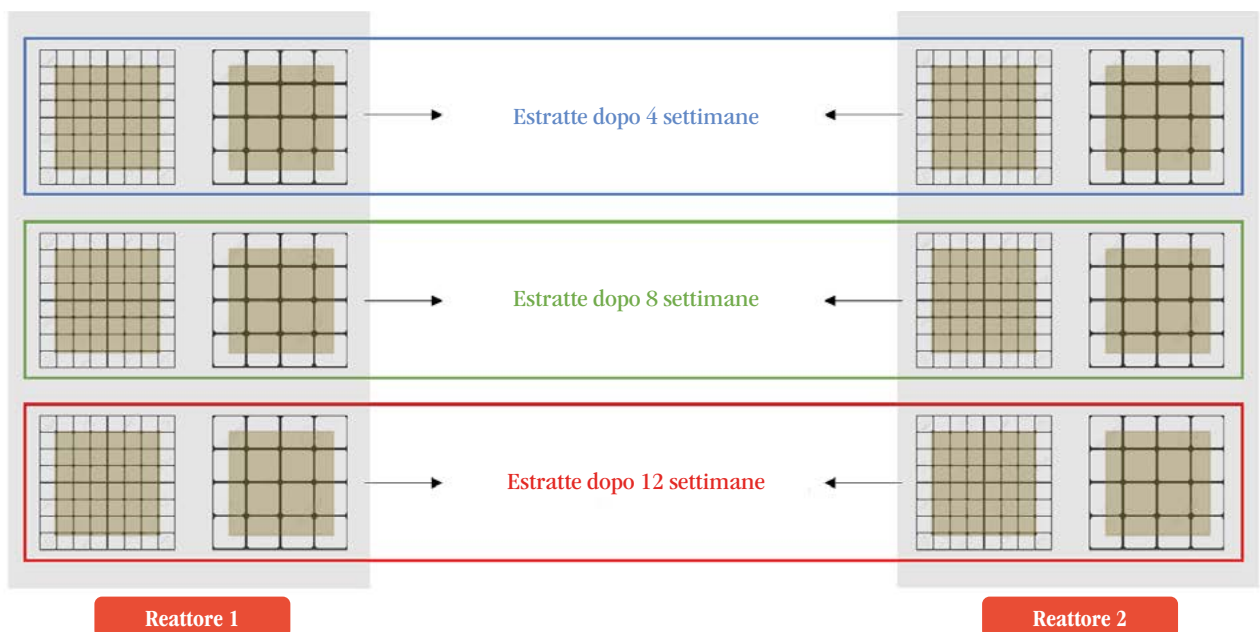
La Tabella 4 riassume i risultati della caratterizzazione dei substrati impiegati nelle prove (vaschette, rifiuto alimentare e mix strutturante).

#### 3.2. Prove di compostaggio

In Tabella 5 è riportato il bilancio di massa per ciascuno dei reattori al termine delle prime otto settimane e alla conclusione della prova. In dettaglio sono stati considerati:

- il materiale compostabile introdotto all'inizio della prova;
- l'acqua aggiunta periodicamente durante la fase di maturazione;
- il compost prodotto;
- il percolato derivante dall'umidità del rifiuto e dall'acqua dosata durante la fase di maturazione.

In corrispondenza della seconda estrazione e al termine della prova è stata quindi valutata la perdita in peso del sistema dovuta al processo di degradazione e all'evaporazione dell'umidità.



**Figura 4.** Procedura di estrazione dei pezzi di ciascuna delle vaschette analizzate

**Tabella 4.** Risultati della caratterizzazione dei substrati.

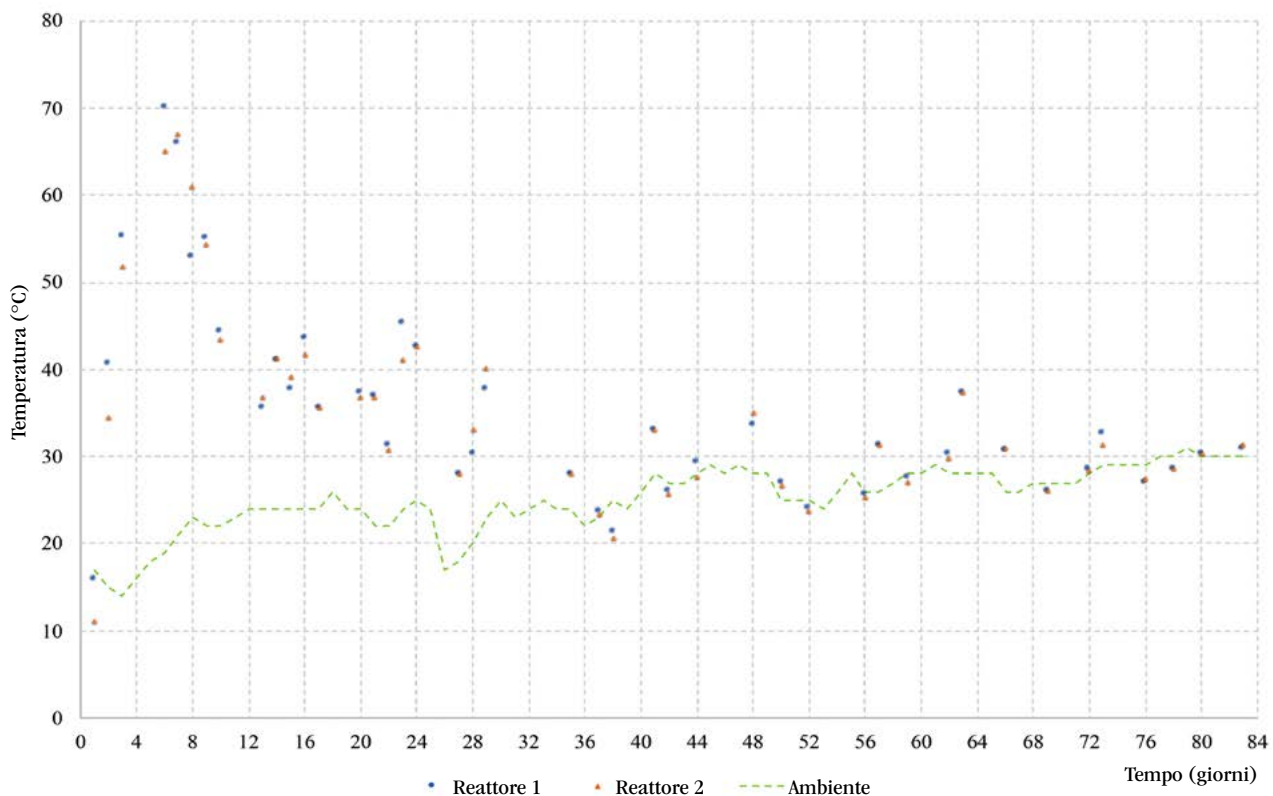
Substrato	Peso su base umida (g)	Spessore (mm)	ST (g/kg)	SV (g/kg)	TKN (gN/kg)	C/N
V1	21,1 ± 0,2	0,40 ± 0,01	935 ± 4	874 ± 19	-	-
V2	47,6 ± 0,4	0,59 ± 0,08	926 ± 8	861 ± 33	-	-
V3	12,8 ± 0,1	0,43 ± 0,04	936 ± 1	862 ± 8	-	-
V3C	7,48 ± 0,05	0,42 ± 0,01	939 ± 3	866 ± 3	-	-
V4	20,2 ± 0,2	0,66 ± 0,01	932 ± 1	873 ± 27	-	-
Rifiuto alimentare	-	-	162 ± 4	146 ± 6	4,75	17,8
Mix strutturante	-	-	439 ± 28	314 ± 1	9,80	18,6

**Tabella 5.** Bilancio di massa del processo di compostaggio al termine delle prime otto settimane e alla conclusione della prova.

Substrato/Prodotto		Seconda estrazione (8 settimane)		Terza estrazione (12 settimane)	
		Reattore 1	Reattore 2	Reattore 1	Reattore 2
Ingresso	Materiale compostabile (kg)	28,3	28,3	28,3	28,3
	Acqua (kg)	7,5	7,5	25,0	25,5
Uscita	Compost (kg)	9,3	9,0	8,9	8,7
	Percolato (kg)	2,1	2,1	5,7	5,7
Perdita in peso (%)		68,1	68,8	72,8	73,2

Le perdite in peso riscontrate dopo le prime otto settimane e al termine della prova evidenziano l'efficacia del processo. Tali valori risultano infatti paragonabili a quelli riscontrati in sette impianti di compostag-

gio alimentati esclusivamente o prevalentemente con rifiuto alimentare che mostrano in media perdite di processo del 73% (Zhang and Matsuto, 2011). In merito ai requisiti di temperatura da verificare durante la

**Figura 5.** Andamento delle temperature nei due reattori e della temperatura ambiente media giornaliera durante il corso della prova.

sperimentazione, la norma 14045:2003 richiede il rispetto delle seguenti condizioni:

- temperatura inferiore a 75°C durante tutta la durata della prova;
- temperatura superiore a 60°C per almeno una settimana;
- temperatura superiore a 40°C per almeno quattro settimane consecutive.

La Figura 5 riporta l'andamento della temperatura nei due reattori nel corso della prova.

Nelle prove, all'inizio della fase ACT (tra il terzo e il nono giorno della prova) è stata raggiunta una temperatura media di 61°C per il reattore 1 e 59°C per il reattore 2, mantenendo comunque una temperatura superiore a 60°C per cinque giorni consecutivi e una temperatura massima pari a 70°C il settimo giorno.

Nella prosecuzione delle prove si è potuto riscontrare una temperatura superiore a 40°C per 15 giorni consecutivi e superiore a 35°C per 24 giorni consecutivi. Sebbene il requisito di una temperatura superiore a 40°C per almeno quattro settimane consecutive non sia stato rispettato, si sottolinea che tali vincoli non sono richiesti negli impianti industriali che, come indicato al Capitolo 1, richiedono esclusivamente il rispetto di almeno una delle seguenti condizioni: 70°C per almeno tre giorni, 65°C per almeno cinque giorni, 60°C per almeno sette giorni o 55°C per almeno quattordici giorni. Relativamente al pH del materiale sottoposto a compostaggio, per tutto lo svolgimento della prova sono stati riscontrati valori maggiori di 5, come richiesto dalla norma tecnica EN 14045:2003. Al termine del periodo di prova il pH del compost ottenuto è risultato pari a 8,4 per il reattore 1 e 8,2 per il reattore 2, rispettando il requisito (pH maggiore di 7).

### 3.2.1 Disintegrazione delle vaschette

Esaminando il livello di disintegrazione delle vaschette analizzate, la Figura 6 mostra, per ciascuna delle tre estrazioni, i pezzi estratti dalle reti, puliti dai residui di compost ed essiccati per 24 ore a temperatura ambiente. L'assenza del campione indica che non sono stati riscontrati residui all'interno della rete. Confrontando ciascuna estrazione non si osservano rilevanti differenze tra i pezzi inseriti nelle reti a maglia larga e quelli inseriti nelle reti a maglia fine<sup>3</sup>. La Tabella 6 riporta inoltre il livello qualitativo di disintegrazione delle vaschette analizzate nel corso della prova.

Analizzando la vaschetta V1, si osservano limitate variazioni nella struttura dei pezzi inseriti al termine delle prime quattro settimane di prova. Infatti, considerando la sola frazione superiore a 2 mm, le perdite in peso rispetto ai pezzi inizialmente inseriti risultano in media pari al 16%<sup>4</sup>. Al contrario, dopo otto settimane la perdita in peso media cresce fino al 75%, come confermato dallo stato fisico dei residui (Figura 6).

Esaminando le vaschette V2 e V4, esse risultano invece disintegrate e indistinguibili dal compost già alla prima estrazione.

Infine, la vaschetta V3 e il coperchio V3C mostrano una struttura integra dopo quattro settimane e ancora distinguibile dopo otto settimane. Le perdite in peso (21% per entrambe le componenti dopo quattro settimane e 22% e 10% dopo otto settimane rispettivamente per V3 e V3C) confermano tali osservazioni. Il maggior livello di disintegrazione dopo dodici settimane (Figura 6) è confermato dai valori crescenti di perdite in peso pari al 68% e 35% rispettivamente per V3 e V3C.

Tali risultati paiono coerenti con le caratteristiche delle vaschette analizzate. I migliori risultati sono stati ottenuti per le vaschette in sola carta (V2 e V4), materiale altamente compatibile con il processo di compostaggio. Lopez Alvarez et al. (2009) hanno infatti verificato che la presenza di carta in proporzioni inferiori al 27% in peso secco non ha effetti avversi sul processo. Francou et al. (2008) indicano che un contenuto di carta o cartone compreso tra il 20% e il 40% permette una veloce stabilizzazione della materia organica nel processo di compostaggio; al contrario, quantità superiori al 50% influenzano negativamente il processo. Studi effettuati da De Wilde et al. (1996) hanno inoltre confrontato il compostaggio di due tipologie di rifiuto organico contenenti rispettivamente il 16% e il 2% di carta. Una quantità maggiore di carta ha permesso un miglioramento del processo con un più facile controllo dell'umidità e del pH e una migliore aerazione, ottenendo un compost di qualità paragonabile a quello ottenuto con una quantità di carta inferiore.

In merito alla vaschetta V1, la sua più lenta disintegrazione è ragionevolmente associata alla presenza del film in PLA. Narancic et al. (2018) evidenziano come per alcune bioplastiche, tra cui il PLA e alcune sue miscele, sono stati necessari tempi superiori a 60 giorni a 58°C per raggiungere il 90% della biodegradazio-

3. Esclusivamente per il pezzo di vaschetta 1 estratto dopo otto settimane dal reattore 2 (Figura 6 - D), la rete a maglia più fine potrebbe aver ostacolato il contatto con il materiale da compostare e limitato la disintegrazione del pezzo.

4. Sebbene ritenute rappresentative del livello di disintegrazione, le misure di perdita in peso sono influenzate dalla non completa efficacia della rimozione del compost adeso sulla superficie dei pezzi estratti. La medesima situazione si riscontra per tutte le vaschette analizzate.





**Figura 6.** Pezzi di vaschetta estratti dalla prova di compostaggio: prima estrazione reattore 1 (A) e reattore 2 (B), seconda estrazione reattore 1 (C) e reattore 2 (D), terza estrazione reattore 1 (E) e reattore 2 (F). 1: vaschetta V1, 2: vaschetta V2, 3: vaschetta V3, C: coperchio V3C, 4: vaschetta V4. Per ciascuna vaschetta, il pezzo posizionato a sinistra corrisponde a quello inserito nella rete a maglia 12 mm, il pezzo posizionato a destra corrisponde a quello inserito nella rete a maglia 3 mm.

**Tabella 6.** Livello qualitativo di disintegrazione delle vaschette analizzate nel corso delle prove di compostaggio (0: pezzo integro; 1: pezzo con struttura ancora riconoscibile; 2: pezzo con buona disintegrazione; 3: pezzo completamente disintegrato).

Substrato	Livello di disintegrazione		
	quattro settimane	otto settimane	dodici settimane
V1	0/1	2	3
V2	2/3	3	3
V3	0	1/2	2/3
V3C	0/1	1	2
V4	2/3	3	3

ne della cellulosa. Temperature inferiori (28°C) si sono dimostrate addirittura totalmente inefficaci per la degradazione di tale biopolimero.

Per la vaschetta V3, sebbene il trattamento barriera permetta un intervallo di temperature di utilizzo più ampio delle altre vaschette, esso è potenzialmente causa della sua più lenta disintegrazione. Agli autori non risultano tuttavia disponibili ulteriori informazioni in merito alla tipologia di trattamento barriera.

#### 4. Conclusioni

Nello studio è stata valutata la disintegrazione in condizioni aerobiche di quattro imballaggi a base carta utilizzati per confezionare il cibo d'asporto. Sono state analizzate due vaschette in cartoncino ondulato, una in cartoncino con accoppiato un film in PLA e una vaschetta con coperchio realizzati in cartoncino sottoposto a un trattamento barriera per grassi e umidità.

L'efficacia del processo di compostaggio è risultata differente per i quattro imballaggi. Dopo quattro settimane, le due vaschette realizzate in sola carta sono risultate completamente disintegrate e indistinguibili dal compost. Al contrario, la vaschetta in cartoncino con accoppiato il film in PLA ha mostrato limitate variazioni nella struttura dei pezzi inseriti al termine delle prime quattro settimane di prova, fino a raggiungere una perdita in peso media del 75% dopo otto settimane. Infine, la vaschetta e il corrispondente coperchio sottoposti al trattamento barriera hanno esibito



una struttura integra dopo quattro settimane, ancora distinguibile dopo otto settimane e un livello di disintegrazione comparabile a quello degli altri manufatti analizzati solamente dopo dodici settimane.

Complessivamente, tutte le vaschette analizzate si sono disintegrate efficacemente entro i tre mesi, come previsto dallo standard tecnico EN 14045:2003 e coerentemente con le durate medie del processo di compostaggio industriale. Tuttavia, è rilevante sottolineare come si riscontrino sempre più frequentemente processi di durata inferiore (due mesi) che, in accordo con i risultati ottenuti in questo studio, potrebbero risultare problematici per vaschette con film in bioplastica o trattamenti barriera. ■

#### Riferimenti bibliografici

- Adamcová D., Elbl J., Zloch J., Vaverková M.D., Kintl A., Juříčka D. et al. (2017) Study on the (bio)degradation Process of Bioplastic Materials under Industrial Composting Conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 65(3), 791-798. <https://doi.org/10.11118/actaun201765030791>
- ANPA – Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (2002) Il recupero di sostanza organica dai rifiuti per la produzione di ammendanti di qualità. ANPA, manuali e linee guida 7/2002. ISBN 88-448-0052-7
- Bonori B. (2022) Garantire la qualità del riciclo: indagine sulla presenza di carta nella frazione organica, analisi 2021. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 9 n. 1/2022.
- CIC (Consorzio Italiano Compostatori) – COREPLA (Consorzio nazionale per la raccolta, il riciclo e il recupero degli imballaggi in plastica) (2020)

- Studio CIC-COREPLA, 2020: triplicano le bioplastiche compostabili nella raccolta dell'organico. [https://www.compost.it/wp-content/uploads/2020/07/CS-4-Studio-CIC-COREPLA-2020\\_-raddoppiano-le-bioplastiche-compostabili-nella-raccolta-dell'E2%80%99organico-5.pdf](https://www.compost.it/wp-content/uploads/2020/07/CS-4-Studio-CIC-COREPLA-2020_-raddoppiano-le-bioplastiche-compostabili-nella-raccolta-dell'E2%80%99organico-5.pdf) (consultato a ottobre 2022)
- De Wilde B., Boelens J., De Baere L. (1996) Results of Laboratory and Field Studies on Wastepaper Inclusion in Biowaste in View of Composting. In: de Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B., Papi T. (eds) *The Science of Composting*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1569-5\\_78](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1569-5_78)
  - EN – European Committee for Standardization (2021) European standard EN ISO 16929:2021. Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory-scale test.
  - EN (2007) European standard EN 14995:2007. Plastics – Evaluation of compostability – Test scheme and specifications.
  - EN (2003) European standard EN 14045:2003 Packaging – Evaluation of the disintegration of packaging materials in practical oriented tests under defined composting conditions.
  - EN (2002) European standard EN 13432:2002. Packaging – Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation – Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging.
  - Francou C., Linères M., Derenne S., Le Villio-Poitrenaud M., Houot S. (2008) Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology* 99, 8926-8934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.071>
  - ISO (1984) Technical Standard ISO 5663:1984, Water Quality – Determination of Kjeldahl Nitrogen – Method after Mineralization with Selenium.
  - ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2021) Rapporto rifiuti urbani edizione 2021. [https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/rapporriorifutiurbani\\_ed-2021-n-355-conappendice\\_agg18\\_01\\_2022.pdf](https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/rapporriorifutiurbani_ed-2021-n-355-conappendice_agg18_01_2022.pdf) (consultato a ottobre 2022)
  - Kawashima N., Yagi T., Kojima K. (2021) Pilot-Scale Composting Test of Polylactic Acid for Social Implementation. *Sustainability* 13, 1654. <https://doi.org/10.3390/su13041654>
  - Leppänen I., Vikman M., Harlin A. Orelma H. (2020) Enzymatic Degradation and Pilot-Scale Composting of Cellulose-Based Films with Different Chemical Structures. *Journal of Polymers and the Environment* 28, 458-470. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01621-w>
  - Lopez Alvarez J.V., Aguilar Larrucea M., Arraiza Bermudez P., Leon Chicote B. (2009) Biodegradation of paper waste under controlled composting conditions. *Waste Management* 29(5), 1514-1519. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.025>
  - Narancic T., Verstichel S., Reddy Chaganti S., Morales-Gamez L., Kenny S.T., De Wilde B. et al. (2018) Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution. *Environmental Science & Technology* 52 (18), 10441-10452. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02963>
  - Rice E.W., Baird R.B., Eaton A.D. (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23<sup>rd</sup> Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, D.C., USA.
  - Tatàno F., Pagliaro G., Di Giovanni P., Floriani E., Mangani F. (2015) Biowaste home composting: Experimental process monitoring and quality control. *Waste Management* 38, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.011>
  - UE – Parlamento e Consiglio Europeo (2019) Regolamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 5 giugno 2019 che stabilisce norme relative alla messa a disposizione sul mercato di prodotti fertilizzanti dell'UE, che modifica i regolamenti (CE) n. 1069/2009 e (CE) n. 1107/2009 e che abroga il regolamento (CE) n. 2003/2003.
  - Weng Y-X., Wang Y., Wang X-L., Wang Y-Z. (2010) Biodegradation behavior of PHBV films in a pilot-scale composting condition. *Polymer Testing* 29(5), 579-587. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.04.002>
  - Zhang H. e Matsuto T. (2011) Comparison of mass balance, energy consumption and cost of composting facilities for different types of organic waste. *Waste Management* 31, 416-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.010>

## Ringraziamenti

Si ringrazia il Consorzio Nazionale per il Recupero e Riciclo degli Imballaggi a base Cellulosica (Comieco), che ha finanziato la ricerca.





# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2022 è sostenuta da:

