



CEC
CCA
CCE

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Análisis de las repercusiones del uso de materiales compostables con recubrimientos poliméricos en la calidad de la composta y operaciones de compostaje en Canadá y Estados Unidos



Citar como:

CCA (2026), *Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables. Análisis de las repercusiones del uso de materiales compostables con recubrimientos poliméricos en la calidad de la composta y operaciones de compostaje en Canadá y Estados Unidos*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 91 páginas.

La presente publicación fue elaborada en inglés (versión original) por Eunomia Research and Consulting para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). La información que contiene es responsabilidad de la entidad a cargo de su autoría y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Acerca de las autoras:

Winn Cowman – consultora principal, Eunomia Research and Consulting

Ella Thirroueiz – consultora, Eunomia Research and Consulting

Se permite la reproducción –total o parcial, y en cualquier forma– de este documento, sin previa autorización por parte del Secretariado de la CCA, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso tenga fines educativos y no lucrativos, y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo “Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada”, de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, 2026

ISBN: 978-2-89700-416-3 (versión electrónica)

Traducido del inglés.

Available in English – ISBN: 978-2-89700-414-9 (electronic version)

Disponible en français – ISBN: 978-2-89700-415-6 (version électronique)

Depósito legal: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026

Depósito legal: Library and Archives Canada, 2026

Detalles de la publicación

Categoría del documento: publicación de proyecto

Fecha de publicación: Junio, 2026

Idioma original: Inglés

Procedimientos de revisión y aseguramiento de calidad:

Revisión final de las Partes: Abril, 2026

QA388

Proyecto: Plan Operativo 2021 / Transformación del reciclaje y el manejo de residuos sólidos en América del Norte

Fotografía de portada: *Mujer cultivando en vertical*, por Anna Tarazevich, Pexels

Si desea más información sobre esta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a:

Comisión para la Cooperación Ambiental

1001 boulevard Robert-Bourassa, bureau 1620

Montreal, Quebec, Canadá, H3B 4L4

Tel.: 514.350.4300; fax: 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org

Índice

Siglas, acrónimos y abreviaturas	iii
Sinopsis	vii
Resumen ejecutivo	viii
Agradecimientos	xii
1. Antecedentes	1
1.1 Objetivo del estudio piloto	1
1.2 Proceso del estudio piloto	2
1.3 Calidad de la composta	3
1.4 Repercusiones de carácter operativo	5
1.5 Instalaciones de prueba	6
1.5.1 Método y criterios para la selección de instalaciones	6
1.5.2 Instalación 1: compostaje en pilas estáticas aireadas cubiertas	8
1.5.3 Instalación 2: compostaje en hileras volteadas	10
1.6 Materiales analizados	12
2. Metodología y limitaciones	13
2.1 Metodología del estudio piloto	13
2.1.1 Formulación del método de dosificación	17
2.1.2 Variabilidad entre los sitios de prueba	18
2.2 Limitaciones del estudio piloto	18
3. Principales hallazgos	20
3.1 Repercusiones en la calidad de la composta	20
3.1.1 Propiedades químicas	20
3.1.2 Propiedades biológicas y físicas	29
3.2 Repercusiones en las operaciones de las instalaciones	31
3.3 Resultados de desintegración	38
4. Conclusiones y recomendaciones	47
Referencias bibliográficas	49
Apéndice 1: Método de dosificación	52
Apéndice 2: Registros de datos de las instalaciones	70

Lista de cuadros

Cuadro 1.1: Condiciones favorables para el compostaje.....	6
Cuadro 2.1: Instalación 1 – Cantidades agregadas a la pila LD (dosificación)	14
Cuadro 2.2: Instalación 1 – Cantidades agregadas a la pila HD (dosificación)	15
Cuadro 2.3: Instalación 2 – Cantidades agregadas a la pila LD (dosificación)	15
Cuadro 2.4: Instalación 2 – Cantidades agregadas a la pila HD (dosificación)	16
Cuadro 2.5: Tasas de dosificación basadas en volumen para las pilas de dosis baja y dosis alta en la instalación 1 y la instalación 2 (porcentajes).....	16
Cuadro 2.6: Variabilidad entre los sitios de prueba	18
Cuadro 3.1: Uso recomendado (tipos de suelo) según el índice de nutrientes de la composta.....	27
Cuadro 3.2: Índices de nutrientes de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2.....	28
Cuadro 3.3: Relaciones C/N de la composta terminada y de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, dosis baja y dosis alta de las instalaciones 1 y 2	28
Cuadro 3.4: Contenido de materia orgánica de la composta terminada (porcentaje) en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2, sobre una base de peso seco	29
Cuadro 3.5: Tasas de dosificación de las imágenes representadas en la gráfica 3.10	35
Cuadro 3.6: Comparación entre las tasas de dosificación visualizadas y reales en la instalación 1.....	35
Cuadro 3.7: Comparación entre las tasas de dosificación visualizadas y reales en la instalación 2.....	36
Cuadro 3.8: Tasas de desintegración basadas en peso húmedo	39
Cuadro 3.9: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1	41
Cuadro 3.10: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1.....	43
Cuadro 3.11: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 2	44
Cuadro 3.12: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 2.....	45
Cuadro A1-1: Etapas, tiempos, estimación de mano de obra y horas requeridas del método de prueba por dosificación	53
Cuadro A1-2: Materiales necesarios para el método de dosificación	59
Cuadro A2-3: Registros diarios de temperatura de las pilas en la instalación 1.....	70
Cuadro A2-4: Registros diarios de temperatura de las pilas en la instalación 2.....	73

Cuadro A2-5: Lecturas periódicas de humedad y oxígeno de las pilas en la instalación 1.....	76
---	----

Cuadro A2-6: Lecturas periódicas de humedad y oxígeno de las pilas en la instalación 2.....	76
---	----

Lista de gráficas

Gráfica 1: Fases del proceso del estudio piloto sobre compostaje	ix
Gráfica 1.1: Fases del proceso del estudio piloto sobre compostaje.....	2
Gráfica 1.2: Proceso de compostaje en la instalación 1.....	10
Gráfica 1.3: Proceso de compostaje en la instalación 2.....	12
Gráfica 3.1: PFAS detectadas en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1, y límites de referencia disponibles	22
Gráfica 3.2: PFAS detectadas en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 2, y límites de referencia disponibles	23
Gráfica 3.3: Contenido de humedad de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2.....	24
Gráfica 3.4: Contenido de humedad de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2.....	25
Gráfica 3.5: Niveles de pH de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2	26
Gráfica 3.6: Niveles de pH de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2	26
Gráfica 3.7: Presencia de coliformes fecales en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1	30
Gráfica 3.8: Presencia de salmonela en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1	31
Gráfica 3.9: Ejemplo de acumulación de materiales de envasado compostables en la parte externa de la pila HD de la instalación 1	32
Gráfica 3.10: Clasificación visual de las tasas de dosificación	34
Gráfica 3.11: Pilas de dosis baja (LD) y alta (HD) —izquierda y derecha, respectivamente— de la instalación 1 el día del tamizaje, antes de dar inicio a este proceso.....	36
Gráfica 3.12: Pilas de dosis baja (LD) y alta (HD) —izquierda y derecha, respectivamente— de la instalación 2 el día del tamizaje, antes de dar inicio a este proceso	37
Gráfica 3.13: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1	42
Gráfica 3.14: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1.....	43

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Gráfica 3.15: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 2	44
Gráfica 3.16: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 2	46
Gráfica 3.17: Residuos de vasos con recubrimiento de PLA (izquierda), vasos con doble recubrimiento de PLA (centro) y vasos de fibra con recubrimiento de PLA (derecha) encontrados en la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1	46

Siglas, acrónimos y abreviaturas

µg	microgramo
ASP	[compostaje en] pilas estáticas aireadas (del inglés: <i>aerated static piles</i>)
ASTM	organización internacional de normalización ASTM International (<i>Advancing Standards Transforming Markets</i>)
C/N	relación carbono-nitrógeno
CASP	[compostaje en] pilas estáticas aireadas cubiertas (del inglés: <i>covered aerated static piles</i>)
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CFTP	Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables (<i>Compostable Field Testing Program</i>)
CP	pila de control (del inglés: <i>control pile</i>)
CREF	Compost: Fundación para la Investigación y la Educación sobre Composta (<i>Compost Research and Education Foundation</i>)
EPA	Agencia de Protección Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>), Estados Unidos
EU	Estados Unidos
HD	dosis alta (del inglés: <i>high dose</i>)
IC	intervalo de confianza
kg	kilogramo
LC-MS/MS	cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas en tándem (del inglés: <i>liquid chromatography–tandem mass spectrometry</i>)
LD	dosis baja (del inglés: <i>low dose</i>)
m ³	metro cúbico
NMP	número más probable
PFAS	sustancias per y polifluoroalquiladas (por sus siglas en inglés)
PFBA	ácido perfluorobutanoico (por sus siglas en inglés)
PFOA	ácido perfluorooctanoico (por sus siglas en inglés)
PFPeA	ácido perfluoropentanoico (por sus siglas en inglés)
PFPeS	ácido perfluoropentanosulfónico (por sus siglas en inglés)
PFRP	proceso para la reducción adicional de patógenos (del inglés: <i>process to further reduce pathogens</i>)
PHA	polihidroxialcanoato
PLA	ácido poliláctico (por sus siglas en inglés)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

STA	programa de certificación Sello de Garantía de Evaluación (<i>Seal of Testing Assurance</i>), Estados Unidos
TMECC	método de evaluación para el análisis del proceso de compostaje y de la composta (del inglés: <i>test method for the examination of composting and compost</i>)
TW	[compostaje en] hileras volteadas (del inglés: <i>turned windrows</i>)
yd ³	yarda cúbica

Sinopsis

El presente informe presenta los resultados de un estudio piloto realizado en el marco del proyecto [Transformación del reciclaje y el manejo de residuos sólidos en América del Norte](#) de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), con el propósito de evaluar si los envases alimentarios hechos a base de fibra recubierta con polímeros certificados como compostables pueden procesarse de manera efectiva en instalaciones de compostaje aeróbico ya en pie, sin afectar la calidad del producto final.

Además de analizarse el manejo y procesamiento de dichos materiales en dos instalaciones de compostaje de Estados Unidos entre marzo y julio de 2025, se examinaron los costos adicionales en que se incurrió, los desafíos operativos derivados de la incorporación de los materiales compostables y el grado de desintegración de éstos en la composta obtenida. Las dos instalaciones participantes operan con métodos de compostaje distintos: el de pilas estáticas aireadas cubiertas (CASP, del inglés: *covered aerated static piles*) en un caso y el de hileras volteadas (TW, del inglés: *turned windrow*) en el otro.

El estudio piloto tuvo como objetivo principal comprender las repercusiones que la incorporación de envases alimentarios certificados como compostables tiene tanto en las operaciones de compostaje como en la calidad de la composta.

Resumen ejecutivo

El presente informe se elaboró por encomienda de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) como documento complementario de un conjunto de tres estudios clave realizados en el marco del proyecto [*Transformación del reciclaje y el manejo de residuos sólidos en América del Norte*](#), del Plan Operativo 2021 de la CCA. Llevados a cabo en dos series —una para Canadá y Estados Unidos y otra similar para México—, tales estudios se propusieron evaluar la situación actual del sector del reciclaje de desechos de papel, plástico y bioplásticos procedentes de fuentes residenciales y comerciales, así como las oportunidades para los respectivos mercados de materiales secundarios derivados y su papel en la adopción de una economía circular. Además, se exploraron los enfoques de política y normativos del posconsumo de dichos materiales en cada país, como elementos fundamentales para fomentar un cambio en las prácticas de manejo de residuos y su reciclaje; se identificaron obstáculos al reciclaje, y se formularon recomendaciones que permitan sortear estas barreras y aumentar la circularidad de los materiales, con el consiguiente impulso a la transición hacia una economía circular.

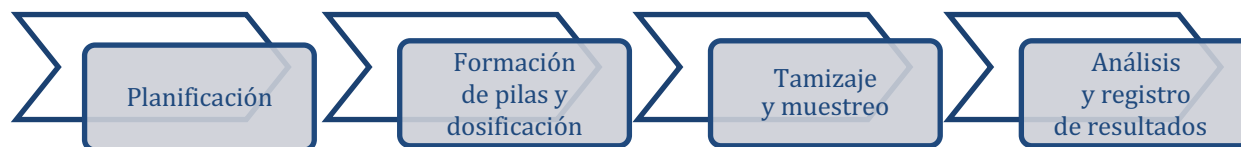
En este contexto, y como parte de una segunda fase del proyecto, representantes de Canadá y Estados Unidos en el comité directivo del mismo acordaron la realización de un estudio piloto en dos instalaciones de compostaje estadounidenses, con el propósito de evaluar si los envases alimentarios fabricados con fibra recubierta con polímeros certificados como compostables pueden procesarse de manera efectiva en instalaciones de compostaje aeróbico ya en pie, sin afectar la calidad del producto final.

Las dos instalaciones seleccionadas para participar en este estudio piloto operan con métodos de compostaje distintos: el de pilas estáticas aireadas cubiertas (CASP, del inglés: *covered aerated static piles*) en un caso y el de hileras volteadas (TW, del inglés: *turned windrow*) en el otro. Estos métodos, al igual que las conclusiones derivadas del estudio piloto, revisten enorme relevancia para ambos países (Canadá y Estados Unidos) y se detallan en el presente informe.

El objetivo principal del estudio piloto, llevado a cabo entre marzo y julio de 2025, consistió en comprender las repercusiones que la incorporación de envases alimentarios certificados como compostables tiene en la calidad de la composta; los desafíos operativos que enfrentan las instalaciones de compostaje al manejar estos materiales, y el grado de desintegración de los mismos en las pilas de compostaje. Para efectos del presente documento, el término “materiales de envasado compostables” (o simplemente “materiales compostables”) se refiere a envases alimentarios hechos de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables.

La selección de las dos instalaciones participantes se realizó con base en criterios operativos definidos por el equipo del proyecto y ambas recibieron acompañamiento a todo lo largo del proceso. En la gráfica a continuación se muestran las fases que el estudio piloto entrañó.

Gráfica 1: Fases del proceso del estudio piloto sobre compostaje



1. *Planificación.* Se seleccionaron las instalaciones de compostaje participantes en la prueba piloto; se obtuvieron los materiales de envasado compostables a utilizar, y se prepararon los procedimientos, metodologías e instalaciones para la realización del estudio piloto.
2. *Formación de pilas y dosificación.* En cada instalación se formaron tres pilas de compostaje: una pila de control (CP, del inglés: *control pile*), sin incorporación de materiales de envasado compostables y utilizada como referente; una pila de “dosis baja” (LD, del inglés: *low dose*), a la que se agregó una proporción reducida de materiales de envasado compostables (5-6 por ciento), y una pila de “dosis alta” (HD, del inglés: *high dose*), con la adición de una proporción mayor de estos materiales (alrededor de 11-12 por ciento). Asimismo, en ambos casos se tomaron muestras de la materia orgánica insumo del proceso (tras formar la mezcla en sitio) para su análisis en laboratorio.
3. *Tamizaje y muestreo.* Una vez concluido el proceso de compostaje en cada pila, se realizó el tamizaje o cribado de la composta terminada y se tomaron muestras tanto del producto final, para analizar su calidad, como de los materiales residuales retenidos en la criba (elementos gruesos), para evaluar su grado de desintegración. Durante esta fase, integrantes del equipo del proyecto estuvieron presentes en ambas instalaciones.
4. *Análisis y registro de resultados.* El análisis de los resultados de laboratorio permitió comprender los efectos de los materiales de envasado compostables en la calidad de la composta y evaluar su grado de desintegración.

Varios de los hallazgos emanados del estudio piloto ameritan la realización de investigaciones ulteriores que permitan comprender plenamente los efectos que los envases alimentarios hechos de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables tienen tanto en la calidad de la composta como en la operación de las instalaciones. En el apartado **Error! Reference source not found.** del informe se resumen y analizan en detalle los principales hallazgos. Cabe señalar que si bien en algunos casos se consideró necesario profundizar en la investigación respecto de algunos hallazgos, ello no se realizó por quedar fuera del alcance del estudio.

Repercusiones en la calidad de la composta como resultado de la presencia de materiales de envasado compostables

En cada una de las dos instalaciones participantes en el estudio piloto se incorporaron materiales de envasado compostables en “dosis” determinadas a dos pilas de compostaje, y se evaluó la calidad de la composta resultante con base en las propiedades químicas, físicas y biológicas del producto terminado de cada pila, además de compararse con una pila de control (a la que no se agregó material de envasado alguno). Como se señaló ya, en la instalación 1 se utiliza un sistema de compostaje CASP, mientras que la instalación 2 emplea el método TW. Cabe precisar que para la

instalación 2 se llevó a cabo un conjunto menos exhaustivo de análisis de laboratorio; por ello, varios de los datos presentados corresponden únicamente a la instalación 1. De forma resumida, los resultados de los análisis realizados muestran lo siguiente:

- Las pruebas biológicas realizadas en la instalación 1 revelaron la presencia de salmonela en las tres pilas, en cantidades que aumentaron en función de la dosis de materiales compostables en la pila, lo que sugiere una posible correlación entre la bacteria y la presencia de materiales de envasado compostables; sin embargo, es preciso investigar más a fondo al respecto para comprender la causa exacta del aumento detectado. Cabe señalar que, debido a una falta de comunicación, las pruebas biológicas solamente se realizaron en la composta de la instalación 1.
- Las pruebas biológicas realizadas en la instalación 1 revelaron también la presencia de coliformes fecales en las tres pilas; sin embargo, las cantidades detectadas fueron más elevadas en la pila de control (CP), por lo que es poco probable que estos hallazgos estén relacionados con materiales de envasado compostables, y sería necesario realizar más investigaciones para determinar la causa exacta de este resultado.
- En ambas instalaciones, la composta final presentó niveles bajos de sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS, por sus siglas en inglés), con concentraciones mayoritariamente por debajo de los límites de referencia vigentes en Canadá y Estados Unidos para suelos. No obstante, en las pilas de control y de dosis alta (CP y HD, respectivamente) de la instalación 2 se detectó ácido perfluorooctanoico (PFOA, por sus siglas en inglés), en concentraciones superiores a las establecidas en los niveles de detección regionales (en inglés: *regional screening levels*, RSLs) de la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency*, EPA) estadounidense. Dado que la concentración más alta de PFOA se observó en la pila de control, es poco probable que la detección de este contaminante esté relacionada con la presencia de materiales de envasado compostables; sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para determinar el origen específico de este resultado.
- En la instalación 1, los niveles de humedad de la composta terminada estuvieron dentro del rango deseable; en cambio, en las tres pilas de la instalación 2 se observaron niveles de humedad bajos en general. Dado que estos valores se encontraron en toda la composta producida en la instalación 2, es poco probable que estén relacionados con la presencia de materiales de envasado compostables, y más bien son el resultado de las condiciones climáticas secas registradas a lo largo de todo el periodo de duración del estudio piloto.
- Los niveles de pH de toda la composta final en ambas instalaciones arrojaron resultados ligeramente alcalinos. Al tratarse de un caso generalizado en todas las pilas estudiadas y no exclusivo de las pilas “dosificadas”, es poco probable que esté relacionado con la presencia de materiales de envasado compostables.
- Los índices de nutrientes registrados indicaron que la composta producida en la instalación 1 era rica en nutrientes y adecuada para una amplia variedad de tipos de suelo, mientras que la composta de la instalación 2 contenía más sales (sodio), probablemente como consecuencia de los bajos niveles de humedad. Sin embargo, al tratarse de un fenómeno común a todas las

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

pilas de la instalación 2 (incluida la de control), es poco probable que este hecho guarde relación con la presencia de materiales de envasado compostables.

La relación carbono-nitrógeno (C/N) de la composta terminada se ubicó dentro de los rangos ideales en las tres pilas de ambas instalaciones. El contenido de materia orgánica osciló entre 68 y 77 por ciento en la instalación 1 y entre 12 y 29 por ciento en la instalación 2, sin que se observaran datos indicativos de que los materiales de envasado compostables afectaran de manera negativa los niveles de materia orgánica.

Repercusiones del manejo de materiales de envasado compostables en las operaciones de las instalaciones

Ambas instalaciones experimentaron la necesidad de mano de obra adicional y desafíos operativos a lo largo de la prueba piloto, lo que se tradujo en un aumento de los costos. Se requirió mano de obra suplementaria para manipular los elementos o fragmentos ligeros de materiales de envasado compostables que se volaban con el viento y tenían que volver a mezclarse en las pilas de composta. Además, en las dos instalaciones, dichos materiales tendían a desplazarse hacia los bordes de las pilas por lo que también se necesitó mano de obra extra para rastrillarlos y volver a mezclarlos en sus respectivas pilas.

Desintegración de materiales compostables

El estudio piloto mostró que la mayoría de los materiales compostables se desintegraron de manera efectiva en las pilas de compostaje a lo largo de los tres a cuatro meses que duró el proceso. Las etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras) se desintegraron por completo en todas las pilas; los envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches también presentaron una descomposición significativa, con tasas de desintegración de entre 83 y 95 por ciento; en cambio, los vasos de fibra recubiertos con ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) y los vasos de papel con recubrimiento —sencillo y doble— de PLA mostraron una desintegración más variable, con valores que oscilaron entre 51 y 95 por ciento. En algunas pilas —en particular la de dosis baja (LD) de la instalación 2— se retuvo una proporción apreciable de estos materiales. En conjunto, los resultados sugieren que, si bien la mayoría de los elementos evaluados se desintegraron de manera efectiva, ciertos productos con recubrimiento de PLA pueden requerir tiempos de compostaje adicionales o condiciones específicas para lograr su plena descomposición.

Agradecimientos

El presente informe fue elaborado por Eunomia Research & Consulting para la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). Las autoras principales desean agradecer al Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables (*Compostable Field Testing Program*, CFTP) por sus valiosas contribuciones a este trabajo.

Por su parte, la CCA desea extender su agradecimiento a las personas de Canadá y Estados Unidos integrantes del comité directivo del proyecto *Transformación del reciclaje y el manejo de residuos sólidos en América del Norte* (Plan Operativo 2021 de la CCA) por su apoyo y compromiso. Asimismo, agradece al personal del Secretariado que colaboró para la realización de este proyecto: Armando Yáñez, titular de la unidad Vida y economías sustentables, Antonia M. Andúgar, líder de proyecto, y Claudia López, asistente; a quienes se encargan de la traducción y de la edición de las publicaciones de la Comisión, y a Michael Wou, diseñador gráfico de Origami Branding, quien colaboró en la finalización del documento.

1. Antecedentes

Elaborado por encomienda de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), el presente informe complementa un conjunto de tres estudios clave realizados en el marco del proyecto *Transformación del reciclaje y el manejo de residuos sólidos en América del Norte*,¹ del Plan Operativo 2021 de la CCA. Tales estudios —llevados a cabo en dos series: una para Canadá y Estados Unidos y otra similar para México— se propusieron evaluar la situación actual del sector del reciclaje de desechos de papel, plástico y bioplásticos procedentes de fuentes residenciales y comerciales, así como las oportunidades para los respectivos mercados de materiales secundarios derivados y su papel en la adopción de una economía circular. Además, se exploraron los enfoques de política y normativos del posconsumo de dichos materiales en cada país, como elementos fundamentales para fomentar un cambio en las prácticas de manejo de residuos y su reciclaje; se identificaron obstáculos al reciclaje, y se formularon recomendaciones que permitan sortear estas barreras y aumentar la circularidad de los materiales, con el consiguiente impulso a la transición hacia una economía circular.

En este contexto, y como parte de una segunda fase del proyecto, representantes de Canadá y Estados Unidos en el comité directivo del mismo acordaron la realización de un estudio piloto en dos instalaciones de compostaje estadounidenses, con el propósito de evaluar si los envases alimentarios fabricados con fibra recubierta con polímeros certificados como compostables pueden procesarse de manera efectiva en instalaciones de compostaje aeróbico ya en pie, sin afectar la calidad del producto final.

Las dos instalaciones seleccionadas para participar en este estudio piloto, llevado a cabo entre marzo y julio de 2025, operan con métodos de compostaje distintos: en una se utiliza el sistema de pilas estáticas aireadas cubiertas (CASP, del inglés: *covered aerated static piles*) y en la otra el de hileras volteadas (TW, del inglés: *turned windrow*). Ambos métodos, al igual que las conclusiones derivadas del estudio piloto, revisten enorme relevancia para los dos países (Canadá y Estados Unidos).

1.1 Objetivo del estudio piloto

Además de determinar si los materiales de envasado alimentario con recubrimiento polimérico certificados como compostables pueden compostarse sin afectar la calidad de la composta producida, el estudio piloto tuvo por objeto evaluar el manejo y procesamiento de dichos materiales en las dos instalaciones participantes, los costos adicionales en que se incurrió y otros desafíos operativos derivados de su incorporación.

Para efectos del presente documento, el término “materiales de envasado compostables” (o simplemente “materiales compostables”) se refiere a envases alimentarios hechos de fibra

¹ Consúltense la página web del proyecto, en: <www.cec.org/es/transformacion-del-reciclaje-y-el-manejo-de-residuos-solidos-en-america-del-norte/>.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

con recubrimientos poliméricos certificados como compostables. Actualmente, las instalaciones de compostaje en Canadá y Estados Unidos muestran cierta cautela en lo concerniente a aceptar materiales de envasado certificados como compostables; tales reservas responden a diversas razones, entre las que figuran:

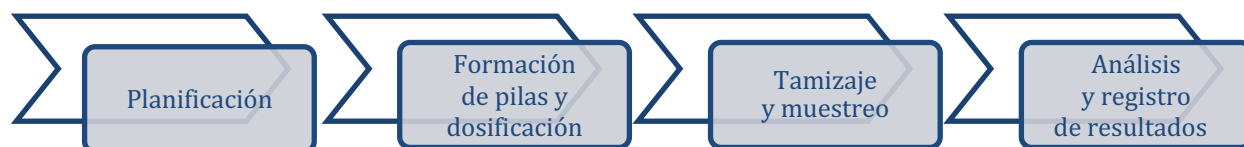
- preocupación por la posible contaminación de la composta final por sustancias químicas peligrosas presentes en los materiales de envasado compostables, como las sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS, por sus siglas en inglés), que pueden lixiviar y migrar al producto terminado;
- incertidumbre sobre la biodegradabilidad de los plásticos compostables, que podrían dar lugar a contaminación por macro y microplásticos en la composta final;
- dificultad de las personas consumidoras para distinguir entre envases alimentarios con recubrimientos plásticos compostables y aquellos con recubrimientos plásticos convencionales, y
- problemas prácticos asociados con la manipulación y el manejo de los materiales de envasado alimentario compostables.

Así, el propósito de este estudio piloto consistió en comprender las repercusiones que la incorporación de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables puede entrañar, lo mismo en el proceso y las operaciones de compostaje que en la calidad de la composta producida.

1.2 Proceso del estudio piloto

La selección de las dos instalaciones participantes en el estudio piloto se realizó con base en criterios operativos definidos por el equipo del proyecto y ambas recibieron acompañamiento a todo lo largo del proceso. En la gráfica 1.1 se muestran las fases que el trabajo entrañó.

Gráfica 1.1: Fases del proceso del estudio piloto sobre compostaje



1. *Planificación.* Se seleccionaron las instalaciones de compostaje participantes en la prueba piloto; se obtuvieron los materiales de envasado compostables a utilizar, y se prepararon los procedimientos, metodologías e instalaciones para la realización del estudio piloto.
2. *Formación de pilas y dosificación.* En cada instalación se formaron tres pilas de compostaje: una pila de control (CP, del inglés: *control pile*), sin incorporación de materiales de envasado compostables y utilizada como referente; una pila de “dosis baja” (LD, del inglés: *low dose*), a la que se agregó una proporción reducida de materiales de envasado compostables (5-6 por ciento), y una pila de “dosis alta” (HD, del inglés: *high dose*), con la adición de una proporción

mayor de estos materiales (alrededor de 11-12 por ciento). Asimismo, en ambos casos se tomaron muestras de la materia orgánica insumo del proceso (tras formar la mezcla en sitio) para su análisis en laboratorio.

3. *Tamizaje y muestreo.* Una vez concluido el proceso de compostaje en cada pila, se realizó el tamizaje o cribado de la composta terminada y se tomaron muestras tanto del producto final, para analizar su calidad, como de los materiales residuales retenidos en la criba (elementos gruesos), para evaluar su grado de desintegración. Durante esta fase, integrantes del equipo del proyecto estuvieron presentes en ambas instalaciones.
4. *Análisis y registro de resultados.* El análisis de los resultados de laboratorio permitió comprender los efectos de los materiales de envasado compostables en la calidad de la composta y evaluar su grado de desintegración.

1.3 Calidad de la composta

La calidad de la composta se refiere a las características físicas, químicas y biológicas del material resultante del proceso de compostaje, las cuales determinan su idoneidad y seguridad para uso en aplicaciones como agricultura, horticultura, paisajismo, jardinería, producción de tierra negra y tepes para césped, proyectos viales y de construcción, campos deportivos y de golf, infraestructura verde, protección y creación de humedales, remediación de suelos, revitalización de tierras, restauración de ecosistemas y control de sedimentos y erosión.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2025), una composta de alta calidad contribuye a enriquecer y mantener suelos saludables mediante las siguientes acciones:

- incorporación de materia orgánica, nutrientes y microorganismos benéficos;
- conservación del agua gracias a una mayor retención de humedad;
- prevención de la erosión al reducir la compactación del suelo y escorrentías;
- reducción de la dependencia de fertilizantes y plaguicidas químicos;
- mayor crecimiento de las plantas de cultivo y aumento de los rendimientos de cosechas;
- mejoramiento de la calidad del agua al filtrar escorrentías pluviales y reducir el arrastre de nutrientes y sedimentos, y
- regeneración de suelos degradados y remediación de aquellos agotados por el uso intensivo o afectados por la contaminación.

Características físicas

Las características físicas de la composta incluyen el tamaño de partícula, el contenido de humedad y la ausencia de contaminantes visibles.

- **Tamaño de partícula:** Se determina mediante el tamizaje de la composta a través de una malla o tamiz con un rango de tamaño de partícula específico. El tamaño de partícula adecuado dependerá de la aplicación para la cual se destina el material (USCC, s.f.).

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- **Contenido de humedad:** Indica la cantidad de agua presente y se expresa como porcentaje del peso total. Este parámetro influye en la manipulación y el transporte de la composta: un material excesivamente seco será ligero y polvoriento, mientras que uno con demasiada humedad será pesado y grumoso. El rango deseable de humedad del producto terminado se sitúa entre 40 y 50 por ciento (USCC, s.f.).
- **Contaminantes visibles:** La composta puede incluir materiales como plásticos, vidrio o piedras, los cuales se detectan mediante una evaluación visual.

Características químicas

Entre las características químicas de la composta se incluyen el contenido de nutrientes, el pH, la relación carbono-nitrógeno (C/N), la materia orgánica y la presencia de PFAS.

- **Índice de nutrientes:** Suele situarse entre 1 y 10 y se obtiene al dividir la concentración total de nutrientes (nitrógeno, fosfato y potasio) entre la cantidad de sales (sodio y cloruro) presentes en la composta. Cuanto mayor es este índice, menor es la probabilidad de una acumulación tóxica de sodio en el suelo (Midwest Laboratories, 2025).
- **pH:** Mide la acidez o alcalinidad de la composta y refleja la actividad de los iones de hidrógeno del suelo o la composta en una escala logarítmica. Valores de pH entre 6 y 8 se consideran normales para una composta e indican un producto maduro (Midwest Laboratories, 2025).
- **Relación C/N:** Refleja el equilibrio entre carbono y nitrógeno. Para la composta terminada, el rango ideal se sitúa entre 10:1 y 20:1. (Midwest Laboratories, 2025). Relaciones C/N elevadas (exceso de carbono) pueden ralentizar la descomposición, mientras que relaciones bajas (exceso de nitrógeno) pueden dificultar el manejo de la pila y generar condiciones indeseables como textura viscosa, olores desagradables y exceso de calor.
- **Materia orgánica:** Mejora las propiedades físicas del suelo, aporta energía a los microorganismos y aumenta la disponibilidad de nutrientes. La composta constituye una fuente importante de materia orgánica para el suelo. Valores superiores a 20 por ciento de materia orgánica, sobre una base de peso seco, se consideran deseables para la composta (Midwest Laboratories, 2025).
- **PFAS:** Las sustancias per y polifluoroalquiladas son compuestos químicos sintéticos utilizados en aplicaciones industriales y productos de consumo. Se encuentran comúnmente tanto en envases alimentarios compostables como en los que no lo son, incluidos papeles resistentes a la grasa, bolsas para palomitas de microondas, cajas de pizza y envoltorios de dulces (CHEM Trust, 2021). Diversos estudios han demostrado que la exposición a determinados niveles de PFAS puede asociarse con cáncer, así como con efectos adversos en el peso corporal, el sistema inmunitario y la salud reproductiva y del desarrollo (Fenton *et al.*, 2020).

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Propiedades biológicas

Las propiedades biológicas de la composta incluyen su grado de madurez y la ausencia de patógenos.

- **Madurez:** Se refiere al grado de completud del proceso de compostaje. Una composta inmadura puede contener concentraciones elevadas de amoníaco libre, ácidos orgánicos u otros compuestos solubles en agua que, a su vez, pueden inhibir la germinación de semillas y el crecimiento de raíces, además de generar olores desagradables (USCC, s.f.).
- **Ausencia de patógenos:** Los patógenos —organismos causantes de enfermedades— incluyen bacterias, virus, hongos, helmintos y protozoarios, que pueden estar presentes en residuos o subproductos incorporados a las pilas (USCC, s.f.). Durante el compostaje, el mantener temperaturas elevadas durante suficiente tiempo permite la inactivación o destrucción de semillas de malezas y patógenos. Ello se conoce como “proceso para la reducción adicional de patógenos” (PFRP, del inglés: *process to further reduce pathogens*). A efecto de evitar la transmisión de enfermedades, los patógenos deben eliminarse o reducirse a niveles inferiores a los umbrales establecidos (USCC, s.f.).

1.4 Repercusiones de carácter operativo

Las afectaciones en la operación asociadas con la aceptación de materiales de envasado compostables incluyen tanto desafíos en el procesamiento, como aspectos financieros, de control de calidad y logística operativa. Comprender estos posibles impactos es fundamental, ya que pueden afectar de manera directa la eficiencia de las instalaciones de compostaje, la calidad del producto, la viabilidad financiera y la capacidad para ubicar nuevas instalaciones o mantener el cumplimiento normativo en las existentes (por ejemplo, debido a la presencia en el sitio de condiciones perjudiciales, como residuos visibles).

A fin de aceptar materiales de envasado compostables, resulta necesario impartir capacitación al personal de las instalaciones para que puedan distinguirlos de los no compostables. Asimismo, las instalaciones podrían considerar ajustes tanto en las prácticas de manejo de las pilas como en el monitoreo y en las estrategias de aireación. Los materiales compostables no triturados que no se desintegren por completo pueden atascar equipos de compostaje, como los tamices o las cribas rotativas o de tambor (también conocidas como “trómeles”). Sin embargo, la trituración previa de estos materiales implica la necesidad de espacio adicional y mayor demanda de mano de obra.

Estos impactos operativos pueden traducirse en un aumento de costos para las instalaciones de compostaje. Además, la capacitación del personal, un monitoreo más intensivo y las modificaciones en el manejo de las pilas y la aireación pueden requerir horas adicionales de trabajo y, en algunos casos, inversiones en nuevos equipos.

1.5 Instalaciones de prueba

1.5.1 Método y criterios para la selección de instalaciones

A fin de seleccionar las instalaciones participantes en el estudio piloto, el equipo a cargo del trabajo definió —en coordinación con personal de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) y el comité directivo del proyecto— los criterios de operación. A las instalaciones seleccionadas se les asignó la responsabilidad de conformar y manejar una pila de control (CP, del inglés: *control pile*), en la cual no se incorporarían materiales de envasado, así como dos pilas de prueba con concentraciones de dosis baja y alta (LD y HD, respectivamente) de materiales de envasado compostables, los cuales se añadirían a granel —al inicio del proceso de compostaje— a la mezcla de materia orgánica utilizada como insumo. Cada pila se sometió a los procedimientos estándar y a la duración habitual del proceso de compostaje normalmente aplicado en la instalación correspondiente; asimismo, las tres pilas de prueba se mantuvieron aisladas para evitar la contaminación cruzada con materiales provenientes de otras pilas de composta.

El equipo encargado del proyecto recurrió a los siguientes criterios para preseleccionar y elegir las dos instalaciones de prueba:

- **Condiciones de operación:** Las condiciones en el lugar debían cumplir, en términos generales, con el “rango razonable” de “condiciones favorables para el compostaje” descritas en *The Composting Handbook* [Manual de compostaje] (Rynk *et al.*, 2022), tal y como se muestra en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1: Condiciones favorables para el compostaje

Condición	Rango razonable	Rango preferido
Contenido de humedad	40-65%	50-60%
Relación carbono-nitrógeno (C/N)	20:1-60:1	25:1-40:1
Oxígeno (concentración mínima en los espacios porosos interiores)	Más de 5%	Más de 10%
Temperatura	45-70 °C	50-65 °C
pH	5.5-9.0	6.5-8.0
Tamaño de las partículas	3-50 mm	Depende de la materia orgánica insumo del proceso y el uso destinado de la composta
Densidad aparente	Menos de 700 kg/m ³	400-600 kg/m ³

Fuente: Rynk *et al.*, 2022, *The Composting Handbook* [Manual de compostaje], Cambridge, MA, Academic Press, cuadro 3.1.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- **Disponibilidad.** Las instalaciones debían confirmar su disponibilidad para participar en el estudio piloto a más tardar en enero de 2025, con una fecha de inicio prevista para febrero o marzo de 2025.
- **Monitoreo suficiente.** Cada instalación debía contar con la capacidad de monitorear y evaluar las pilas con una frecuencia definida, en cumplimiento de las directrices de la organización internacional de normalización ASTM International (*Advancing Standards Transforming Markets*, <www.astm.org>), que incluyen mediciones diarias de temperatura a dos profundidades y en cinco o más ubicaciones por pila, pruebas semanales de contenido de humedad y pruebas quincenales de concentración de oxígeno, entre otros puntos.
- **Capacidad de procesamiento.** El volumen de materia orgánica insumo del proceso de compostaje debía ser suficiente para conformar cuando menos una pila destinada de manera exclusiva al estudio piloto en un lapso de dos a tres semanas.
- **Espacio.** La instalación debía disponer de un área abierta suficiente para la conformación de pilas de prueba exclusivas para el estudio y la realización del proceso de tamizaje.
- **Equipamiento de tamizaje.** Se debía contar con equipo para el tamizaje o cribado de la composta al final del proceso, una vez listas las pilas (por ejemplo, una criba rotativa tipo trómel).
- **Materia orgánica insumo.** La instalación debía incluir residuos alimentarios y excluir biosólidos en su materia orgánica insumo del proceso de compostaje.
- **Tiempo de compostaje.** La instalación debía producir composta madura y estable en un plazo de 90 días.
- **Motivación.** La instalación debía mostrar interés en participar en el estudio piloto y contribuir a promover la economía circular.

A continuación se presentan algunos criterios adicionales deseables, sin que se consideren esenciales:

- **Pruebas analíticas con arreglo al programa STA.** La instalación participa en el programa de certificación Sello de Garantía de Evaluación (*Seal of Testing Assurance*, STA) del Consejo Estadounidense de Compostaje (*US Composting Council*, USCC) para composta (<www.compostingcouncil.org/page/STA-Requirements>).
- **Tamaño del tamiz.** Se utiliza un tamiz con una malla de menos de 1.27 cm (media pulgada).
- **Tecnología de compostaje.** La instalación emplea técnicas de compostaje en hileras volteadas (TW, del inglés: *turned windrow*) o pilas estáticas aireadas (ASP, del inglés: *aerated static piles*), representativas de instalaciones pequeñas y medianas comunes lo mismo en Canadá que en Estados Unidos.
- **Aceptación de material de envasado.** La instalación no acepta actualmente envases alimentarios certificados como compostables o, en su defecto, puede conformar pilas que no incluyan este tipo de materiales, de modo que los efectos de la dosificación aplicada en el proyecto piloto puedan evaluarse con precisión.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- **Mano de obra.** La instalación puede disponer de cuando menos dos integrantes de su personal en sitio para las pruebas finales (sin incluir operadores de equipo).

Con base en los criterios descritos, el equipo responsable del estudio seleccionó dos instalaciones comunitarias de compostaje, ubicadas ambas en la misma región de Estados Unidos, para llevar a cabo el estudio piloto. Una de ellas utiliza un sistema de compostaje en pilas estáticas aireadas cubiertas (*covered aerated static piles*, CASP) y la otra un sistema TW (de hileras volteadas). Estos sistemas se eligieron por ser tecnologías ampliamente accesibles, con bajos costos de capital y requerimientos de equipamiento mínimos. A continuación se describen con mayor detalle ambos métodos de compostaje. A lo largo de este informe, se denomina instalación 1 a la que utiliza la tecnología CASP e instalación 2 a la que utiliza la tecnología TW.

Se optó por realizar el estudio piloto con instalaciones comunitarias en lugar de plantas de mayor alcance por diversas razones, a saber:

- Las instalaciones comunitarias son más accesibles que las de gran escala, las cuales suelen contar con equipamiento y tecnologías más avanzados.
- En instalaciones de menor escala se logra un mayor control de parámetros como la contaminación.
- Si resulta posible compostar materiales de envasado alimentario en este tipo de instalaciones básicas, aquellas con tecnología más avanzada deberían poder replicar y escalar las prácticas que resulten eficaces.
- El equipo responsable requería trabajar con instalaciones capaces de aislar las pilas destinadas al estudio piloto —incluidos los materiales residuales (con elementos o fragmentos gruesos) y la propia composta terminada— sin interrupción de las operaciones normales, lo cual habría resultado difícil en sistemas cerrados o en recipiente (*in-vessel*), que suelen procesar flujos continuos en espacios compactos.

Dado que resultó difícil encontrar instalaciones que cumplieran con *todos* los criterios deseables, el equipo del proyecto decidió dar prioridad a establecimientos con capacidad para aislar pilas y limitar o excluir la incorporación de materiales de envasado compostables, a fin de garantizar la solidez científica de la comparación entre las pilas dosificadas y la pila de control. Por ejemplo, a efecto de conformar pilas libres de materiales compostables preexistentes, la instalación 2 ajustó sus rutas de recolección.

1.5.2 Instalación 1: compostaje en pilas estáticas aireadas cubiertas

El compostaje mediante pilas estáticas aireadas cubiertas (CASP, por sus siglas en inglés) entraña la aireación controlada de materiales orgánicos dispuestos en hileras. En este método, las pilas de composta se colocan sobre una red de tuberías perforadas conectadas a ventiladores que suministran aire al material. La aireación puede ser continua o intermitente, según las necesidades, y durante todo el proceso se monitorean parámetros como la temperatura, el contenido de humedad y los niveles de oxígeno dentro de las pilas. Éstas se cubren con lonas que ayudan a mantener la humedad, contener los materiales y prevenir problemas de olores.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Entre los beneficios adicionales del método de compostaje CASP se incluyen los siguientes (Cambridge Companies, 2024):

- **Eficiencia.** En comparación con métodos tradicionales, los sistemas CASP reducen el tiempo requerido para el compostaje, ya que una aireación óptima acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica.
- **Escalabilidad.** Estos sistemas pueden adaptarse a efecto de manejar mayores volúmenes de residuos orgánicos, lo que los hace adecuados para operaciones tanto de pequeña como de gran escala.
- **Control de olores.** Los sistemas CASP ayudan a mitigar problemas de mal olor al mantener condiciones aeróbicas, lo que reduce la formación de compuestos causantes de olores.
- **Reducción de patógenos.** El control de la temperatura y los niveles de oxígeno contribuye a la reducción de patógenos en la composta, lo que permite obtener un producto final seguro para su uso en agricultura y paisajismo.
- **Contención.** El uso de cubiertas protege las pilas frente a la fauna y condiciones climáticas (como el viento) que podrían interferir con el proceso de compostaje.

Proceso de compostaje en la instalación 1

La instalación 1 —que suele recolectar materia orgánica (residuos alimentarios) para compostaje cinco días a la semana— tardó aproximadamente tres semanas en reunir un volumen suficiente de insumo del proceso para conformar sus pilas de prueba de 23 metros cúbicos (m³) o 30 yardas cúbicas (yd³) cada una. En el caso de las pilas dosificadas, los materiales de envasado compostables se incorporaron al insumo orgánico el día en que se completó la pila en cuestión.

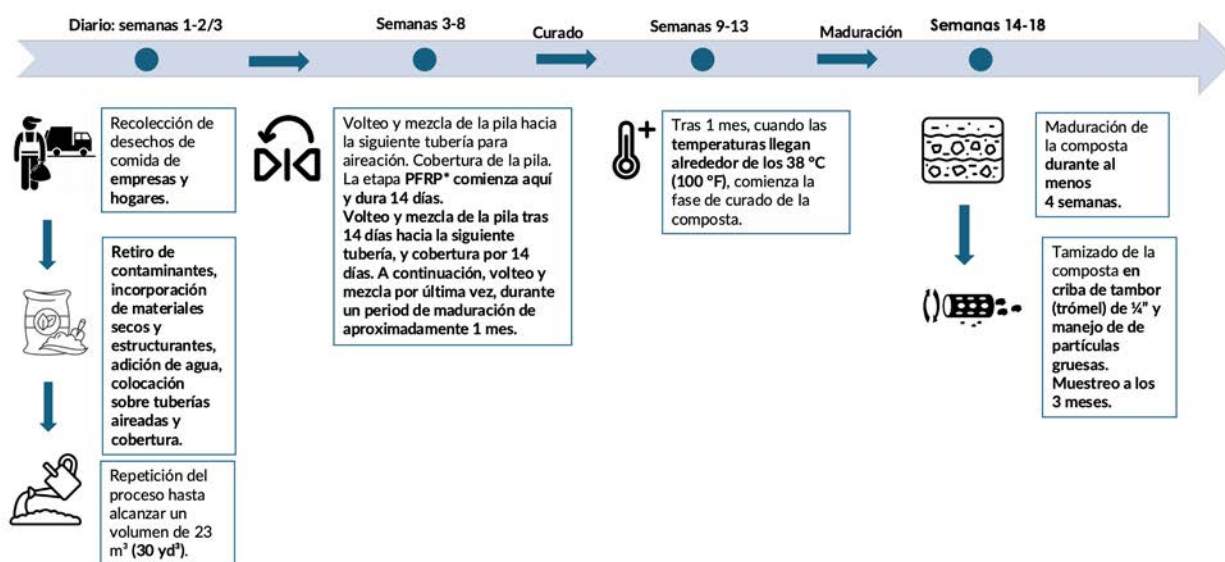
Durante la fase de constitución de las tres pilas de prueba (de control, de dosis baja y de dosis alta) de la instalación 1 se añadió agua según fue necesario. En el sistema CASP, los materiales se mezclan y se colocan sobre tuberías perforadas, a través de las cuales se insufla aire para oxigenar la pila, en lugar de realizar volteos mecánicos. Una vez mezclada la materia orgánica insumo del proceso y colocada sobre las tuberías, las pilas se cubrieron con lonas de Gore®, membrana diseñada para controlar la temperatura, la humedad y el flujo de aire, al tiempo que minimiza los olores, las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de lixiviados (Gore, s.f.).

Alrededor de la cuarta semana, las pilas se voltearon y mezclaron, y se trasladaron a una tubería adyacente para su aireación. Esta etapa corresponde a la fase mesofílica del compostaje, durante la cual se da la descomposición inicial de materia. La actividad de los microorganismos mesofílicos empieza a incrementar rápidamente la temperatura, con lo que inicia el proceso para la reducción adicional de patógenos (PFRP, por sus siglas en inglés). Las temperaturas alcanzan hasta 71 °C, lo que permite que microorganismos termofílicos descompongan materiales más complejos, pero, sobre todo, mata patógenos y semillas de hierbas. En los sistemas CASP, el PFRP se considera completo cuando las temperaturas superan los 55 °C (131 °F) durante un mínimo de tres días consecutivos (EPA, 2013).

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Transcurridas otras dos semanas, las pilas se voltearon y mezclaron una vez más y se trasladaron a otra tubería perforada, donde permanecieron dos semanas más, antes de ser volteadas y mezcladas por última vez, así como colocadas sobre la tubería final para un periodo de curado de un mes. Alrededor de la semana 12, las pilas se retiraron de las tuberías aireadas y se colocaron en un área destinada a la maduración de la composta (aproximadamente un mes más). Por último, el equipo del proyecto se trasladó al sitio para llevar a cabo el tamizaje y el muestreo. Gráfica 1.2 muestra el proceso completo de compostaje en la instalación 1.

Gráfica 1.2: Proceso de compostaje en la instalación 1



* PFRP (del inglés: *process to further reduce pathogens*) se refiere al proceso para la reducción adicional de patógenos.

1.5.3 Instalación 2: compostaje en hileras volteadas

El compostaje en hileras volteadas (TW, por sus siglas en inglés) es un método que consiste en disponer los residuos orgánicos en hileras y voltearlas periódicamente a fin de mantener una aireación adecuada. Este método se seleccionó para el proyecto piloto debido a su accesibilidad y el bajo nivel de tecnología requerido, lo que lo hace viable para cualquier persona o entidad interesada en el compostaje.

Entre los beneficios del método de compostaje en hileras volteadas se incluyen los siguientes:

- **Aumento del suministro de oxígeno.** Voltear y mezclar de forma periódica las hileras permite la introducción de oxígeno, lo que eficientiza la descomposición de la materia orgánica y reduce la duración del proceso de compostaje.
- **Mejor control de la temperatura.** El volteo asegura que todo el material orgánico se exponga al rango de temperatura óptimo para la actividad microbiana a lo largo del proceso.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- **Mayor retención de nutrientes.** El proceso de volteo ayuda a prevenir la pérdida de nutrientes por lixiviación o volatilización, lo que produce una composta rica en nutrientes.
- **Reducción de impactos asociados a olores y lixiviados.** El volteo reduce la compactación y favorece la oxigenación del material, lo que a su vez evita la descomposición anaerobia responsable de la generación de olores desagradables y lixiviados.
- **Descomposición acelerada.** El volteo garantiza un suministro constante de oxígeno, un control adecuado de la temperatura, la homogeneización de la relación carbono-nitrógeno (C/N) y una distribución uniforme de la humedad, lo que acelera la descomposición de la materia orgánica y reduce el tiempo total del proceso.

Proceso de compostaje en la instalación 2

La instalación 2 —que suele recolectar materia orgánica (residuos alimentarios) para compostaje dos veces por semana— tardó entre dos y tres semanas en reunir un volumen suficiente de insumo del proceso para conformar sus pilas de prueba de 15.3 m³ (20 yd³). En el caso de las pilas dosificadas, los materiales de envasado compostables se incorporaron al insumo orgánico el día en que se completó la pila en cuestión.

Una vez formadas las tres pilas de prueba (de control, de dosis baja y de dosis alta) de la instalación 2, dio inicio el proceso para la reducción adicional de patógenos (PFRP), el cual tuvo una duración aproximada de tres semanas. Durante este periodo, las pilas se voltearon dos veces por semana para asegurar una adecuada aireación y mezclado. En los sistemas de compostaje TW, el PFRP se considera completo cuando las temperaturas superan los 55 °C durante un mínimo de 15 días (EPA, 2013). Cabe observar que en la instalación 2 no se suele añadir agua a las pilas, ya que los residuos alimentarios generalmente contienen suficiente humedad; asimismo, éstas se cubren con una lona para ayudar a prevenir la evaporación, en particular debido a que el establecimiento se ubica en una región de clima especialmente árido.

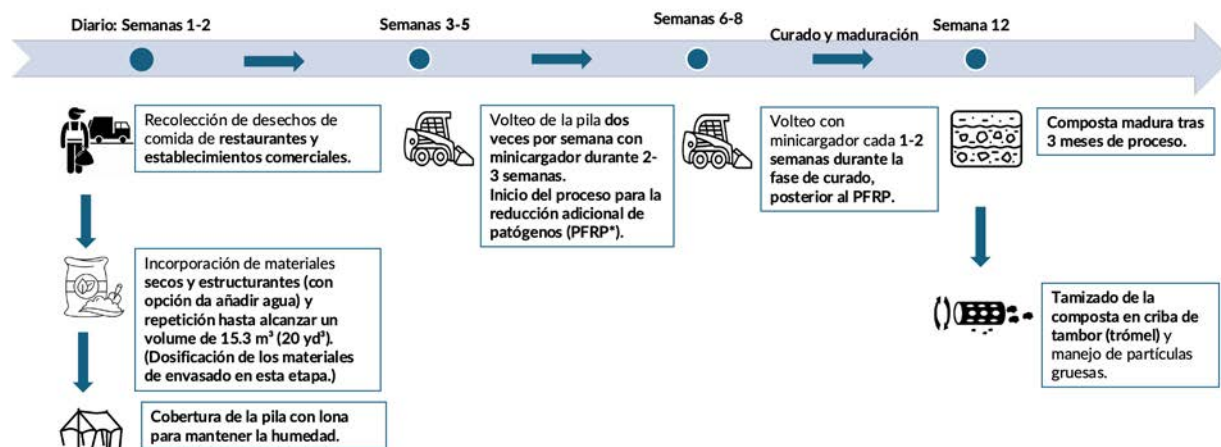
Las fases finales del proceso de compostaje en la instalación 2 corresponden al curado (semanas 6 a 8) —fase durante la cual se continuó volteando las pilas una vez por semana— y a la maduración (semanas 9 a 12).

Es importante señalar que la instalación 2 ya aceptaba materiales compostables antes del inicio del estudio piloto; sin embargo, logró conformar pilas que *no* contenían fragmento alguno de materiales compostables distintos de aquellos incorporados específicamente para los fines del trabajo en cuestión.

Gráfica 1.3 muestra el proceso de compostaje en la instalación 2.

Es importante señalar que la instalación 2 ya aceptaba materiales compostables antes del inicio del estudio piloto; sin embargo, logró conformar pilas que *no* contenían fragmento alguno de materiales compostables distintos de aquellos incorporados específicamente para los fines del trabajo en cuestión.

Gráfica 1.3: Proceso de compostaje en la instalación 2



* PFRP (del inglés: *process to further reduce pathogens*) se refiere al proceso para la reducción adicional de patógenos.

1.6 Materiales analizados

El estudio piloto se centró en materiales de envasado de *papel con recubrimiento polimérico compostable*, término que se refiere al papel recubierto con una capa de biopolímero compostable, en lugar de un plástico convencional como el polietileno (PE). Biopolímeros como el ácido poliláctico (PLA) se producen para biodegradarse y descomponerse en sistemas de compostaje, y se utilizan a menudo como recubrimientos en envases, contenedores o envoltorios para alimentos y otras aplicaciones donde se requiere una barrera contra la humedad o la grasa.

Todos los materiales de envasado compostables incluidos en el estudio piloto cuentan con certificación de compostabilidad otorgada por terceros, y la mayoría se encuentran disponibles en el mercado. El término *certificado como compostable* indica que un producto se ha sometido a pruebas independientes conforme a normas específicas de compostabilidad y que se ha verificado su descomposición completa en instalaciones de compostaje comercial, sin dejar residuos perjudiciales.

El equipo responsable de llevar a cabo el estudio piloto contactó a fabricantes conocidos de productos de papel con recubrimiento polimérico compostable para evaluar su disposición a proporcionar muestras para su inclusión en las pruebas piloto. Los materiales de prueba finalmente incluidos fueron los siguientes:

- Etiquetas adhesivas —de composición patentada— para productos frescos (frutas y verduras)
- Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches
- Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA (400 ml)
- Vasos de papel con recubrimiento de PLA (12 oz)
- Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA (12 oz)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

El equipo a cargo del trabajo evaluó la posibilidad de incluir otros materiales de envasado certificados como compostables, tales como bolsas multilaminadas, productos con recubrimiento de polihidroxialcanoato (PHA) y envoltorios alimentarios de fibra con recubrimiento polimérico; sin embargo, estos materiales resultaron difíciles de localizar y no fue posible obtenerlos dentro de los plazos del estudio.

Cabe señalar que la composición de las etiquetas adhesivas para productos frescos utilizadas en este estudio piloto no se incluye en el presente informe por tratarse de materiales de patente, cuya divulgación podría comprometer la protección de patentes de la parte fabricante.

2. Metodología y limitaciones

2.1 Metodología del estudio piloto

En pruebas de campo con envases alimentarios compostables realizadas recientemente en América del Norte se ha recurrido sobre todo a dos métodos: el de “bolsas de malla” y el de “dosificación”. Para efectos de este estudio piloto se seleccionó el método de dosificación, ya que reproduce condiciones más cercanas a las de operaciones reales al incorporar los materiales compostables directamente a la materia orgánica insumo del proceso en lugar de colocarlos primero dentro de bolsas de malla.

El equipo del proyecto formuló y documentó específicamente para este trabajo piloto el método de campo por dosificación, el cual se presenta en el apéndice Apéndice 1: “. Con esta metodología se buscaba reflejar condiciones del “mundo real”; generar una muestra representativa de la pila completa, y establecer un proceso manejable y con mínima interferencia en las operaciones, con el fin de incentivar la participación de instalaciones de compostaje en futuros proyectos piloto o pruebas de campo.

Los procedimientos utilizados por las instalaciones para incorporar los materiales de prueba compostables en sus pilas se describen a continuación.

Tras recibir los materiales de prueba por correo, cada instalación los preparó para su incorporación en las pilas de compostaje según el tipo de producto. En particular, las instalaciones separaron los vasos apilados, hicieron bola los envoltorios para sándwiches y despegaron las etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras) de las hojas o medio en que se recibieron. En condiciones operativas reales, los materiales de envasado compostables se mezclarían con residuos alimentarios y probablemente contendrían mayor humedad antes de su incorporación a las pilas. Sin embargo, los plazos del proyecto no permitieron reproducir de manera íntegra estas condiciones, sobre todo porque el papel con recubrimiento polimérico compostable está diseñado para resistir la humedad y los residuos de alimentos, lo que dificulta replicar por completo su ciclo real de eliminación bajo las condiciones controladas de un proyecto piloto.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Posteriormente, los materiales se dosificaron en las pilas a tasas distintas con el objetivo de conformar una pila de dosis baja (LD) y otra de dosis alta (HD). Los porcentajes de dosificación se calcularon en función del volumen total de cada pila: 23 m³ (30 yd³) en la instalación 1 y 15.3 m³ (20 yd³) en la instalación 2. Los Cuadro 2.1 y Cuadro 2.2 presentan las cantidades dosificadas para las pilas LD y HD de la instalación 1, respectivamente, mientras que los Cuadro 2.3 y Cuadro 2.4 muestran las cantidades correspondientes para las pilas LD y HD de la instalación 2.

El número de etiquetas adhesivas para productos frescos enviadas a la instalación 1 fue sobrestimado por la parte fabricante, por lo que la instalación recibió alrededor de 1,500 etiquetas, en lugar de las 599 previstas. Como resultado, durante los dos primeros días del proceso de dosificación se incorporó un número excesivo de etiquetas en la pila de dosis baja (LD). Esta situación se corrigió reduciendo durante los nueve días restantes el número de etiquetas agregadas a la pila, de modo que la cantidad total incorporada se mantuviera en 599 etiquetas. Las cantidades de dosificación de las etiquetas se calcularon dividiendo el total disponible proporcionado por la parte fabricante entre las cuatro pilas de prueba, con base en las tasas de dosificación previstas y los tamaños de las pilas.

En el caso de la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1, fue necesario ajustar la dosificación debido a que la recepción de un volumen de materia orgánica insumo mayor al anticipado permitió completar la pila de 23 m³ (30 yd³) antes de lo previsto. Ante esta situación, el equipo responsable del estudio determinó que los materiales de envasado compostables restantes debían incorporarse de una sola vez a la pila ya conformada, antes de dar inicio al proceso para la reducción adicional de patógenos (PFRP).

Cuadro 2.1: Instalación 1 – Cantidades agregadas a la pila LD (dosificación)

Material de envasado compostable	Cantidad total	Número de días de dosificación	Cantidad total dosificada por día de dosificación
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	599	11	133, por dos días 37, por nueve días
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	195	15	13
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	1,905	15	127
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	1,800	15	120
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	1,170	10	117

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cuadro 2.2: Instalación 1 – Cantidades agregadas a la pila HD (dosificación)

Material de envasado compostable	Cantidad total	Número de días de dosificación	Cantidad total dosificada por día de dosificación
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	1,185	15	79
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	400	15	26
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	3,780	15	252
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	3,585	15	239
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	4,065	15	271

Cuadro 2.3: Instalación 2 – Cantidades agregadas a la pila LD (dosificación)

Material de envasado compostable	Cantidad total	Número de días de dosificación	Cantidad agregada por día de dosificación
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	400	3	132
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	132	6	22
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	1,265	6	210
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	1,198	6	199
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	1,198	3	399

Cuadro 2.4: Instalación 2 – Cantidades agregadas a la pila HD (dosificación)

Material de envasado compostable	Cantidad total	Número de días de dosificación	Cantidad total dosificada por día de dosificación
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	1,185	15	79
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	400	15	26
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	3,780	15	252
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	3,585	15	239
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	4,065	15	271

Las tasas de dosificación efectivamente alcanzadas para cada pila en ambas instalaciones, con base en las cantidades de dosificación presentadas en los Cuadro 2.1, Cuadro 2.2, Cuadro 2.3 y Cuadro 2.4, se muestran en el Cuadro 2.5. Estas tasas se calcularon a partir del volumen de cada pila y de los volúmenes de material de envasado compostable triturado. La ecuación utilizada para este cálculo se presenta a continuación:

$$\text{Tasa de dosificación} = \text{volumen de material dosificado (m3)} \div \text{volumen total de la pila de compostaje (m3)}$$

$$\text{Volumen de material dosificado} = \text{volumen de material de envasado compostable triturado (m3)} \times \text{número de unidades de material de envasado compostable incorporadas a la pila (unidades)}$$

Los volúmenes de las pilas incluyen materia orgánica insumo del proceso de compostaje (residuos alimentarios y desechos verdes) y elementos estructurantes (astillas de madera).

Cuadro 2.5: Tasas de dosificación basadas en volumen para las pilas de dosis baja y dosis alta en la instalación 1 y la instalación 2 (porcentajes)

Nivel de dosificación	Instalación 1 (%)	Instalación 2 (%)
Dosis baja	6.8	5.8
Dosis alta	11.4	11.6

2.1.1 Formulación del método de dosificación

Un componente clave del estudio piloto fue la formulación y la aplicación de la metodología de dosificación para la realización de pruebas de campo de materiales de envasado compostables. Esta metodología se diseñó en respuesta a las recomendaciones del estudio de Closed Loop Partners (CLP, 2024), *Breaking it Down: The Realities of Compostable Packaging Disintegration in Composting Systems* [Análisis detallado de las realidades de la desintegración de los materiales de envasado compostables en los sistemas de compostaje], el cual desaconseja el uso del método de bolsas de malla por no reflejar las condiciones reales del compostaje.

A diferencia del método de bolsas de malla, la metodología de dosificación permite evaluar la degradación de los materiales cuando los envases se incorporan de forma directa en las pilas de compostaje, lo que permite un análisis más realista de su desintegración, al representar de manera más fiel las operaciones de compostaje en condiciones reales.

Como se mencionó previamente, la selección de instalaciones pequeñas, de alcance comunitario, se basó en la hipótesis inicial de que sería posible utilizar la pila completa como muestra, con inclusión de elementos gruesos residuales. Sin embargo, en la práctica, incluso estas pilas de menor tamaño resultaron demasiado grandes para su manejo integral, lo que llevó al equipo a adoptar un enfoque de submuestreo. Este proceso permitió identificar varios aspectos relevantes:

- el muestreo de pilas completas resulta poco práctico en pruebas de campo;
- los pesos húmedos y los residuos adheridos a los materiales requieren la aplicación de factores de corrección para estimar con mayor precisión la desintegración, y
- las mediciones en campo pueden indicar una desintegración de 0 por ciento, aun cuando haya ocurrido degradación real, lo que pone de manifiesto los desafíos inherentes a la medición de la descomposición de materiales compostables.

Estos hallazgos ponen de relieve el valor de la metodología de dosificación para capturar patrones de degradación más representativos de las condiciones reales, al tiempo que reconocen las limitaciones prácticas y las incertidumbres inherentes a las pruebas realizadas en campo. Información adicional y los resultados de la aplicación de esta metodología se presentan en el apéndice (Apéndice 1: ”).

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

2.1.2 Variabilidad entre los sitios de prueba

La variabilidad entre los sitios de prueba correspondientes a la instalación 1 y la instalación 2 se presenta en el Cuadro 2.6:

Cuadro 2.6: Variabilidad entre los sitios de prueba

Variable	Instalación 1	Instalación 2
Método de compostaje	Pilas estáticas aireadas	Hileras volteadas
Tamaño de la pila de prueba	23 m ³ (30 yd ³)	15.3 m ³ (20 yd ³)
Materiales de entrada habituales	Residuos alimentarios y de jardinería	Residuos alimentarios y de jardinería y materiales de envasado compostables
Tiempo para conformar la pila	~3 semanas	~2 semanas
Número de días por semana en que se añadió materia orgánica insumo del proceso a las pilas (es decir, días de dosificación)	5	3
Condiciones climáticas	Sitio más protegido del viento	Sitio menos protegido del viento y a ~600 m (2,000 pies) más de altitud

2.2 Limitaciones del estudio piloto

Si bien los resultados obtenidos aportan información valiosa sobre el impacto que los materiales de envasado compostables tienen en la calidad de la composta y en las operaciones de las instalaciones de procesamiento en condiciones reales, es importante reconocer ciertas limitaciones de este trabajo de compostaje a escala piloto, mismas que se describen a continuación:

- **Número limitado de instalaciones y pilas de prueba.** Sólo dos instalaciones participaron en el estudio piloto, ambas ubicadas en la misma región árida de Estados Unidos, y cada una conformó tres pilas de prueba. Esto limita la generalización de los hallazgos, ya que los resultados pueden variar en otros climas y entornos.
- **Sistemas de compostaje.** Los dos sistemas evaluados (CASP y TW) presentan características similares, por lo que los resultados pueden no reflejar cómo los materiales de envasado compostables se comportan en otros sistemas, como los sistemas cerrados o en recipiente (*in-vessel*).
- **Preparación de los materiales.** Los materiales de envasado compostables se recibieron limpios antes de su incorporación en las pilas. En condiciones reales, estos materiales suelen estar contaminados con residuos de alimentos y humedad, lo que podría afectar las tasas de desintegración y representar desafíos operativos.
- **Disponibilidad de materiales.** El equipo a cargo del estudio se limitó a utilizar materiales de envasado compostables disponibles comercialmente. No fue posible incluir materiales con recubrimiento de polihidroxialcanoato (PHA), ya que no se identificaron fabricantes con disponibilidad inmediata para surtirlos.

- **Marco temporal reducido y estacionalidad.** El estudio piloto se llevó a cabo durante un solo ciclo, sin replicación en distintas estaciones del año. Además, no se documentaron de forma exhaustiva condiciones climáticas y meteorológicas como temperatura, humedad ambiental y precipitación, lo que limita la comprensión de la variabilidad estacional en los resultados del compostaje.
- **Análisis de propiedades biológicas y físicas.** Los análisis de laboratorio solicitados de cada instalación corresponden al conjunto de pruebas requeridas por el programa de certificación STA para composta del USCC. Sin embargo, la instalación 2 solicitó —por descuido— un conjunto menos completo de análisis, que no incluyó propiedades biológicas ni algunas propiedades físicas, como el análisis de microplásticos. Dada la relevancia de los resultados biológicos de la instalación 1, una limitación del estudio consiste en que estas evaluaciones no se realizaron en la instalación 2. Por otro lado, la Fundación para la Investigación y la Educación sobre Composta (*Compost Research and Education Foundation*, CREF) tiene previsto actualizar el conjunto de métodos de evaluación para el análisis del proceso de compostaje y de la composta (TMECC; del inglés: *test methods for the examination of composting and compost*), con vistas a detectar plásticos en forma de película en la composta, en respuesta a los avances tecnológicos y al mayor entendimiento científico desde la adopción de los métodos vigentes (CREF, 2025).
- **Análisis de PFAS.** La evaluación de PFAS en composta es un campo emergente y presenta desafíos técnicos, ya que el método analítico de la EPA utiliza muestras de sólo 5 gramos y la composta es intrínsecamente heterogénea. La CREF también planea actualizar el conjunto de métodos TMECC para la detección de PFAS en composta, considerando los avances tecnológicos y científicos recientes. Como apoyo, las instalaciones recibieron un video elaborado por la CREF con orientaciones sobre el submuestreo de la composta para asegurar que las muestras fueran representativas de toda la pila (CREF, 2025.)
- **Bajo contenido de humedad.** Las tres pilas de la instalación 2 presentaron niveles de humedad bajos durante todo el estudio piloto, a pesar de que los criterios de selección de instalaciones requerían que las pilas mantuvieran, en general, niveles de humedad de entre 40 y 65 por ciento. Aunque esta instalación suele operar dentro de ese rango, las condiciones climáticas excepcionalmente secas registradas durante el periodo del estudio afectaron los niveles de humedad.
- **Trituración.** Los materiales de envasado compostables no se trituraron antes del compostaje. Si bien la trituración podría haber incrementado la tasa de desintegración, esta práctica se excluyó de forma deliberada para reflejar condiciones operativas reales. Además, la trituración implica impactos ambientales adicionales asociados a un mayor consumo de energía y a la operación misma del equipo, y no es una opción accesible para muchas instalaciones de compostaje comunitarias o intermedias.

3. Principales hallazgos

3.1 Repercusiones en la calidad de la composta

A efecto de analizar y comprender el impacto de los materiales de prueba compostables en la calidad de la composta, se analizaron muestras de las tres pilas en ambas instalaciones para determinar sus propiedades químicas. En la instalación 1 se analizaron también las propiedades biológicas de las pilas de dosis baja y alta (LD y HD, respectivamente) con vistas a evaluar la presencia de patógenos. A continuación se presentan los resultados de estos análisis.

3.1.1 Propiedades químicas

En el caso del análisis para la detección de sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS), éste se realizó únicamente en la composta terminada y para ello tomaron muestras y efectuaron exámenes por separado del resto de las propiedades químicas. Las demás propiedades químicas se analizaron tanto en la composta terminada como en la materia orgánica insumo del proceso, con el propósito de considerar las concentraciones y propiedades previas al compostaje y permitir su comparación con la composta final.

Para analizar el contenido de PFAS, una vez concluido el proceso completo de compostaje y realizado el tamizaje, se tomaron muestras de la composta final de cada pila en ambas instalaciones. Las muestras se colocaron en kits de muestreo para PFAS proporcionados por Eurofins Scientific y se enviaron a su laboratorio. Eurofins Scientific analizó las muestras utilizando el Método 1633A de la EPA de Estados Unidos para el análisis de PFAS en muestras acuosas, sólidas, biosólidos y tejidos mediante cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas en tándem (*liquid chromatography–tandem mass spectrometry*, LC-MS/MS) (EPA, 2024).

Por cuanto al análisis de las demás propiedades químicas, en ambas instalaciones se recolectaron muestras de composta en cada pila una vez finalizado el proceso completo de compostaje y el tamizaje, en tanto que las muestras de la materia orgánica insumo del proceso se tomaron al principio, una vez que las pilas estuvieron completamente conformadas. Si bien ninguna de las instalaciones suele tomar muestras de la materia orgánica insumo del proceso, la metodología empleada fue idéntica a la utilizada para el muestreo de la composta terminada, proceso que en ambas instalaciones se realiza de manera trimestral o al menos anual. Las muestras se enviaron a Midwest Laboratories Inc. a fin de analizar el contenido de humedad, nivel de pH, nutrientes y concentraciones de carbono y nitrógeno.

PFAS

La EPA de Estados Unidos ha establecido niveles de detección regionales (RSL, por sus siglas en inglés) para varios compuestos PFAS en suelos residenciales e industriales (EPA, s. f.). También algunas entidades federativas de Estados Unidos —como Hawái (Hawai'i Department of Health, 2020) y Texas (TCEQ, 2025)— han establecido valores de referencia para PFAS en suelos, aunque éstos difieren de un estado a otro. De manera similar, el ministerio de Salud de Canadá (*Health Canada*) y el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (*Canadian Council of Ministers of*

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

the Environment, CCME) establecen valores de referencia para PFAS en suelos (ITRC, 2023). También algunas provincias canadienses —como Alberta (Gobierno de Alberta, 2022) y Columbia Británica (Hains y Richards, 2023)— cuentan con valores de referencia específicos. Asimismo, el Consejo Interestatal de Tecnología y Reglamentación (*Interstate Technology and Regulatory Council*, ITRC) ha publicado un documento técnico y normativo sobre sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS) que presenta valores de referencia para diversos de estos compuestos en suelo y agua en Canadá, Estados Unidos y otros países.

Cabe señalar que las PFAS son cada vez más reconocidas como una preocupación ambiental y de salud pública debido a su persistencia; en consecuencia, los estándares aplicables a PFAS en suelos y composta evolucionan con rapidez conforme se va disponiendo de nuevas investigaciones.

Las cuatro pilas de composta dosificadas (LD y HD en cada instalación) se analizaron con el fin de detectar más de 40 compuestos PFAS. Sólo se encontró presencia cuantificable de ácido perfluoropentanosulfónico (PFPeS) y ácido perfluoropentanoico (PFPeA) en la instalación 1, y de ácido perfluorobutanoico (PFBA) y ácido perfluorooctanoico (PFOA) en la instalación 2.

En las tres pilas (CP, LD y HD) de la instalación 1 se detectaron PFAS. En la pila de control se detectaron 0.32 µg/kg de PFPeS, que es un tipo de ácido perfluoroalquilsulfónico; sin embargo, no existen directrices oficiales de alcance federal en Canadá o Estados Unidos sobre calidad del suelo o de la composta específicas para este compuesto. Si bien es cierto que Hawái cuenta con directrices reguladoras en materia de PFPeS en suelos residenciales (Hawai'i Department of Health, 2020), las cantidades detectadas en este caso fueron muy inferiores al umbral. En Canadá, ninguna provincia o región ha establecido directrices específicas para PFPeS. Debido a que sólo se detectó PFPeS en la CP —y no en las pilas LD y HD— de la instalación 1, se puede concluir que este hallazgo no es atribuible a los materiales de envasado compostables; además, dado que la cantidad detectada es bastante inferior a los límites establecidos en las directrices disponibles, la presencia de esta sustancia no se investigó más a fondo.

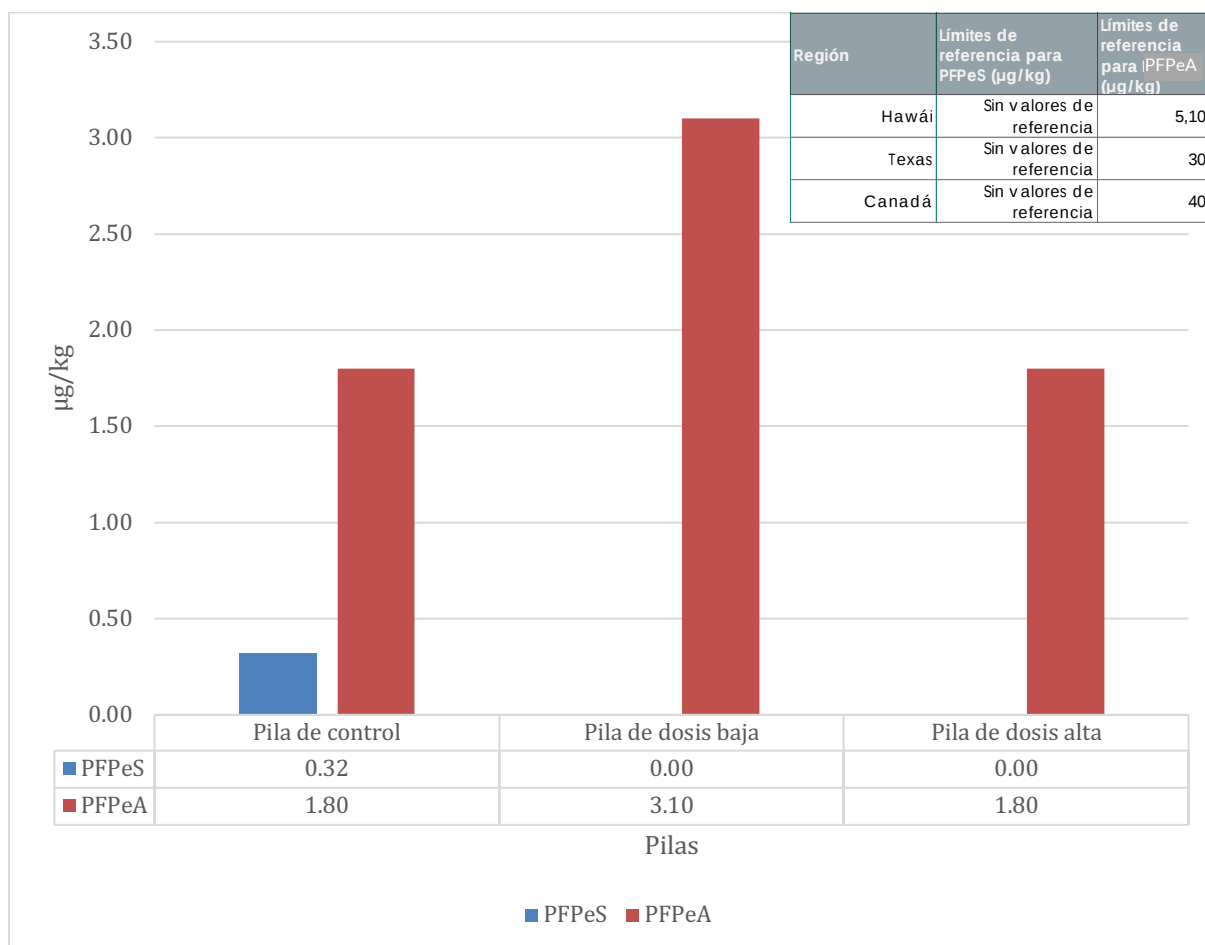
En la instalación 1 se detectaron 1.80 µg/kg de ácido perfluoropentanoico (PFPeA) en la pila de control, 3.10 µg/kg en la pila LD y 1.80 µg/kg en la pila HD. El PFPeA es un ácido perfluoroalquilo carboxílico y no existen directrices oficiales canadienses ni de la EPA sobre calidad del suelo o de la composta asociadas a este compuesto. Aunque Hawái (Hawai'i Department of Health, 2020) y Texas (TCEQ, 2025) han establecido directrices normativas para concentraciones de PFPeA en suelo residencial, las cantidades detectadas en las pilas de la instalación 1 son considerablemente inferiores a los umbrales de ambas entidades. Por su parte, ninguna provincia o región de Canadá cuenta con directrices sobre PFAS que aborden de manera concreta el PFPeA; sin embargo, el ministerio de Salud de Canadá (*Health Canada*) ha definido pautas relativas a dicho compuesto en el suelo (ITRC, 2023). Las concentraciones más altas de PFPeA se detectaron en la pila de dosis baja de la instalación 1, por lo que el resultado podría guardar relación con los materiales de envasado compostables. No obstante, dado que las concentraciones detectadas en la pila de control y en la pila de dosis alta fueron iguales, es poco probable que la concentración elevada observada en la pila

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

LD esté asociada con dichos materiales. Dado que no existen valores de referencia disponibles para la presencia de PFPeA en suelos, este resultado no se investigó con mayor profundidad.

En la Gráfica 3.1 se muestran las concentraciones de PFAS (PFPeS y PFPeA) detectadas en las tres pilas de la instalación 1, junto con los límites de referencia disponibles para dichos compuestos.

Gráfica 3.1: PFAS detectadas en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1, y límites de referencia disponibles



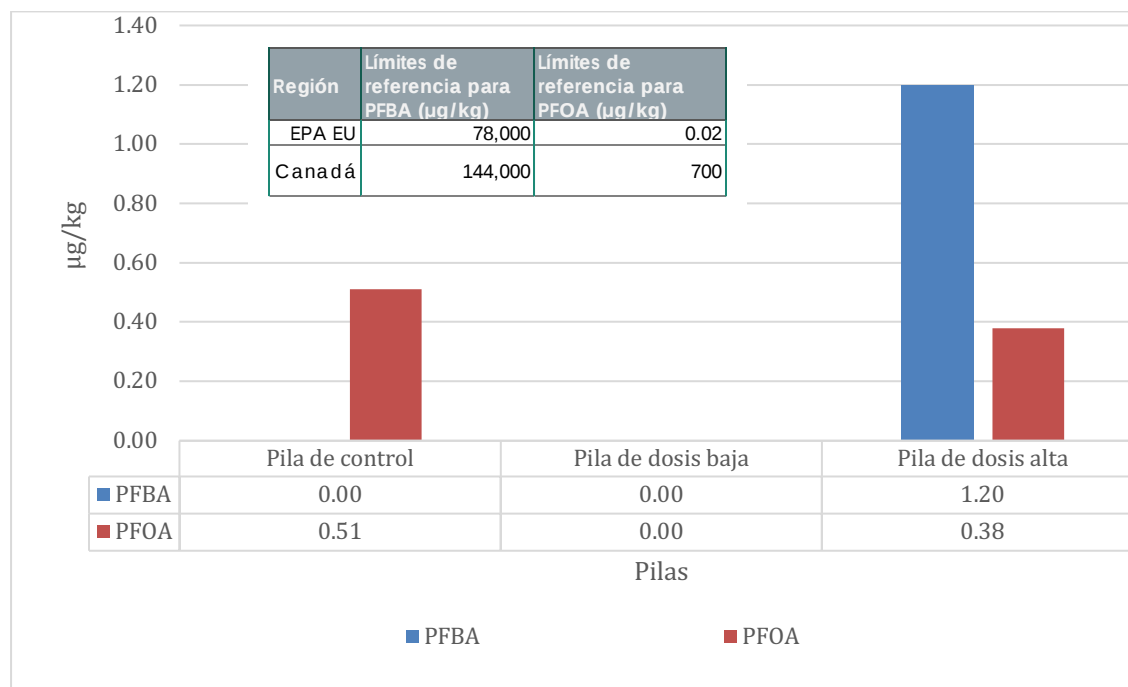
Se detectaron PFAS en las pilas de control y HD de la instalación 2. En específico, se encontró ácido perfluorobutanoico (PFBA) en la pila HD, más no en las pilas CP y LD. El PFBA está incluido tanto en los valores establecidos en los niveles de detección regionales de la EPA como en los valores guía del ministerio de Salud de Canadá; sin embargo, la concentración detectada ($1.20 \mu\text{g}/\text{kg}$) en la pila HD de la instalación 2 es significativamente inferior a dichos valores de referencia, los cuales se muestran en la **Error! Reference source not found.** Teniendo en cuenta que sólo se detectó PFBA en la pila de dosis alta, es posible que este resultado esté relacionado con los materiales de envasado compostables. No obstante, debido a que la concentración detectada se ubica muy por debajo de los valores guía disponibles, este resultado no se investigó con mayor profundidad.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

En la instalación 2 se detectó ácido perfluorooctanoico (PFOA) en concentraciones de 0.51 µg/kg en la pila de control y de 0.38 µg/kg en la pila HD, pero no se le observó en la pila LD. Las concentraciones detectadas en las pilas CP y HD son significativamente inferiores a los valores guía establecidos por el ministerio de Salud de Canadá, aunque en ambos casos superan los niveles de detección regionales de la EPA para contacto directo, que se ubican en 0.2 µg/kg. Debido a que la concentración más alta de PFOA se observó en la pila de control, es poco probable que estas detecciones estén relacionadas con los materiales de envasado compostables; no obstante, sería necesaria una investigación adicional para determinar su origen específico.

La **Error! Reference source not found.** presenta las concentraciones de PFAS (PFBA y PFOA) detectadas en las tres pilas de la instalación 2, así como los límites de referencia disponibles para dichos compuestos.

Gráfica 3.2: PFAS detectadas en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 2, y límites de referencia disponibles



Humedad

La Gráfica 3.3 muestra el contenido de humedad de la composta terminada de cada pila en las instalaciones 1 y 2, en comparación con el rango deseable de humedad para composta terminada.

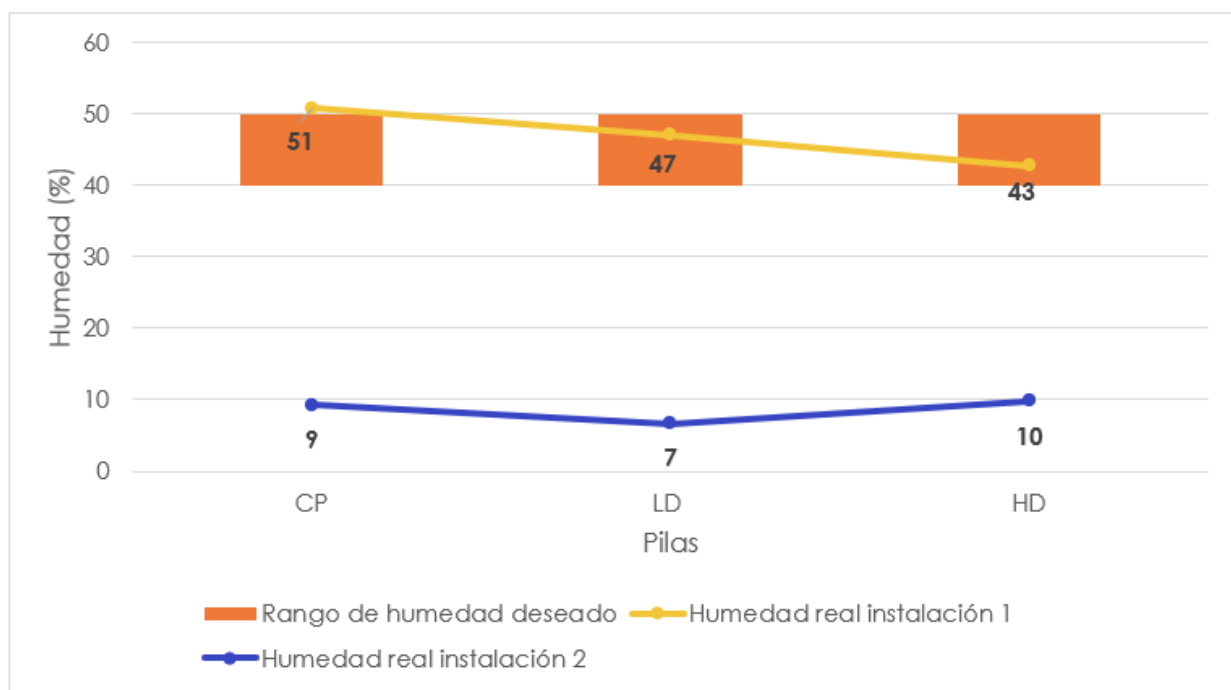
En la instalación 1, la pila de control presentó el mayor contenido de humedad, con 51 por ciento, seguida de la pila de dosis baja con 47 por ciento y la pila de dosis alta con 43 por ciento. Como se observa en la Gráfica 3.3, los niveles de humedad disminuyen ligeramente entre la pila de control, la pila LD y la pila HD, lo que podría indicar que los materiales de envasado compostables

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

contribuyen a una reducción del contenido de humedad en la composta. No obstante, tanto la pila LD como la pila HD se mantuvieron dentro del rango deseable de humedad para composta terminada.

En la instalación 2, la pila HD presentó el mayor contenido de humedad, con 10 por ciento, seguida de la pila de control con 9 por ciento y la pila LD con 7 por ciento. Las pilas de la instalación 2 registraron niveles de humedad bajos —inferiores al rango deseable para composta terminada— durante todo el proceso de compostaje. Dado que estos niveles se observaron en las tres pilas y no solamente en las dosificadas, se concluye que los materiales de envasado compostables no afectaron la humedad de la composta terminada. Los bajos niveles de humedad en las pilas de la instalación 2 se debieron a que este establecimiento no suele añadir agua a sus pilas y, sobre todo, a que durante el estudio piloto se registraron precipitaciones inferiores a lo habitual. La instalación 2 añadió agua a las pilas cuando se observó que los niveles de humedad eran muy bajos; sin embargo, la incorporación de humedad suele ser más difícil en etapas avanzadas del proceso de compostaje.

Gráfica 3.3: Contenido de humedad de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2



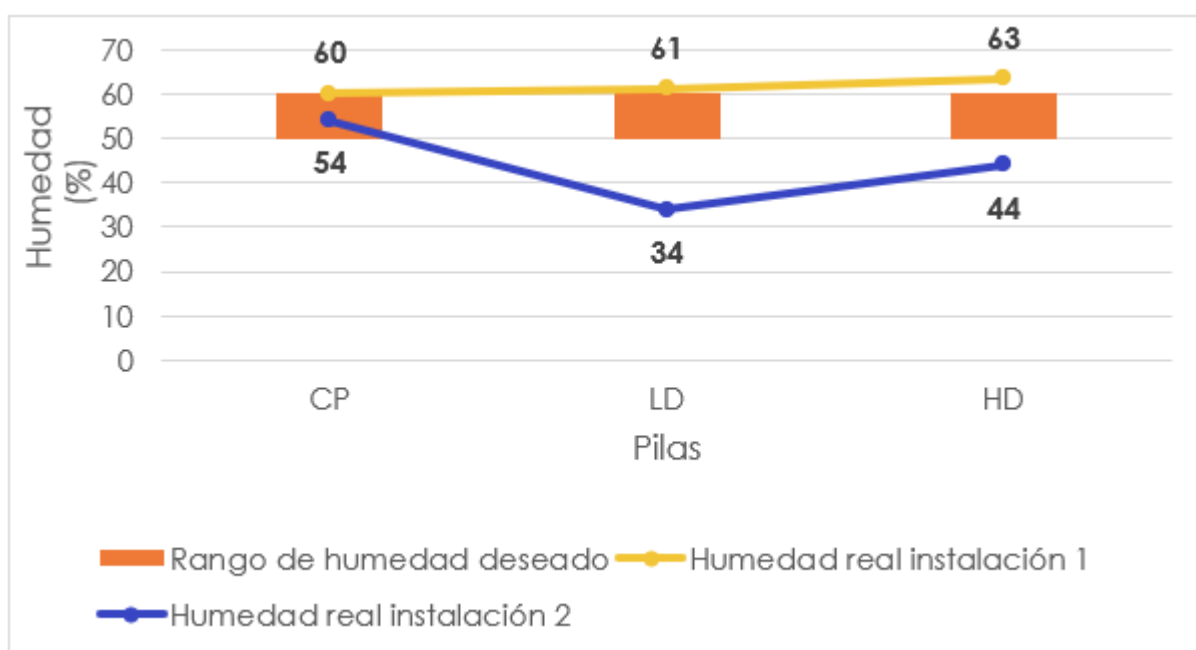
La Gráfica 3.4 muestra el contenido de humedad de la materia orgánica insumo del proceso en cada pila de ambas instalaciones, en comparación con el rango ideal establecido.

En la instalación 1, las pilas LD y HD presentaron contenidos de humedad iniciales por encima del rango óptimo (deseado) para un compostaje rápido (50-60 por ciento), aunque aún dentro del rango aceptable. La pila HD registró el mayor contenido de humedad, con 63 por ciento, seguida de la pila LD con 61 por ciento y la pila de control con 60 por ciento.

En la instalación 2, la materia orgánica insumo del proceso registró en las pilas LD y HD contenidos de humedad por debajo del rango óptimo para un compostaje rápido (34 y 44 por ciento, respectivamente). Si bien el contenido de humedad en la pila HD se encuentra dentro del rango aceptable, no ocurre así con la pila LD: el valor registrado—de 34%— se ubica por debajo del rango aceptable.

Al comparar en la instalación 1 el contenido de humedad de la materia orgánica insumo —mayor en la pila HD, seguido de la pila LD y menor en la pila de control— y el contenido de humedad de la composta terminada —mayor en la pila de control, seguido de la pila LD y menor en la pila HD— se podría sugerir que la incorporación de productos compostables tuvo un impacto negativo en la humedad. Si bien no se observa esta tendencia en la instalación 2, es importante recordar que allí no se añadió agua de forma regular durante el proceso de compostaje, a diferencia de la instalación 1, que sí lo hizo.

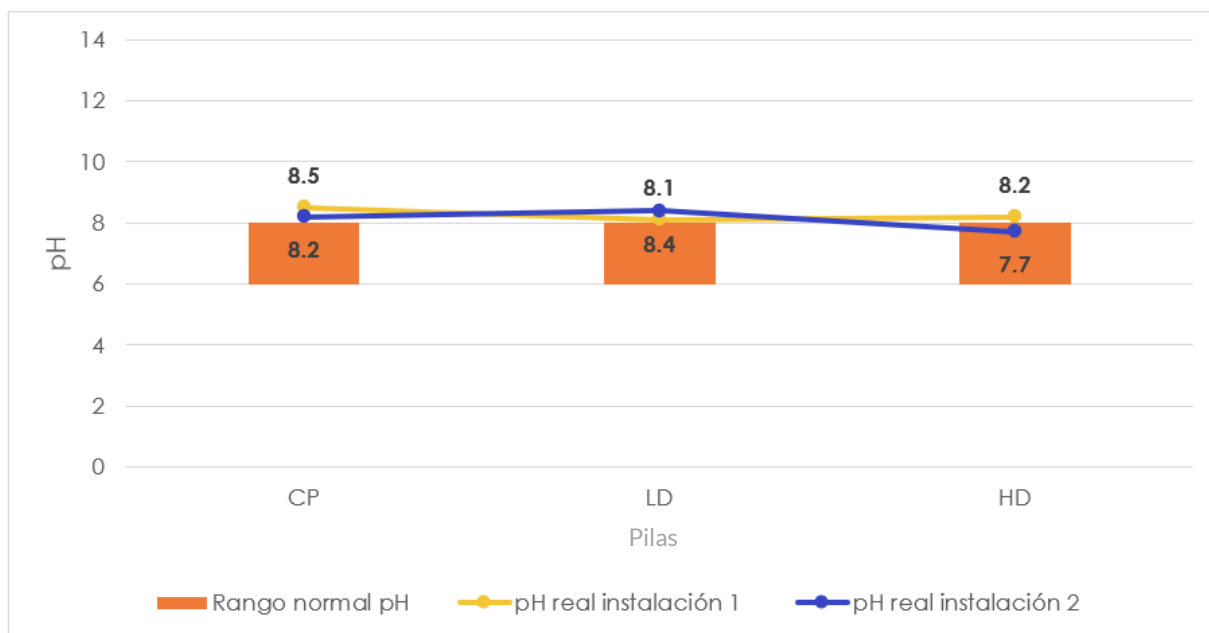
Gráfica 3.4: Contenido de humedad de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2



pH

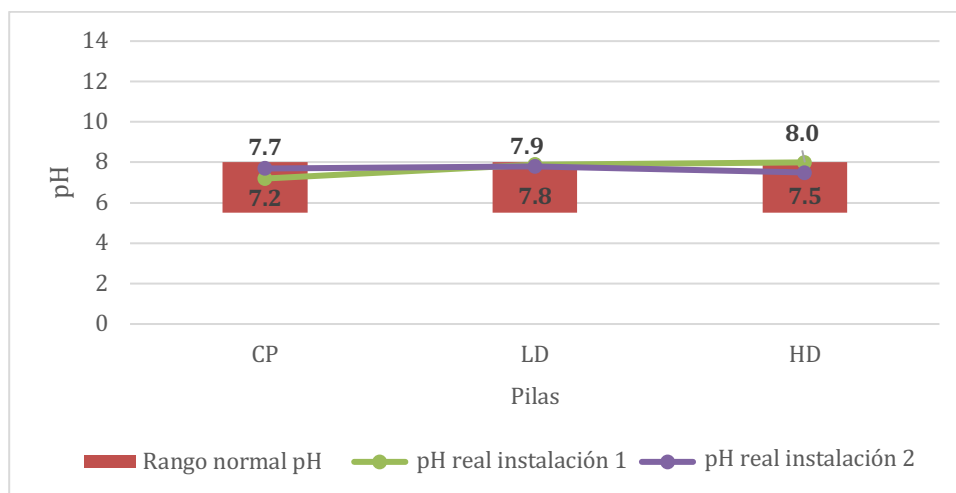
La Gráfica 3.5 muestra los niveles de pH de la composta terminada para cada pila en la instalación 1 y la instalación 2. Las pilas de la instalación 1 presentan valores de pH de entre 8.1 y 8.5, lo que indica que son ligeramente alcalinas; la escasa variación observada en el nivel de pH entre las tres pilas y el hecho de que el valor más alto corresponda a la pila de control sugieren que los materiales de envasado compostables probablemente no tuvieron un efecto medible sobre el pH de la composta. De manera similar, en la instalación 2, las tres pilas muestran valores de pH ligeramente alcalinos, de entre 7.7 y 8.4. La baja variabilidad en el nivel de pH entre éstas indica que los materiales de prueba compostables no tuvieron un efecto medible sobre el pH de la composta.

Gráfica 3.5: Niveles de pH de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2



La Gráfica 3.6 muestra los niveles de pH de la materia orgánica insumo del proceso para cada pila en ambas instalaciones. Todas las pilas de la instalación 1 presentan valores de pH entre 7.2 y 8.0, lo que indica que son ligeramente alcalinas. Lo mismo puede decirse de las pilas en la instalación 2, cuyos valores de pH se ubicaron entre 7.5 y 7.8 (alcalinidad ligera). Ello, aunado a la escasa variación observada respecto de los niveles de pH registrados luego del proceso de compostaje, sugiere que los materiales de prueba compostables no tuvieron un efecto medible sobre el pH de la composta.

Gráfica 3.6: Niveles de pH de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2



Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Índice de nutrientes

El Cuadro 3.1 presenta los usos recomendados para la composta (en diferentes tipos de suelo) según los distintos índices de nutrientes del producto final, y el *Fuente: Midwest Laboratories (2025), Compost Result Interpretations* [Interpretación de los resultados del compostaje].

Cuadro 3.2 muestra los índices de nutrientes registrados en las instalaciones 1 y 2.

Como se muestra en el *Fuente: Midwest Laboratories (2025), Compost Result Interpretations* [Interpretación de los resultados del compostaje].

Cuadro 3.2, la pila de control (CP) y la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1 presentaron índices de nutrientes de 7.0 y 8.6, respectivamente, lo que indica que la composta de ambas pilas era rica en nutrientes y no presentaba concentraciones elevadas de sodio. Este tipo de composta es más adecuada para su uso en suelos con drenaje deficiente, mala calidad del agua o alto contenido de sales. La pila de dosis baja (LD) de la instalación 1 presentó un índice de nutrientes superior a 10, lo que indica que la composta es apta para su uso en todo tipo de suelos. Dado que los índices de nutrientes de todas las pilas de la instalación 1 fueron favorables y que la variación entre las pilas de control, LD y HD es baja, resulta poco probable que los materiales de envasado compostables hayan tenido un efecto medible sobre los índices de nutrientes de la composta terminada.

De acuerdo con el *Fuente: Midwest Laboratories (2025), Compost Result Interpretations* [Interpretación de los resultados del compostaje].

Cuadro 3.2, las pilas de control (CP), de dosis baja (LD) y de dosis alta (HD) de la instalación 2 presentaron índices de nutrientes de 1.4, 2.0 y 1.7, respectivamente, lo que indica que en la composta terminada de las tres pilas se registraron altas concentraciones de sodio. Este resultado podría atribuirse a los bajos niveles de humedad observados en estas pilas, ya que la humedad es un factor clave tanto en el movimiento de sustancias dentro de las pilas de compostaje como en la disponibilidad de nutrientes en la materia orgánica para los microorganismos (EPA, 2016). Asimismo, dado que la variación entre los índices de nutrientes de las pilas CP, LD y HD de la instalación 2 es baja, resulta poco probable que los materiales de envasado compostables hayan tenido un efecto medible sobre los índices de nutrientes de la composta terminada.

Cuadro 3.1: Uso recomendado (tipos de suelo) según el índice de nutrientes de la composta

Índice de nutrientes	Uso recomendado
1	Se trata de una composta posiblemente dañada por salinidad excesiva; no se recomienda su uso.
2-5	Uso en suelos con excelentes características de drenaje, buena calidad del agua y bajo contenido de sales.
6-10	Puede utilizarse en suelos con drenaje deficiente, mala calidad del agua o alto contenido de sales.
>10	Apta para todo tipo de suelos.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Fuente: Midwest Laboratories (2025), *Compost Result Interpretations* [Interpretación de los resultados del compostaje].

Cuadro 3.2: Índices de nutrientes de la composta terminada en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2

Pila	Instalación 1	Instalación 2
Pila de control	7.0	1.4
Pila de dosis baja	>10	2.0
Pila de dosis alta	8.6	1.7

Relación carbono-nitrógeno (C/N)

El Cuadro 3.3 presenta la relación C/N de la composta terminada y de la materia orgánica insumo del proceso para cada pila en ambas instalaciones.

La relación C/N ideal para la composta terminada se sitúa entre 10:1 y 20:1 (Midwest Laboratories, 2025). La composta con una relación C/N elevada (exceso de carbono) se descompone más lentamente, mientras que una relación C/N baja (exceso de nitrógeno) puede dificultar el manejo de las pilas. En la instalación 1, las relaciones C/N de la composta terminada oscilaron entre 13:1 y 20:1, y en la instalación 2 entre 15:1 y 18:1; en ambos casos, los valores se ubicaron dentro del rango ideal para composta terminada.

La relación C/N óptima de la materia orgánica utilizada como insumo para un compostaje rápido se encuentra entre 25:1 y 40:1, con un rango aceptable de 20:1 a 60:1 (Midwest Laboratories, 2025). En la instalación 1, las relaciones C/N de dicha materia variaron entre 18:1 y 20:1, todas fuera del rango óptimo para un compostaje rápido, pero dentro del rango aceptable para las pilas de dosis baja y alta (LD y HD), aunque no así para la pila de control (CP). En la instalación 2, las tres pilas registraron valores dentro del rango aceptable de relación C/N para la materia orgánica insumo, y las pilas CP y HD se encontraron dentro del rango óptimo para un compostaje rápido.

Cuadro 3.3: Relaciones C/N de la composta terminada y de la materia orgánica insumo del proceso en las pilas de control, dosis baja y dosis alta de las instalaciones 1 y 2

Instalación	CP	LD	HD
Instalación 1: composta terminada	13:1	13:1	20:1
Instalación 2: composta terminada	18:1	15:1	18:1
Instalación 1: materia orgánica insumo del proceso	18:1	20:1	20:1
Instalación 2: materia orgánica insumo del proceso	33:1	20:1	32:1

Materia orgánica

El Cuadro 3.4 presenta el contenido de materia orgánica de la composta final en las tres pilas de ambas instalaciones. Un contenido de materia orgánica superior a 20 por ciento, sobre una base de peso seco, se considera deseable para la composta terminada (Midwest Laboratories, 2025).

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

En la instalación 1, el contenido de materia orgánica osciló entre 68 y 77 por ciento, mientras que en la instalación 2 se situó entre 12 y 29 por ciento. La pila de control (CP) de la instalación 2 presentó un contenido de materia orgánica de 12 por ciento, valor inferior al rango deseable. No obstante, las pilas de dosis baja y dosis alta (LD y HD, respectivamente) de esta instalación presentaron contenidos de materia orgánica superiores a 20 por ciento, lo que sugiere que los materiales de envasado compostables no tuvieron un impacto en el contenido de materia orgánica de la composta terminada.

Cuadro 3.4: Contenido de materia orgánica de la composta terminada (porcentaje) en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de las instalaciones 1 y 2, sobre una base de peso seco

Instalación	Pila de control (%)	Pila de dosis baja (%)	Pila de dosis alta (%)
Instalación 1	77	68	72
Instalación 2	12	22	29

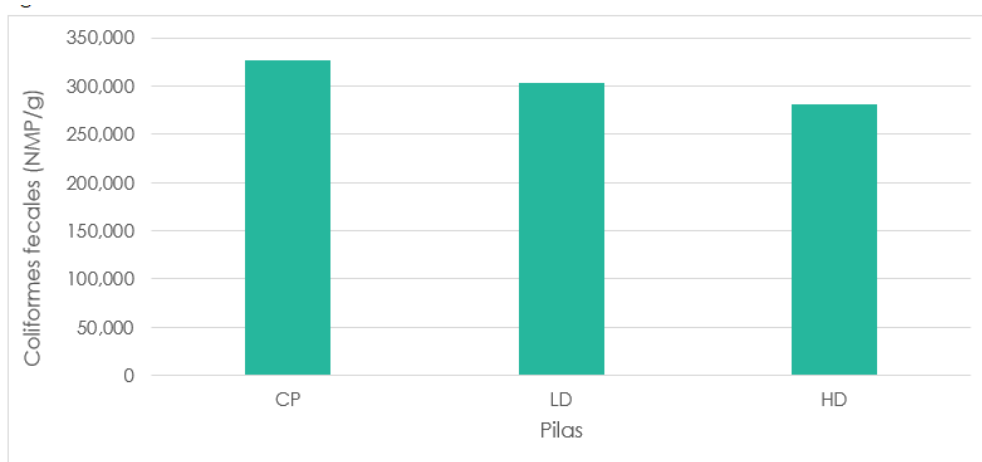
3.1.2 Propiedades biológicas y físicas

Como se mencionó previamente, las propiedades biológicas y físicas se analizaron sólo para las pilas de la instalación 1.

Entre los resultados más relevantes se observó que tanto los coliformes fecales como la salmonela en la composta se encontraron por encima de los límites de detección. Los coliformes fecales son un subgrupo de las bacterias coliformes que suelen originarse en los intestinos de animales de sangre caliente. La salmonela corresponde a un género de bacterias que se encuentra habitualmente en el tracto intestinal de animales —con mayor frecuencia en aves de corral— y puede causar distintos tipos de infecciones.

La Gráfica 3.7 muestra la concentración de coliformes fecales detectada en cada una de las pilas de composta de la instalación 1. Las tres pilas presentaron concentraciones de coliformes fecales significativamente superiores al límite de detección (0.20 NMP/g en composta, donde NMP = número más probable). La mayor concentración de coliformes fecales (326,966 NMP/g) se registró en la pila de control (CP), seguida de la pila de dosis baja (LD) (303,642 NMP/g) y la pila de dosis alta (HD) (280,754 NMP/g). Teniendo en cuenta que la mayor presencia de coliformes fecales se observó en la pila de control y que en las otras dos pilas se identifica una tendencia decreciente conforme aumenta la dosificación, es poco probable que la presencia de coliformes fecales en las pilas de la instalación 1 sea resultado de los materiales de envasado compostables. No obstante, cabe señalar que los niveles detectados son considerablemente más altos que los observados en dicha instalación en análisis previos. Por ello sería necesaria una investigación adicional para comprender con plena claridad las razones de estas concentraciones elevadas.

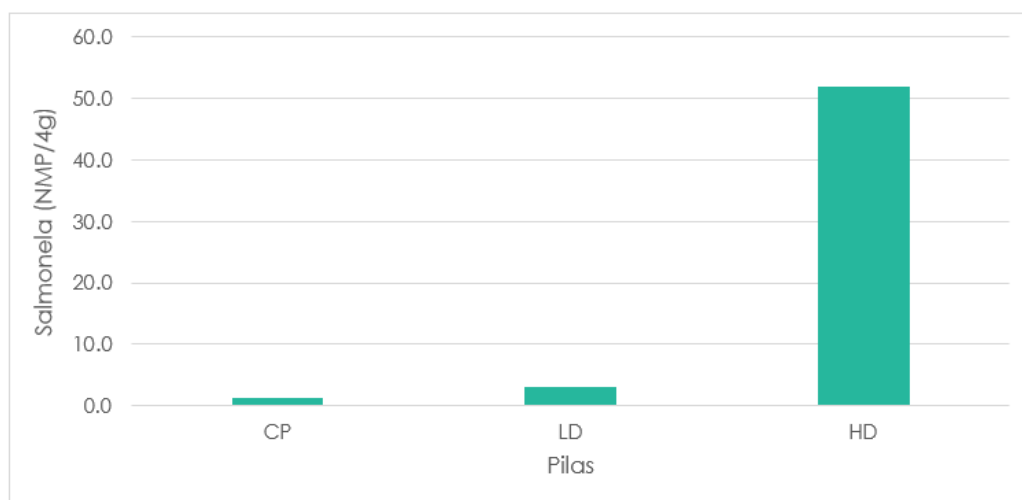
Gráfica 3.7: Presencia de coliformes fecales en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1



La Gráfica 3.8 muestra la concentración de salmonela detectada en cada una de las pilas de composta de la instalación 1. Las tres pilas presentaron concentraciones de salmonela superiores al límite de detección (1.2 NMP/4 g en composta). La mayor concentración de salmonela (52 NMP/4 g) se registró en la pila de dosis alta (HD), seguida de la pila de dosis baja (LD) (3 NMP/4 g) y la pila de control (CP) (<1.2 NMP/4 g).

Cabe señalar que la instalación nunca había registrado previamente concentraciones de salmonela por encima del límite de detección en ninguna de sus pilas. Debido a que la presencia de salmonela en las pilas de la instalación 1 aumentó conforme se incrementaron las cantidades dosificadas de los materiales de prueba compostables, es posible que dichos materiales hayan contribuido a la retención o presencia de salmonela en las pilas LD y HD de la instalación 1. No obstante, existen otros factores que podrían explicar la presencia de salmonela, como la materia orgánica utilizada por la instalación como insumo, la cual es intrínsecamente variable. Por ello sería necesaria una investigación adicional para determinar la causa específica de este hallazgo.

Gráfica 3.8: Presencia de salmonela en las pilas de control, de dosis baja y de dosis alta de la instalación 1



Las pruebas de propiedades físicas realizadas en la instalación 1 incluyeron la detección en la composta terminada de microplásticos (rígidos y en forma de película) y otros contaminantes, tales como fragmentos de metal y vidrio y objetos punzocortantes. Estos análisis se llevaron a cabo en Midwest Laboratories, conforme a las directrices del conjunto de métodos TMECC, e incluyeron el uso de escaneo digital y procesamiento de imágenes para cuantificar el área superficial relativa de plásticos en forma de película por unidad de volumen de composta (USCC, 2002).

Los materiales de envasado compostables, como los utilizados en este estudio piloto, están diseñados para descomponerse en sistemas de compostaje; sin embargo, algunos estudios han señalado que estos materiales pueden fragmentarse en microplásticos en lugar de degradarse por completo. La presencia de microplásticos en la composta puede generar efectos adversos en los suelos donde se aplica, y diversas investigaciones han demostrado que los microplásticos pueden reducir la biomasa radicular y alterar procesos fisiológicos de las plantas, lo que a su vez puede traducirse en una disminución de la productividad vegetal (Hasan, 2025).

En las muestras analizadas de las pilas de la instalación 1 no se detectaron microplásticos ni ninguno de los otros contaminantes mencionados.

3.2 Repercusiones en las operaciones de las instalaciones

Además de analizar los impactos físicos y químicos de los envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables en el producto final, este estudio piloto tuvo como objetivo evaluar los desafíos operativos para las personas operadoras de las instalaciones. En última instancia, los hallazgos de estas pruebas piloto pueden ayudar a las instalaciones de compostaje a considerar si conviene ampliar la aceptación de materiales de envasado certificados como compostables. A continuación se describen los impactos operativos

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

que ambas instalaciones mencionaron con mayor frecuencia durante el desarrollo del estudio piloto.

Impacto en el personal y condiciones en sitio

- Personal operativo de las dos instalaciones participantes señaló la necesidad de contar con mano de obra adicional, en especial para localizar y reincorporar a las pilas los materiales desplazados por el viento o que, por otros motivos, salieron de la pila. En ambas instalaciones se observó que, a lo largo del proceso de compostaje, los materiales de envasado compostables tendían a migrar hacia el exterior de las pilas. La **Error! Reference source not found.** ilustra este fenómeno en la instalación 1. El personal abordó el problema recuperando los productos de prueba que habían salido de la pila, rastrillándolos y reincorporándolos al material en proceso. Este problema pudo haberse acentuado durante el estudio piloto, dado que los materiales se encontraban relativamente limpios al ser agregados y, por lo tanto, eran más ligeros, a diferencia de los envases que previamente han sido utilizados para contener alimentos o bebidas y que suelen depositarse junto con residuos alimentarios antes enviarse a compostaje. La trituración previa de los materiales de envasado compostables podría generar condiciones distintas y modificar los impactos observados; no obstante, dicha práctica también implicaría un requerimiento adicional de mano de obra.
- En la instalación 2 también se señaló la necesidad de mano de obra adicional para añadir agua a las pilas debida a la sequedad observada, condición atribuible a diversos factores, como un clima seco, el menor tamaño de las pilas y la incorporación de productos compostables.

Gráfica 3.9: Ejemplo de acumulación de materiales de envasado compostables en la parte externa de la pila HD de la instalación 1



En determinados momentos, las temperaturas registradas en algunas pilas de ambas instalaciones fueron inferiores a las consideradas ideales. En el caso de la instalación 2, esta situación podría deberse a la sequedad del material; en la instalación 1 se determinó que las lecturas bajas obedecían a una defectuosa sonda de temperatura, ya que inmediatamente después de su reemplazo las temperaturas medidas se ubicaron dentro del rango ideal.

Desafíos y limitaciones técnicas

- En la instalación 1 se registraron lecturas de oxígeno poco uniformes durante el estudio piloto, a causa de una sonda de oxígeno inestable; no obstante, la instalación se aseguró de realizar un número suficiente de mediciones para estabilizar la sonda y obtener un valor promedio considerado confiable.
- La instalación 2 debió retrasar la conformación de su pila de control (CP) ante la llegada tardía de los productos de prueba.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- Las tasas de dosificación de las pilas de dosis baja (LD) en ambas instalaciones también tuvieron que ajustarse en varias ocasiones al retrasarse la entrega de los productos de prueba.
- La pila de dosis alta (HD) de la instalación 1 se conformó más rápido de lo previsto. La instalación señaló que esto se debió a la incorporación de nuevos clientes comerciales en abril; sin embargo, aun así fue posible integrar todos los materiales de prueba en la pila, manteniendo su tamaño en cerca de 23 m³ (30 yd³).

Percepciones de las personas operadoras de las instalaciones a lo largo del proceso de compostaje

A lo largo del estudio piloto se solicitó a las personas operadoras de las dos instalaciones que compartieran sus percepciones sobre la cantidad de materiales de envasado compostables incorporados a sus pilas. Si bien las tasas de dosificación fueron casi iguales en ambos sitios, se observó lo siguiente:

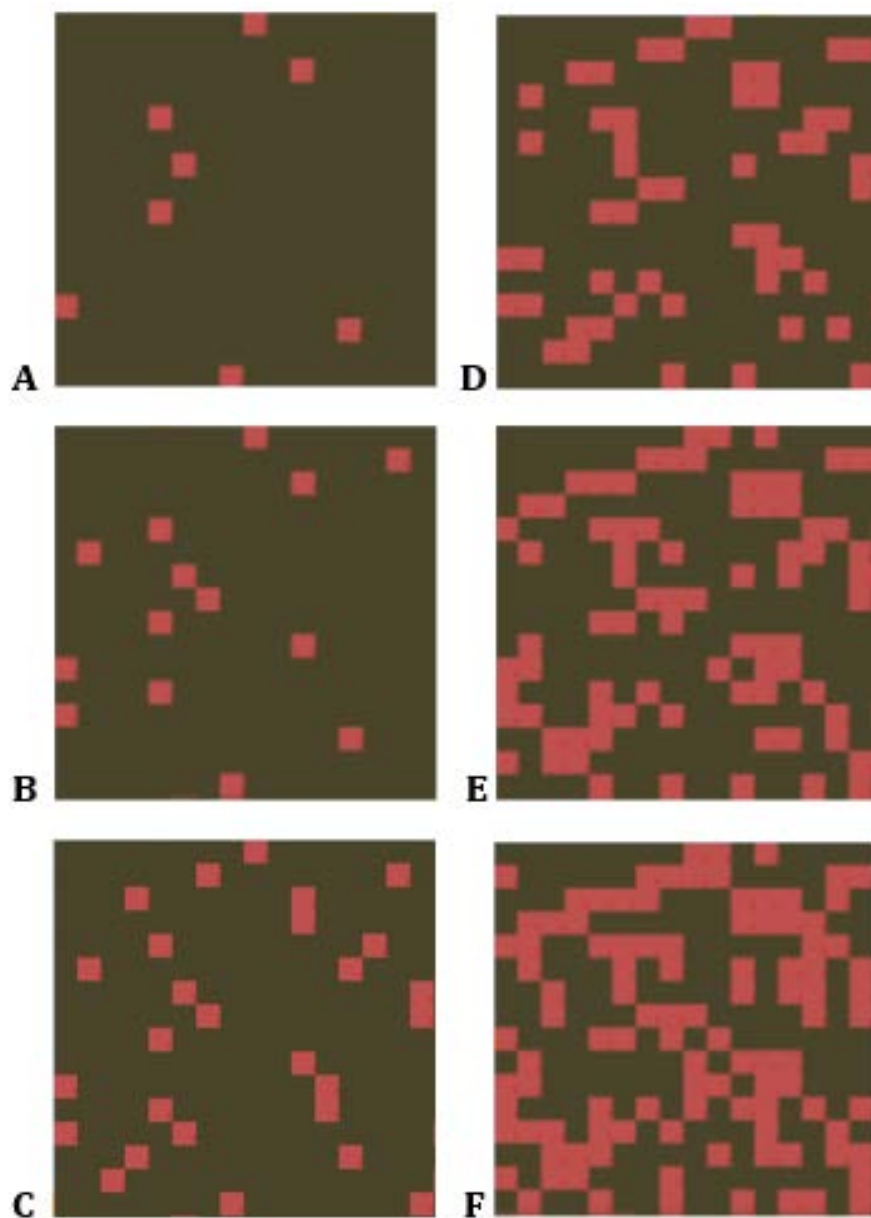
- La instalación 1 consideró que la concentración de materiales de envasado compostables era excesiva en la pila de dosis alta (HD).
- En la instalación 2 se percibió la concentración como normal en ambas pilas.

Estos hallazgos parecen concordar con el hecho de que la instalación 2 —a diferencia de la instalación 1— ya aceptaba materiales compostables antes del estudio piloto.

En las operaciones habituales de las instalaciones, la incorporación de materiales de envasado compostables no está controlada, y las personas operadoras utilizan evaluaciones visuales para estimar la cantidad de materiales presentes en sus pilas de composta. Este tipo de evaluación visual también se emplea con frecuencia para detectar la presencia de otros materiales incorporados no controlados —como contaminantes—, y el ajuste de dichos elementos con base en estas observaciones ayuda a orientar a quienes realizan el compostaje en la conformación de pilas exitosas. Teniendo en cuenta que los materiales de envasado compostables constituyen un elemento incorporado en el compostaje hace apenas relativamente poco tiempo, no se conoce con precisión cómo se comparan las evaluaciones visuales de las personas operadoras con la cantidad real de materiales compostables incorporados a una pila, ni cómo dichas evaluaciones van cambiando conforme avanza el proceso de compostaje.

A lo largo del desarrollo del estudio piloto se solicitó a las personas operadoras realizar evaluaciones visuales periódicas con el fin de establecer una conexión entre la carga visual percibida y las mediciones reproducibles de la cantidad real de materiales de envasado compostables añadidos a las pilas. Para ello compararon la apariencia visual de sus pilas con las imágenes presentadas en la Gráfica 3.10, e identificaron aquella que más se aproximaba a la cantidad de materiales compostables visibles en cada pila. Los elementos resaltados en rojo en la Gráfica 3.10 representan los materiales de envasado compostables, mientras que el color marrón corresponde al resto de la pila de composta.

Gráfica 3.10: Clasificación visual de las tasas de dosificación



Nota: Rojo = materiales de envasado compostables; marrón = resto de la pila de composta.

Fuente: Imágenes elaboradas por el equipo de Economía responsable del proyecto.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cada una de las imágenes —de la A a la F— que integran la Gráfica 3.10 representa una tasa de dosificación basada en volumen, que va desde 2.5 por ciento en el recuadro A hasta 40 por ciento en el recuadro F. El Cuadro 3.5 muestra la tasa de dosificación que representa cada imagen.

Cuadro 3.5: Tasas de dosificación de las imágenes representadas en la gráfica 3.10

Imagen	Tasa de dosificación (%)
A	2.5
B	5
C	10
D	20
E	30
F	40

Por su parte, los **Error! Not a valid bookmark self-reference.** y Cuadro 3.7 indican las percepciones de personal de las instalaciones 1 y 2, respectivamente, sobre qué imagen se aproximaba más a la cantidad de materiales de envasado compostables visibles en cada pila, en comparación con la tasa de dosificación real. Las percepciones recogidas entre integrantes del personal de la instalación 1 respecto de la cantidad de materiales de envasado compostables incorporados en ambas pilas, tras el último volteo, fueron cercanas a las tasas de dosificación reales. En contraste, en la instalación 2 se percibió que la pila de dosis baja (LD) contenía una cantidad mayor de materiales de envasado compostables de la que efectivamente se había dosificado, con base en las tasas de dosificación calculadas por volumen triturado.

Cuadro 3.6: Comparación entre las tasas de dosificación visualizadas y reales en la instalación 1

Fase	Concentración en la pila LD (%)	Concentración en la pila HD (%)
Tras la dosificación	D = 20	F = 40
Después del primer volteo	D = 20	F = 40
Luego del segundo volteo	C = 10	E = 30
Después del tercer volteo	B = 5	C = 10
Tras el volteo final	A/B = 2.5-5	C = 10
Tasa de dosificación real (volumen triturado)	6.8	11.4

Cuadro 3.7: Comparación entre las tasas de dosificación visualizadas y reales en la instalación 2

Fase	Concentración en la pila LD (%)	Concentración en la pila HD (%)
Después de la dosificación	E = 30	E = 30
Después del proceso PFRP	D = 20	D = 20
Antes del tamizaje	C = 10	C = 10
Tasa de dosificación real (volumen triturado)	5.8	11.6

Percepciones de las personas que operan las instalaciones sobre la calidad de la composta terminada

Se solicitó a las personas operadoras en ambas instalaciones que comentaran su percepción sobre la calidad de la composta al final del estudio piloto, una vez tamizadas las pilas. La persona operadora de la instalación 1 señaló que se podía detectar que la pila de dosis baja (LD) contenía materiales de envasado compostables y que resultaba fácil distinguirlos del resto de la pila antes del tamizaje. No obstante, añadió que la composta terminada presentaba buen aspecto y que no se observaron fragmentos visibles de dichos materiales. Por cuanto a la pila de dosis alta (HD), indicó que los residuos de materiales de envasado compostables presentes daban la impresión de ser una cantidad excesiva, y que en su instalación nunca se permitiría incluir semejante volumen de tales materiales. Asimismo, mencionó que aun después del cribado pudo observar fragmentos de materiales de envasado compostables en la pila HD. La Gráfica 3.11 muestra las pilas LD y HD de la instalación 1 al final del proceso de compostaje, antes del tamizaje.

Gráfica 3.11: Pilas de dosis baja (LD) y alta (HD) —izquierda y derecha, respectivamente— de la instalación 1 el día del tamizaje, antes de dar inicio a este proceso



La persona operadora de la instalación 2 señaló que los residuos alimentarios en la pila de dosis baja (LD) se habían compostado por completo; sin embargo, se observó una desintegración de los materiales de envasado compostables ligeramente menor de lo habitual. Se sugirió que este comportamiento podría deberse a los bajos niveles de humedad registrados en dicha pila. Esta interpretación cuenta con cierto respaldo en el estudio de Closed Loop Partners (CLP, 2024) titulado *Breaking it Down: The Realities of Compostable Packaging Disintegration in Composting Systems* [Análisis detallado de las realidades de la desintegración de los materiales de envasado compostables en los sistemas de compostaje], el cual indica que niveles semanales de humedad

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

superiores a 50 por ciento se asocian con una mayor desintegración de envases alimentarios compostables y productos de fibra. La persona operadora realizó comentarios similares respecto a la pila de dosis alta (HD), aun cuando esta pila presentó mayores niveles de humedad que la pila LD. La Gráfica 3.12 muestra las pilas LD y HD de la instalación 2 al final del proceso de compostaje, antes del tamizaje.

Gráfica 3.12: Pilas de dosis baja (LD) y alta (HD) —izquierda y derecha, respectivamente— de la instalación 2 el día del tamizaje, antes de dar inicio a este proceso



Impactos en costos para las instalaciones

La incorporación de materiales de envasado compostables en las operaciones de compostaje introduce costos operativos adicionales, si bien éstos suelen ser difíciles de cuantificar con precisión para las instalaciones. De acuerdo con la retroalimentación proporcionada por la instalación 2, el impacto más claramente medible corresponde a la mano de obra asociada a la recuperación de materiales que se desplazan fuera de la pila, lo cual se estimó de manera aproximada en una hora de trabajo por cada 8 m³ (10 yd³) de materiales de envasado compostables incorporados.

La instalación 1 hizo mayor énfasis en la carga adicional de trabajo, y estimó que la incorporación de materiales compostables prácticamente duplicó los tiempos de procesamiento y gestión: se añadieron 40 horas a las 35 horas habituales de procesamiento y gestión a lo largo de un periodo de 16 semanas. Este tiempo adicional se atribuyó principalmente a la necesidad de retirar residuos visibles a diario y de separar materiales compostables durante el tamizaje. Otro factor relevante fue el manejo de materiales ligeros durante la mezcla. Asimismo, a medida que aumenta el volumen total procesado, el tiempo y los costos se incrementan de forma directamente proporcional a la cantidad de materiales compostables y de residuos en general. Factores adicionales, como la condición de la materia orgánica insumo entrante (en bolsas, suelta o mezclada con residuos alimentarios) y las condiciones ambientales, también pueden influir en los requerimientos de mano de obra, y estos factores son inherentemente variables.

Las diferencias en la percepción de los impactos laborales entre ambas instalaciones probablemente reflejan sus exigencias operativas y prioridades. La instalación 1 otorga una alta prioridad a la calidad de la composta y a la consistencia del producto, y considera que la mano de

obra adicional necesaria para preservar el valor estético de su composta —la cual se vende a un precio *prémium* para sostener una operación de pequeña escala— representa una carga financiera significativa. En contraste, la instalación 2 prioriza atender las demandas de su comunidad, la cual ha adoptado el uso de materiales de envasado compostables, y por ello muestra una mayor aceptación de los requerimientos de manejo adicionales. Las dos instalaciones registran una alta demanda de su producto final y logran comercializar la totalidad de la composta producida. Cabe señalar que la instalación 2 ha recibido compensaciones por parte de los fabricantes de los materiales compostables que acepta, mientras que la instalación 1, hasta la fecha, ha optado por no seguir ese esquema. Estas diferencias sugieren que el impacto percibido de la mano de obra adicional depende en gran medida de los objetivos y enfoques operativos de cada instalación. Por ello, las decisiones relacionadas con la incorporación de materiales de envasado compostables deberían tomarse en coordinación con las instalaciones, y no imponerse de manera externa.

En términos generales, el manejo de materiales de envasado compostables implica una carga adicional de trabajo, cuyo impacto financiero puede variar considerablemente entre instalaciones. En operaciones industriales de compostaje de mayor envergadura, estos costos podrían escalar de forma distinta, dependiendo del tamaño de las pilas, el equipamiento disponible y las capacidades de manejo automatizado; además, las instalaciones de mayor tamaño suelen contar con más recursos para absorber estos incrementos graduales en las necesidades de mano de obra.

3.3 Resultados de desintegración

Las tasas de desintegración se estimaron utilizando un método de cálculo (descrito en el apéndice Apéndice 1: ") que consiste en comparar el peso húmedo final promedio de los materiales de envasado compostables con su peso húmedo inicial previo al compostaje. El cálculo se realiza por tipo de producto. El peso húmedo inicial se determinó saturando los materiales con agua y permitiendo que se secaran antes de pesarlos. Se utilizó el peso húmedo —en lugar del peso seco—, ya que este enfoque refleja de manera más fiel lo que ocurre dentro de la pila de compostaje y proporciona un análisis más representativo de las condiciones reales.

Cabe señalar que los pesos utilizados para calcular estas tasas de desintegración se basan en muestras tomadas de cada una de las pilas de composta (entre 3 y 5 por ciento del volumen de cada pila se muestreó).

El Cuadro 3.8 presenta las tasas de desintegración de cada tipo de material de envasado compostable en cada pila de prueba en ambas instalaciones, y los principales resultados se resumen a continuación:

- **Etiquetas adhesivas para productos frescos.** Los restos de etiquetas de frutas y verduras resultaron difíciles de identificar al tratar de separarlas de las muestras de composta, lo que sugiere que prácticamente todas las etiquetas incorporadas se desintegraron. Las tasas de desintegración observadas en todas las pilas fueron de 100 por ciento.
- **Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches.** Se identificaron pequeños fragmentos de estos envoltorios en las muestras de todas las pilas de prueba,

siendo éstos más numerosos en la pila de dosis baja (LD) de la instalación 2. Las tasas de desintegración calculadas oscilaron entre 83 y 95 por ciento.

- **Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA.** Estos envases mostraron una desintegración variable en todas las pilas de prueba. En la instalación 1, la pila LD presentó una tasa de desintegración de ~96 por ciento, mientras que la pila HD registró sólo alrededor de 86 por ciento. En la instalación 2 también se observó una disminución en las tasas de desintegración entre la pila HD y la pila LD (de cerca de 80 por ciento a alrededor de 62), lo cual podría deberse a los bajos niveles de humedad registrados en la pila LD, condición que afectó la totalidad de tipos de materiales de envasado compostables.
- **Vasos de papel con recubrimiento de PLA.** Estos productos también mostraron una desintegración variable en las pilas de prueba. En la instalación 1, la pila LD presentó una tasa de desintegración de ~95 por ciento, mientras que el valor correspondiente a la pila HD fue de ~84 por ciento. Este patrón sugiere que una mayor cantidad de materiales de envasado compostables influyó negativamente en la desintegración de estos productos, de manera similar a lo observado para los vasos de fibra con recubrimiento de PLA. En contraste, en la instalación 2, la pila LD mostró una tasa de desintegración de ~65 por ciento, mientras que la pila HD alcanzó una tasa de ~88 por ciento.
- **Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA.** Estos vasos también presentaron variabilidad en la desintegración entre las pilas de prueba. En la instalación 1, la pila LD registró una tasa de desintegración de ~77 por ciento, mientras que la pila HD presentó una tasa de 73 por ciento, lo que sugiere que una mayor cantidad de materiales de envasado compostables tuvo un efecto negativo en la desintegración de estos productos. En la instalación 2, la pila LD mostró tasas de desintegración de ~51 por ciento, mientras que la pila HD registró tasas superiores a 78 por ciento.

Estas tasas de desintegración se presentan en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.8: Tasas de desintegración basadas en peso húmedo

Material de envasado compostable	Pila LD instalación 1 (%)	Pila HD instalación 1 (%)	Pila LD instalación 2 (%)	Pila HD instalación 2 (%)
Vaso de papel con recubrimiento de PLA	95	84	65	88
Vaso de papel con doble recubrimiento de PLA	77	73	51	78
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	96	86	62	80
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	95	89	83	93
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	100	100	100	100

Se calcularon intervalos de confianza para mostrar el grado de certeza asociado a la tasa promedio de desintegración de cada material, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

- Primero se calculó la tasa promedio de desintegración (media) sumando los valores de las réplicas y dividiendo ese total entre el número de muestras.
- A continuación se midió la variación entre las réplicas, lo cual indica el grado de consistencia o variabilidad de los resultados para cada material.
- A partir de esa variación y del número de muestras se utilizó la función estadística integrada de Excel para calcular un intervalo de confianza de 95 por ciento.

Este intervalo proporciona un límite superior e inferior alrededor del valor promedio y representa el rango dentro del cual probablemente se encontraría la tasa “real” de desintegración si la prueba se repitiera numerosas veces bajo condiciones similares.

- Un intervalo de confianza estrecho indica que las mediciones repetidas fueron muy similares, lo que se traduce en una alta confianza en el resultado promedio.
- Un intervalo de confianza amplio indica una mayor variabilidad de los resultados entre las réplicas, por lo que el valor promedio real podría ser mayor o menor que la media calculada.

Los intervalos de confianza calculados para cada pila, así como la interpretación de lo que estos intervalos significan para cada tipo de material de envasado compostable en cada pila, se presentan en los Cuadro 3.9,

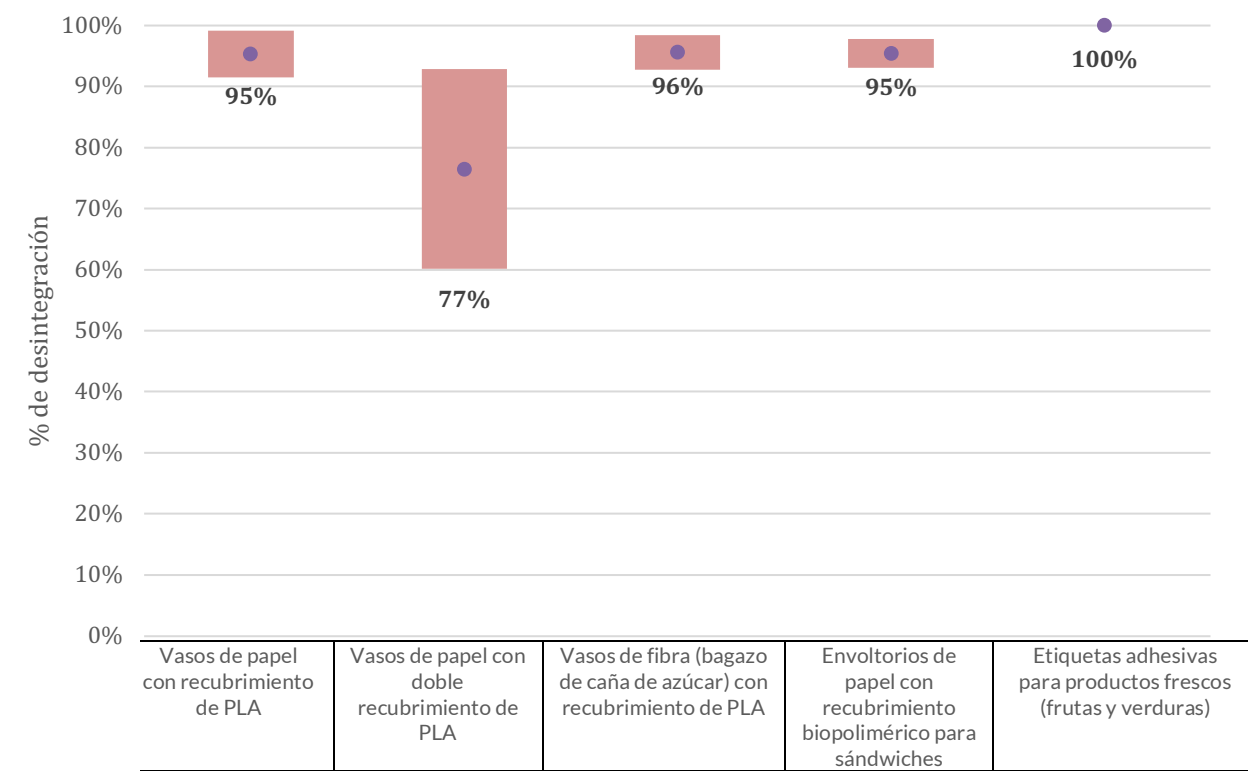
Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cuadro 3.10, **Error! Reference source not found.** y Cuadro 3.12. Estos intervalos también se ilustran en las gráficas 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16.

Cuadro 3.9: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1

Material de envasado compostable	Media (%)	IC inferior (%)	IC superior (%)	Interpretación
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	95.32	91.53	99.12	IC muy estrecho → Desempeño de desintegración altamente uniforme en torno a 95%
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	76.52	60.13	92.91	IC amplio → Desintegración variable, lo que sugiere una degradación poco uniforme o posible variación en la medición
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	95.60	92.74	98.47	IC estrecho → Desempeño estable y confiable entre réplicas
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	95.41	93.07	97.76	IC estrecho → Resultados reproducibles y degradación uniforme
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	100.00	100.00	100.00	Sin variación → Desintegración completa en todas las réplicas

Gráfica 3.13: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1

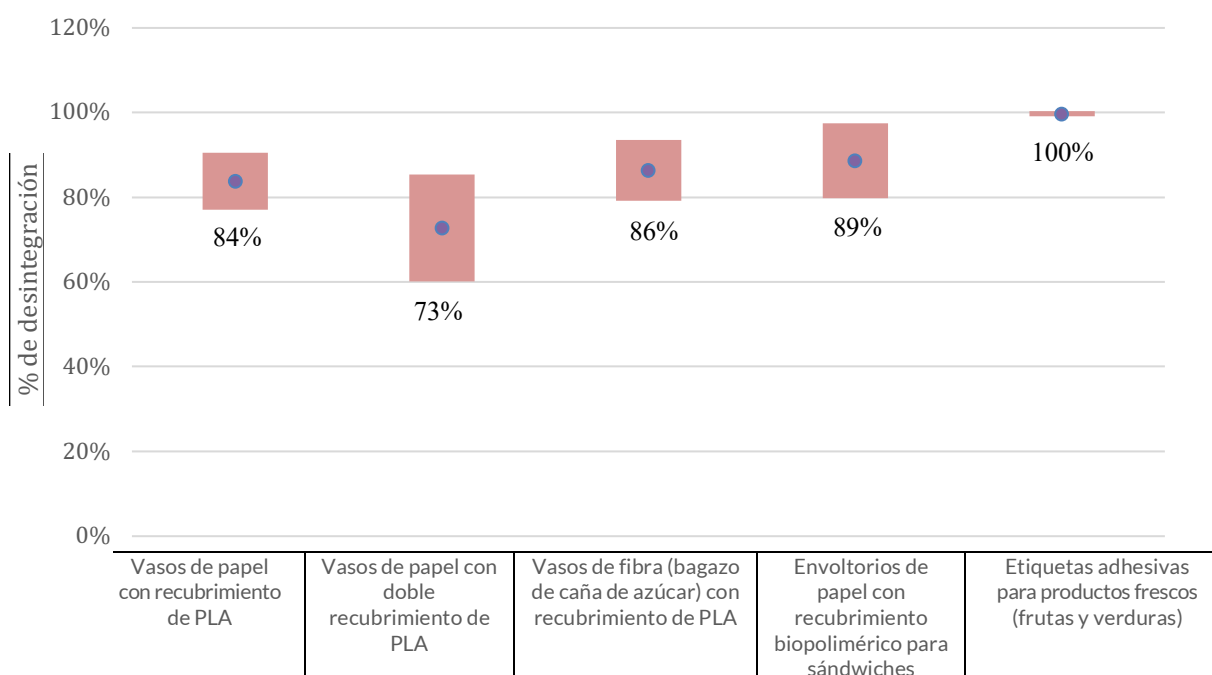


Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cuadro 3.10: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1

Material de envasado compostable	Media (%)	IC inferior (%)	IC superior (%)	Interpretación
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	83.81	77.07	90.55	IC estrecho → Desempeño de desintegración uniforme, con variabilidad limitada entre réplicas
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	72.70	60.09	85.32	IC amplio → Desintegración variable, lo que sugiere una degradación desigual o mayor variabilidad entre réplicas
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	86.42	79.24	93.59	IC moderado → Desempeño generalmente confiable, aunque se observa cierta variabilidad en la degradación
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	88.67	79.84	97.49	IC moderado → Desintegración promedio sólida, con ligera variabilidad entre réplicas
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	99.73	100.00	100.00	Sin variación → Desintegración completa observada en todas las réplicas

Gráfica 3.14: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 1

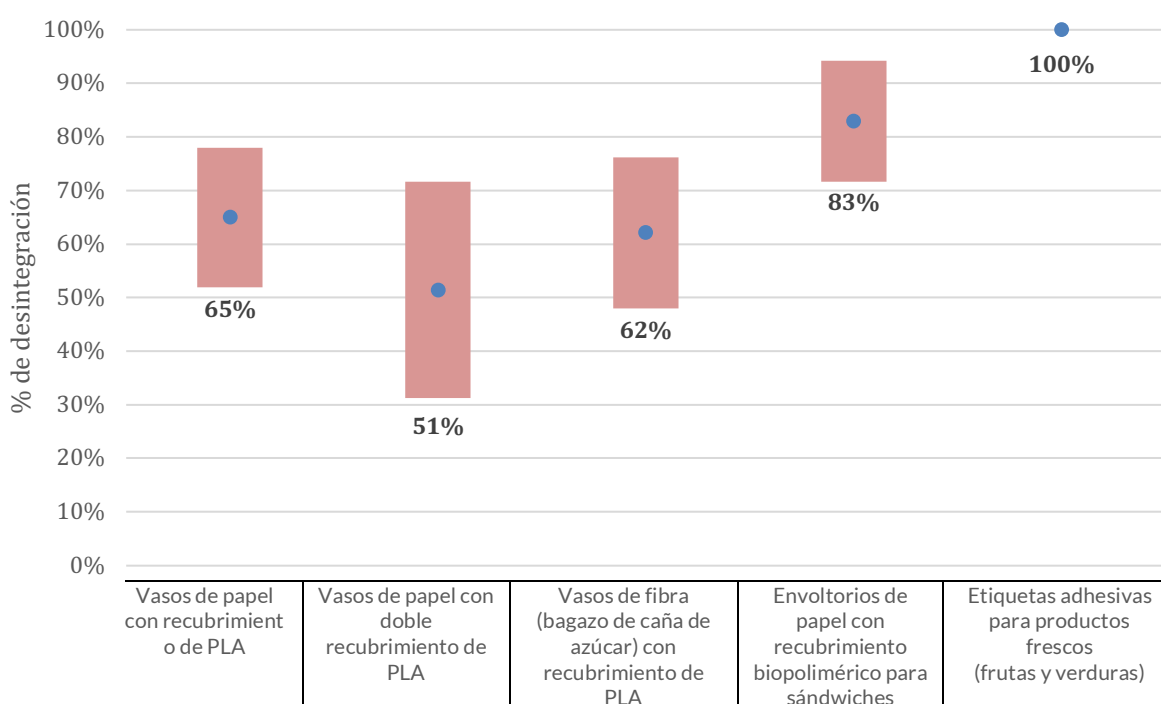


Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cuadro 3.11: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 2

Material de envasado compostable	Media (%)	IC inferior (%)	IC superior (%)	Interpretación
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	64.96	52.00	77.92	IC moderado → Se observó una desintegración parcial, con cierta variabilidad, lo que indica una descomposición incompleta en varias réplicas
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	51.44	31.29	71.60	IC amplio → Alta variabilidad, lo que sugiere una degradación poco uniforme y un menor desempeño general del proceso de compostaje
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	62.12	48.00	76.25	IC moderado → Desintegración constante pero incompleta, con cierta variabilidad entre réplicas
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	82.94	71.65	94.22	IC más estrecho → Desempeño sólido de desintegración, con resultados relativamente uniformes entre réplicas
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	100.00	100.00	100.00	Sin variación → Desintegración completa observada en todas las réplicas

Gráfica 3.15: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis baja (LD) de la instalación 2



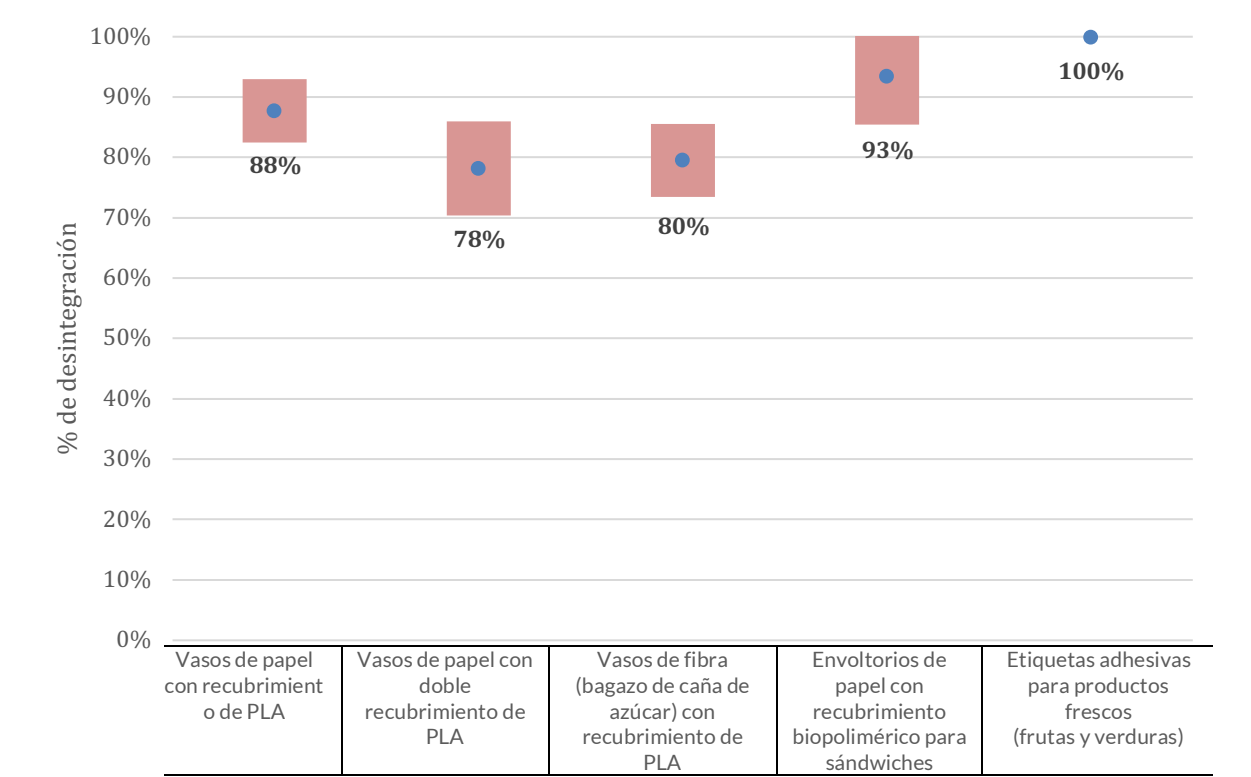
Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Cuadro 3.12: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 2

Material de envasado compostable	Media (%)	IC inferior (%)	IC superior (%)	Interpretación
Vasos de papel con recubrimiento de PLA	87.73	82.47	92.99	IC estrecho → Desempeño de desintegración altamente uniforme entre réplicas, lo que indica un comportamiento de compostaje estable
Vasos de papel con doble recubrimiento de PLA	78.21	70.41	86.01	IC moderado → Desempeño general confiable, con cierta variabilidad entre réplicas, lo que sugiere una degradación ligeramente desigual
Vasos de fibra (bagazo de caña de azúcar) con recubrimiento de PLA	79.52	73.49	85.55	IC moderado → Tendencia de desintegración uniforme, con variabilidad menor, que muestra una degradación confiable en las condiciones de prueba
Envoltorios de papel con recubrimiento biopolimérico para sándwiches	93.49	85.49	101.49	IC estrecho → Desintegración sólida y uniforme, con todas las réplicas alcanzando niveles de degradación elevados
Etiquetas adhesivas para productos frescos (frutas y verduras)	100.00	100.00	100.00	Sin variación → Desintegración completa observada en todas las réplicas

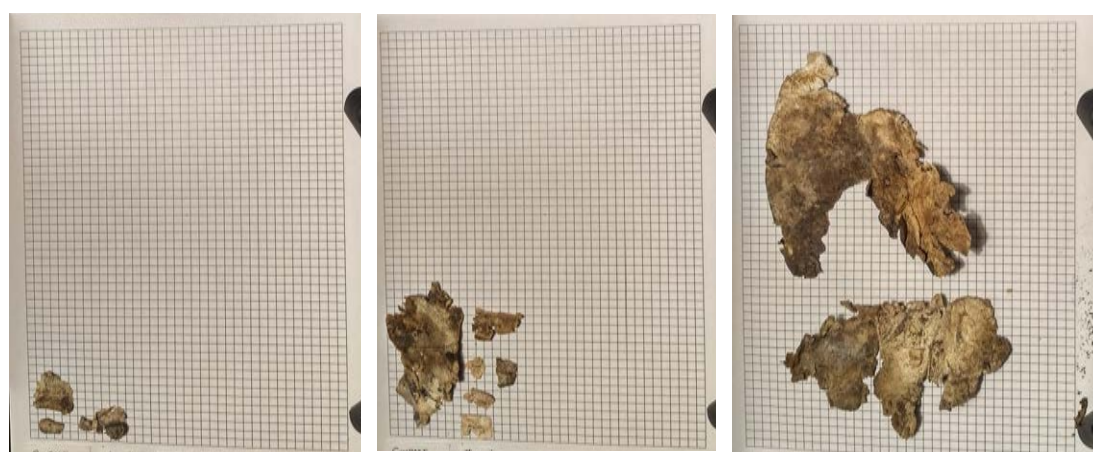
Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Gráfica 3.16: Intervalos de confianza (IC) de las tasas de desintegración para la pila de dosis alta (HD) de la instalación 2



A continuación (gráfica 3.17) se presentan algunas imágenes de materiales de envasado compostables encontrados en las muestras tamizadas de la pila LD de la instalación 1.

Gráfica 3.17: Residuos de vasos con recubrimiento de PLA (izquierda), vasos con doble recubrimiento de PLA (centro) y vasos de fibra con recubrimiento de PLA (derecha) encontrados en la pila de dosis baja (LD) de la instalación 1



4. Conclusiones y recomendaciones

En términos generales, el estudio piloto aportó información valiosa sobre las repercusiones que la incorporación de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables tiene en la calidad de la composta y en los procesos operativos de las instalaciones de compostaje. Se detectaron compuestos de PFAS en las pilas de composta de ambas instalaciones; sin embargo, las concentraciones se ubicaron por debajo de los umbrales reglamentarios vigentes, lo que indica un riesgo inmediato mínimo para la calidad de la composta. Las pruebas biológicas realizadas en la instalación 1 revelaron concentraciones elevadas de salmonela asociadas con mayores dosis de materiales de envasado compostables, lo que sugiere la necesidad de investigaciones ulteriores para comprender a plenitud los impactos microbiológicos. Desde el punto de vista operativo, ambas instalaciones experimentaron incrementos en la carga de trabajo y desafíos de manejo, incluida la manipulación de elementos o fragmentos de materiales ligeros; asimismo, en el marco del estudio piloto se registraron condiciones de sequedad en algunas de las pilas de composta y variabilidad en el desempeño de los equipos, lo que pone de relieve la importancia de una planificación operativa adecuada al integrar materiales de envasado compostables.

Se requiere investigación adicional para evaluar los efectos a largo plazo en la calidad de la composta y en las operaciones de las instalaciones de compostaje, así como para comprender mejor los riesgos asociados con contaminantes emergentes, como los PFAS. Es fundamental dar continuidad a los estudios a efecto de formular directrices con respaldo en datos empíricos y científicos que orienten y sirvan de apoyo a las instalaciones de compostaje interesadas en incorporar materiales de envasado compostables en la materia orgánica insumo de sus procesos.

A continuación se presentan algunas recomendaciones para estudios futuros:

1. **Metodología de dosificación.** En estudios futuros deberá seguirse utilizando y perfeccionando el método de dosificación, dado que refleja las condiciones operativas reales.
2. **Propiedades biológicas.** Se recomienda profundizar en la evaluación de la posible influencia de los materiales de envasado compostables en relación con contaminantes biológicos, como salmonela y coliformes fecales, a fin de determinar si los hallazgos observados en la prueba piloto fueron circunstanciales.
3. **Monitoreo de PFAS.** Tomando en consideración que las PFAS continúan siendo una preocupación ambiental emergente, deberán realizarse pruebas adicionales para determinar si este tipo de compuestos provenientes de materiales de envasado compostables afectan la calidad de la composta. Asimismo, es necesario seguir formulando métodos de ensayo para detectar y analizar con mayor precisión la presencia de PFAS en composta, toda vez que las muestras de ésta no suelen ser homogéneas.
4. **Ampliación de las pruebas.** En estudios futuros se deberá incluir un mayor número de instalaciones y considerar las percepciones de las personas operadoras, con el fin de

capturar la variabilidad operativa y los impactos en condiciones reales. También se recomienda realizar estudios en una gama más amplia de regiones con distintos climas.

5. **Análisis de costos.** Se recomienda que futuros estudios incluyan un análisis detallado de los gastos adicionales en que incurren las instalaciones que aceptan materiales de envasado compostables, ya que los costos de operación suelen verse incrementados. Considerando que los programas de responsabilidad ampliada del productor (RAP) en Canadá y Estados Unidos exigen que las entidades productoras financien y gestionen la recolección, el reciclaje y la adecuada eliminación o disposición final de materiales designados, este análisis resulta fundamental para asegurar el cumplimiento normativo fundamentado y una recuperación de costos precisa.
6. **Ubicación de instalaciones y condiciones de molestia.** Se recomienda realizar estudios futuros dirigidos a analizar la facilidad para ubicar instalaciones de compostaje y la influencia que la percepción pública puede llegar a tener en ello. Tal como se observó en este trabajo piloto, algunas comunidades podrían oponerse a instalaciones cuando se les percibe como “manejadoras de basura”; asimismo, es posible que las propiedades cercanas se vean afectadas por materiales de envasado que se dispersan con el viento y terminan fuera del sitio de compostaje.
7. **Elaboración ulterior de métodos de ensayo.** La Fundación para la Investigación y la Educación sobre Composta (*Compost Research and Education Foundation*, CREF) ha señalado que planea actualizar el conjunto de métodos de evaluación para el análisis del proceso de compostaje y de la composta (métodos TMECC, por sus siglas en inglés) en respuesta a los avances tecnológicos y a la evolución del conocimiento científico (CREF, 2025). El equipo encargado del trabajo coincide en que estas actualizaciones revisten particular relevancia para la detección de microplásticos y PFAS en composta. En futuros proyectos piloto se recomienda que todas las pilas de composta terminada se sometan a análisis con fines comparativos.

Referencias bibliográficas

- Cambridge Companies (2024), “Aerated Static Piles (ASP): Efficient Composting for Sustainable Waste Management” [Pilas estáticas aireadas: compostaje eficiente para la gestión sostenible de residuos], Cambridge Companies Inc., en: <<https://cambridgecompaniesinc.com/blog/aerated-static-piles-asp-efficient-composting-for-sustainable-waste-management/>>.
- CHEM Trust (2021), “PFAS and food packaging – FAQ” [PFAS y envases para alimentos – preguntas frecuentes], en: <<https://chemtrust.org/pfas-food-packaging-faq/>>.
- Closed Loop Partners (CLP) (2024), *Break it down: The realities of compostable packaging disintegration in composting systems – Final report* [Análisis detallado de las realidades de la desintegración de los envases alimentarios compostables en los sistemas de compostaje: informe final], Center for the Circular Economy, Closed Loop Partners, en: <www.closedlooppartners.com/wp-content/uploads/2024/04/Closed-Loop-Partners-Final-Disintegration-Report-2.pdf>.
- CREF (2025), “TMECC update” [Actualización del conjunto de métodos TMECC], Compost Research and Education Foundation, en: <<https://compostfoundation.org/tmecc-update/>>.
- CREF (s.f.), “Compost Sampling Guidance Video: Part I – Sampling Finished Compost” [Video de orientación para el muestreo de composta: parte I – Muestreo de composta terminada], Compost Research and Education Foundation, en: <www.youtube.com/watch?v=OC-m5zNCGQg youtube.com+1>.
- EPA (2013), *Environmental regulations and technology: Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge* [Reglamentos y tecnología ambientales: control de patógenos y de la atracción de vectores en lodos de aguas residuales], capítulo 7: “Processes to further reduce pathogens (PFRPs)” [Procesos para la reducción adicional de patógenos (PFRP)], EPA 625/R-92/013, US Environmental Protection Agency, en: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/da2ded30/files/uploaded/f1VYkAs7TxGx3aZT5jgf_625R92013chap7.pdf>.
- EPA (2016), “Types of composting and understanding the process” [Tipos de compostaje y comprensión del proceso], US Environmental Protection Agency, en: <https://19january2021snapshot.epa.gov/sustainable-management-food/types-composting-and-understanding-process_.html>.
- EPA (2024), “Method 1633A: Analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aqueous, solid, biosolids, and tissue samples by LC-MS/MS” [Método 1633A: Análisis de sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS) en muestras acuosas y sólidas, biosólidos y tejidos mediante cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS)], documento metodológico de la EPA, Office of Water, US Environmental Protection Agency, en: <<https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-12/method-1633a-december-5-2024-508-compliant.pdf>>.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

EPA (2025), “Composting: Compost enriches and builds healthy soil” [Compostaje: la composta enriquece y fortalece suelos saludables], US Environmental Protection Agency, en: <www.epa.gov/sustainable-management-food/composting>.

EPA (s.f.), “Regional Screening Levels (RSLs) – Generic tables” [Niveles de detección regionales (RSL): tablas genéricas], US Environmental Protection Agency, en: <www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>.

Fenton, S. E., A. Ducatman, A. Boobis, J. C. DeWitt, C. Lau, C. Ng, J. S. Smith y S. M. Roberts (2020), “Per- and polyfluoroalkyl substance toxicity and human health review: Current state of knowledge and strategies for informing future research” [Toxicidad de las sustancias per y polifluoroalquiladas y salud humana: estado actual del conocimiento y estrategias para orientar investigaciones futuras], *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 40, núm. 3, pp. 606-630, en: <<https://doi.org/10.1002/etc.4890>>.

Gore (s.f.), “Gore® Cover for composting, organic resource recovery, bio-drying & stabilization” [Cubierta Gore para procesos de compostaje, recuperación de recursos orgánicos, biosecado y estabilización], en: <www.gore.com/products/gore-cover-for-organic-waste-treatment> (consulta realizada el 31 de agosto de 2025).

Gobierno de Alberta (2022), *Alberta Tier 1 soil and groundwater remediation guidelines* [Directrices de remediación de suelos y aguas subterráneas de nivel 1 de Alberta], publicación núm. 842becf6-dc0c-4cc7-8b29-e3f383133ddc, Alberta Environment and Protected Areas, en: <<https://open.alberta.ca/dataset/842becf6-dc0c-4cc7-8b29-e3f383133ddc/resource/018c0139-ae40-4537-af72-23458c8c58c7/download/aep-albertatier1guidelines-aug24-2022.pdf>>.

Hains, J. y S. Richards (2023), “PFAS in Canadian provinces: Where are the environmental regulations?” [PFAS en las provincias canadienses: ¿dónde queda la reglamentación en materia ambiental?], *Environment Journal*, 23 de marzo de 2023, en: <<https://environmentjournal.ca/pfas-in-canadian-provinces-where-are-the-regulations/>>.

Hasan, M. (2025), “Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and plant growth” [Impactos adversos de los microplásticos en las propiedades fisicoquímicas del suelo y en el crecimiento vegetal], *Science Progress*, vol. 108, núm. 1: 003685042211276. <<https://doi.org/10.1177/003685042211276>>.

Hawai'i Department of Health (2020), *Interim soil and water Environmental Action Levels (EALs) for perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs)* [Niveles provisionales de acción ambiental (EAL) para suelos y cuerpos de agua respecto de sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS)], memorando técnico, Hazard Evaluation and Emergency Response Office, State of Hawai'i Department of Health, en: <<https://health.hawaii.gov/heer/files/2020/12/PFASs-Technical-Memo-HDOH-Dec-2020.pdf>>.

ITRC (2023), *PFAS – Per- and polyfluoroalkyl substances: Technical and regulatory guidance document* [Sustancias per y polifluoroalquiladas (PFAS): documento técnico y normativo de orientación], Interstate Technology & Regulatory Council, en: <<https://pfas-1.itrcweb.org/>>.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Midwest Laboratories (2025), Compost result interpretations [Interpretación de los resultados del compostaje].

Rynk, R., G. Black, J. Gilbert, J. Biala, J. Bonhotal, M. Schwarz y L. Cooperband (eds.) (2022), *The Composting Handbook* [Manual de compostaje], Cambridge, MA, Academic Press.

TCEQ (2025), "TRRP protective concentration levels" [Niveles de concentración protectores del Programa de Reducción de Riesgos de Texas], Texas Commission on Environmental Quality, en: <www.tceq.texas.gov/remediation/trrp/trrppcls.html>.

USCC (2002), "Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC): Method 3.05-A – Film Plastic Surface Area Determinations Using Digital Processing" [Métodos de evaluación para el análisis del proceso de compostaje y de la composta (TMECC): Método 3.05-A: Determinación del área superficial de plásticos en forma de película mediante procesamiento digital], US Composting Council, en: <www.compostingcouncil.org/page/TMECC>.

USCC (s.f.), "Compost – Characteristics and why it matters" [Composta: características y su relevancia], US Composting Council, en: <www.compostingcouncil.org/page/CompostCharacteristics>.

Apéndice 1: Método de dosificación

Este método, en versión preliminar, fue elaborado por el Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables (Compostable Field Testing Program, CFTP) para Eunomia, adaptado en especial —y destinado exclusivamente— para emplearse en el estudio piloto de la CCA sobre desintegración de envases de papel con recubrimiento polimérico.



Método de dosificación para evaluar la desintegración en campo de utensilios y envases alimentarios compostables

Versión 3, 2025

Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables
(Compostable Field Testing Program, CFTP)

Documento protegido mediante licencia internacional de tipo “Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada”, versión 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0). Esta licencia permite a las personas usuarias copiar y distribuir el material en cualquier medio o formato, únicamente en su forma original, sólo con fines no comerciales y siempre que se otorgue el crédito correspondiente a la persona autora.

Si desea consultar una copia de esta licencia, visite

<<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>>.



CC BY-NC-ND 4.0 incluye los siguientes elementos:

- ① **BY** – Se debe dar crédito (atribución) a la persona creadora.
- ② **NC** – Sólo se permite el uso de la obra con fines no comerciales.
- ③ **ND** – No se permiten adaptaciones ni versiones derivadas de la obra.

Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables: método de prueba por dosificación

Establecido en 2016, el Programa de Pruebas en Campo de Materiales Compostables (*Compostable Field Testing Program*, CFTP) es un proyecto de investigación internacional, sin fines de lucro y con participación multisectorial, diseñado para incorporar pruebas en campo a operaciones de procesamiento (compostaje) de materiales orgánicos de todo tipo y escala. El objetivo del programa es recopilar y compartir datos para apoyar actividades ulteriores de investigación y educación. Los datos recopilados mediante el uso de este método se anonimizan e incorporan a la base de datos pública del CFTP.

El método de prueba en campo por dosificación está diseñado para evaluar la desintegración de productos y materiales industrialmente compostables en instalaciones de compostaje aeróbico a escala comercial que no pueden utilizar —o deciden no utilizar— el método de prueba de materiales contenidos (en bolsas de malla). El método de dosificación determina únicamente la desintegración de los elementos compostables agregados, no su biodegradabilidad. A pruebas en campo sólo deben someterse productos y materiales certificados como compostables, que hayan cumplido con estándares de biodegradabilidad determinados en laboratorio y cuenten con certificaciones de compostabilidad otorgadas por terceros.

Este documento presenta una descripción general de la preparación y recopilación de datos, así como los procedimientos físicos y analíticos por etapa de la prueba, e incluye un apéndice con recursos relevantes.

Descripción general de la prueba de campo

La prueba de campo por dosificación comprende cinco etapas: **planificación, dosificación, monitoreo y manejo, recuperación de residuos y análisis**, mismas que se describen en el cuadro A-1. La etapa de planificación puede realizarse fuera de sitio, mientras que las etapas restantes se llevan a cabo en sitio.

Cuadro A1-1: Etapas, tiempos, estimación de mano de obra y horas requeridas del método de prueba por dosificación

Etapas de la prueba	Planificación	Dosificación	Monitoreo y manejo	Recuperación de residuos	Análisis
Periodo habitual	3 a 12 semanas antes del inicio	Día 1	De forma continua durante la prueba	Al término del tiempo o plazo habitual de compostaje	1 a 7 días después del retiro de los materiales dosificados*

Etapas de la prueba	Planificación	Dosificación	Monitoreo y manejo	Recuperación de residuos	Análisis
Resumen breve de actividades	Llamadas de coordinación, sesiones de capacitación, planificación, adaptación del método, cálculo de cantidades requeridas de productos, obtención de artículos de prueba y equipo.	Evaluar: Registrar condiciones iniciales o de la materia orgánica insumo del proceso. Muestrear la materia orgánica insumo del proceso y enviarla a laboratorio para obtener datos iniciales (densidad aparente, relación C/N, contenido de humedad). Dosificar y cargar: Mezclar la materia orgánica insumo del proceso con los elementos de prueba e incorporarlos en la operación.	Monitorear: En el área de prueba, realizar cada semana pruebas manuales de humedad (prueba de compresión), mediciones diarias de temperatura y quincenales de oxígeno. Intervalos: Dar seguimiento al movimiento del material dosificado, según se requiera, para permitir la continuidad de las operaciones habituales.	Evaluar la composta: Recopilar datos finales (pH, densidad aparente, estabilidad biológica y madurez de la composta mediante prueba Solvita, humedad, temperatura). Recuperar residuos: Tamizar por medios mecánicos el material dosificado y luego separar a mano para recuperar los residuos de los elementos de prueba.	Separar y enviar: Separar, recolectar e identificar los residuos de los productos de prueba; fotografiar los residuos; empacar y enviar para su evaluación posterior.
Horas estimadas**	8	6-8	Monitoreo: 1 h/semana; descarga/re-carga por intervalo: 6-8 h	4-6	6-8
Personas requeridas***	2-3	2	1 para monitoreo, 2 para mover material	2	3-4

* El análisis puede comenzar el mismo día en que se retiran los residuos, pero deberá realizarse dentro de los siete días posteriores a la recolección.

** Las horas estimadas pueden variar dependiendo de las necesidades específicas de cada instalación.

*** La planificación suele incluir a una persona operadora y otra responsable de la supervisión y aprobación general del proyecto. Contar con al menos dos personas para las tareas manuales de carga y retiro incrementa la seguridad y la eficiencia. Disponer de tres o más personas durante el análisis mejora la eficiencia y la distribución de las tareas.

Protocolo de muestreo por dosificación a granel aleatorizado o sistemático para el análisis de la desintegración de productos compostables: recolección continua de muestras en flujo (tolva y criba rotativa tipo trómel)

Pila pequeña $\leq 7.6 \text{ m}^3$ (10 yd^3)

Para pilas pequeñas de 7.6 m^3 (10 yd^3) o menos, se tomará una muestra por cada 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) de material sin tamizar.

Personal requerido: dos personas (una para cargar la tolva y otra para cronometrar y recolectar las muestras).

1. Establecer la tasa de muestreo y tomar la primera muestra.

- Al tomar la primera muestra* se establecerá el tiempo requerido para cribar 0.76 m^3 (1 yd^3) de material. Para ello hay que cargar 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) en la tolva y cronometrar el proceso desde el momento en que los elementos o fragmentos gruesos comienzan a salir de la criba rotativa (trómel) hasta que el tamizaje finaliza y el flujo de elementos gruesos se detiene.
- Establecer el tiempo total requerido para tamizar la pila completa utilizando la siguiente fórmula:

Tiempo para procesar 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) (minutos)	$\times 2 \times$	m^3 (yd^3) totales a tamizar	=	Tiempo total para procesar la pila (minutos)
Por ejemplo, al cuando se muestrea una pila de 6.9 m^3 (9 yd^3):				
6 minutos	$\times 2 \times$	6.9 m^3 (9 yd^3)	=	108 minutos para tamizar 6.9 m^3 (9 yd^3)

- Establecer el intervalo de muestreo (una muestra por cada 0.38 m^3 [$\frac{1}{2} \text{ yd}^3$]) utilizando la siguiente fórmula:

Tiempo total para procesar la pila (minutos)	$\div$	$(2 \times \text{m}^3 [\text{yd}^3] \text{ totales}) + 1$	=	Intervalo de muestreo por cada 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) (minutos)
Ejemplo:				
(108 minutos)	$\div$	$18) + 1$	=	7 minutos

*1a. Al establecerse la tasa de muestreo, también debe tomarse la primera muestra, en un momento determinado de manera aleatoria, cercano al inicio del proceso de tamizaje.

- Debe emplearse un generador de números aleatorios para obtener un número entre 0 y 5. Ese número corresponde al minuto exacto en que se recolectará la primera muestra de elementos gruesos de la criba trómel.

Una vez obtenida la primera muestra con el momento de muestreo generado en forma aleatoria, el resto de las muestras se recolectarán en el intervalo calculado.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Para recoger cada muestra, debe colocarse un recipiente de 19 litros (5 galones) debajo de la salida de la criba trómel, justo al comienzo del minuto asignado para el muestreo, y recolectarse todo el material que salga hasta que la cubeta esté llena. Si algunos fragmentos o elementos de prueba salen de la criba *antes* de que se empiece a recoger la muestra en el recipiente, éstos NO deben añadirse a la muestra. Si los elementos de prueba salen de la criba *después* de que se ha llenado la cubeta, TAMPOCO deben colocarse en ella. En cambio, si algunos fragmentos o elementos de prueba accidentalmente caen fuera de la cubeta durante el proceso de llenado, DEBEN RECOGERSE y colocarse en el recipiente de muestreo.

Muestra 1	Minuto 2
Muestra 2	2+7 = minuto 9
Muestra 3	2 +7+7 = minuto 16
Muestra 4	2+7+7+7 = minuto 23

Por ejemplo, si el número aleatorio para la primera muestra es 2 y el intervalo de muestreo es de 7 minutos, se recogerían muestras en el minuto 2, el minuto 9, el minuto 16 y el minuto 23.

Opción de muestreo con una sola persona

Si sólo una persona está disponible para cargar la tolva y recolectar muestras, cada 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) se procesará por separado, carga por carga. La primera muestra se generará en un momento correspondiente a un número aleatorio entre 0 y 5 [minutos]. Las muestras subsecuentes se tomarán en momentos aleatorios entre 0 y el tiempo de procesamiento (en minutos) de cada 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$). La persona operadora puede cargar cada m^3 y luego capturar la muestra en el momento aleatorio generado para esa carga.

Por ejemplo: el primer número generado de manera aleatoria es 3, de manera que la primera muestra se toma en el minuto 3 del procesamiento de la primera carga de la tolva. El procesamiento de los primeros 0.38 m^3 ($\frac{1}{2} \text{ yd}^3$) toma 6 minutos; por lo que las muestras subsiguientes se tomarán en momentos generados aleatoriamente, entre 0 y 6 minutos.

Número de muestra	Momento de muestreo (por cada 0.38 m^3 [$\frac{1}{2} \text{ yd}^3$] tamizados)
Muestra 1	Minuto 3
Muestra 2	Minuto 4
Muestra 3	Minuto 1
Muestra 4	Minuto 2
Muestra 5	Minuto 4
Muestra 6	Minuto 3
Muestra 7	Minuto 5

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Número de muestra	Momento de muestreo (por cada 0.38 m ³ [½ yd ³] tamizados)
Muestra 8	Minuto 3
Muestra 9	Minuto 6
Muestra 10	Minuto 5
Muestra 11	Minuto 6
Muestra 12	Minuto 3
Muestra 13	Minuto 1
Muestra 14	Minuto 3
Muestra 15	Minuto 2
Muestra 16	Minuto 3
Muestra 17	Minuto 1
Muestra 18	Minuto 3

Pilas grandes > 7.6 m³ (10 yd³)

Para pilas de más de 7.6 m³ (10 yd³) se recolecta de forma sistemática un número fijo de submuestras. Trabajos previos han demostrado que diez submuestras de 19 litros (5 galones) pueden procesarse en una jornada laboral. Este protocolo se basa en 20 submuestras recolectadas de pilas mayores a 7.6 m³ (10 yd³), aunque puede ajustarse según los objetivos del estudio y los recursos disponibles.

Personal requerido: dos personas (una para cargar la tolva y otra para cronometrar y recolectar muestras).

1. Debe establecerse la tasa de muestreo y tomarse la primera muestra.

- Al tomar la primera muestra* se establecerá el tiempo requerido para cribar 0.76 m³ (1 yd³) de material. Es necesario cargar 0.38 m³ (½ yd³) en la tolva y medir el tiempo que tarda en procesarse desde que los fragmentos gruesos comienzan a salir de la criba rotativa (trómel) hasta que se completa el tamizaje y el flujo de fragmentos ha concluido.
- Definir el tiempo necesario para tamizar toda la pila utilizando la siguiente fórmula:

Tiempo para procesar 0.76 m ³ (1 yd ³) (minutos)	X	m ³ (yd ³) totales a tamizar	=	Tiempo total para procesar la pila (minutos)
Por ejemplo, cuando se muestrea una pila de 23 m³ (30 yd³):				
10 minutos	X	23 m ³ (30 yd ³)	=	300 minutos para tamizar 23 m ³ (30 yd ³)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- Definir el intervalo de muestreo para obtener 20 muestras con la siguiente fórmula:

Tiempo total para procesar la pila (minutos)	÷	# submuestras a tomarse de la pila	=	Intervalo de muestreo
Ejemplo:				
300 minutos	÷	20	=	15 minutos

*1a. Al establecerse la tasa de muestreo, también debe tomarse la primera muestra, en un momento determinado de manera aleatoria, cercano al inicio del proceso de tamizaje.

- Debe emplearse un generador de números aleatorios para obtener un número entre 0 y 5. Ese número corresponde al minuto exacto en que se recolectará la primera muestra de elementos gruesos de la criba trómel.

Una vez obtenida la primera muestra con el momento de muestreo generado en forma aleatoria, el resto de las muestras se recolectarán en el intervalo calculado.

Para recoger cada muestra, debe colocarse un recipiente de 19 litros (5 galones) debajo de la salida de la criba trómel, justo al comienzo del minuto asignado para el muestreo, y recolectarse todo el material que salga hasta que la cubeta esté llena. Si algunos fragmentos o elementos de prueba salen de la criba *antes* de que se empiece a recoger la muestra en el recipiente, éstos NO deben añadirse a la muestra. Si los elementos de prueba salen de la criba *después* de que se ha llenado la cubeta, TAMPOCO deben colocarse en ella. En cambio, si algunos fragmentos o elementos de prueba accidentalmente caen fuera de la cubeta durante el proceso de llenado, DEBEN RECOGERSE y colocarse en el recipiente de muestreo.

Muestra 1	minuto 2
Muestra 2	2+15 = minuto 17
Muestra 3	2 +15+15 = minuto 32
Muestra 4	2+15+15+15 = minuto 47

Por ejemplo, si el número aleatorio para la primera muestra es 2 y el intervalo de muestreo es de 15 minutos, se recogerían muestras en el minuto 2, el minuto 17, minuto 32, minuto 47 y así sucesivamente.

Si los recursos permiten más (o menos) de dos días de recopilación de datos de submuestras, se puede ajustar la fórmula.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Materiales

La siguiente es una lista detallada de materiales. Revisar y modificar esta lista de materiales es una aportación importante por parte de la instalación antes y durante las pruebas.

Cuadro A1-2: Materiales necesarios para el método de dosificación

En preparación	
Elementos de prueba	Artículos certificados como compostables en fase de prueba Elementos de control negativo
Recopilación de datos	Báscula con una precisión de 0.1 g/0.01 oz y capacidad para pesar hasta 1 kg/2.2 lb Marcador indeleble negro Hojas de datos (en caso de completar el formulario en papel, se recomienda llevar bolígrafo y sujetapapeles) Regla de ángulo recto Fondo fotográfico de papel cuadriculado Cámara Etiquetas para fotografías (de papel o plástico, impresas o escritas a mano) que incluyan el nombre de cada instalación, fecha y número de identificación del producto Método e instrucciones impresas
Disponibilidad requerida durante las pruebas (embalaje, carga, manejo del material, retiro)	
Equipo de protección y artículos personales de trabajo	Respirador Lentes de seguridad Guantes: de nitrilo o látex para la manipulación de artículos de prueba y sus residuos, así como guantes de Kevlar o de jardinería recubiertos para la manipulación de fragmentos gruesos de la materia orgánica insumo del proceso y de la composta Ropa adecuada a las condiciones climáticas (por capas) Botas con punta de acero (u otro tipo de calzado, según los requisitos del sitio) Chalecos de alta visibilidad Alimentos y agua
Dosificación y traslado de material	Elementos de prueba y de control negativo Palas y cucharas para recoger muestras de material Un cubo de 19 litros (5 galones) marcado con las líneas de llenado correspondientes (véase el procedimiento de ensayo de densidad aparente en el apéndice C2) Conos o banderines para marcar el área dosificada Hojas de datos (en caso de completar el formulario en papel, se recomienda llevar bolígrafo y sujetapapeles) Instrucciones para realizar pruebas de humedad y densidad aparente

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

En preparación	
Monitoreo y muestreo	Bolsas resellables de 3.78 litros (1 galón) con barrera contra la humedad Sonda (o sensores automáticos) de temperatura Sonda (o sensores automáticos) de oxígeno Cubo de 19 litros (5 galones) (para evaluaciones de densidad aparente en sitio) Tiras reactivas de pH Kit de prueba Solvita Hojas de datos Instrucciones para pruebas de humedad y densidad aparente
Análisis	(opcional) Mesa: recomendada para llevar a cabo el tamizaje de forma ergonómica (opcional) Contenedor, bote de basura o carretilla — para recolectar los elementos finos (<i>unders</i>) y los fragmentos gruesos (<i>overs</i>) durante el proceso de cribado Palas y cucharas para el manejo de materiales Elementos de prueba intactos (conservados del kit de prueba para comparar antes y después, y ayudar a identificar residuos) Cepillo pequeño para eliminar los restos de los residuos de los elementos de prueba; por ejemplo, un pincel con cerdas de 2.54 cm (1 pulgada) o menos Criba o tamiz manual con malla de 0.64 cm (¼") Hojas de datos de inventario, sujetapapeles, bolígrafos y marcadores Lona resistente (mín. 3.05 × 3.66 m [10' × 12']) Equipo y materiales para la recopilación de datos, listado antes (por ejemplo, cámara, etiquetas para fotografías, fondo cuadrículado para fotografías)

Método

Procedimientos para la recopilación tanto de datos de peso y volumen como de fotografías

Recopilación de datos de peso

Los datos de peso se recopilan al inicio y al final del ensayo; el mismo procedimiento se sigue para la medición inicial y durante el análisis. Es preciso asegurarse de utilizar una báscula con una precisión mínima de 0.1 g / 0.01 oz y de seguir los pasos que se describen a continuación para garantizar mediciones homogéneas.

1. La báscula debe colocarse en una superficie estable y nivelada; de lo contrario, el peso registrado se verá afectado.
2. Es preciso asegurarse de que la unidad de medida esté configurada en **gramos**.
3. La báscula debe tararse o “ponerse a cero” vacía antes de comenzar a pesar.
 - Si la báscula marca un valor distinto de cero cuando no hay ningún objeto sobre ella, debe consultarse el manual de usuario para calibrarla correctamente.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

- Si se utiliza un recipiente o cuenco por separado para contener los residuos del producto durante el pesaje, es preciso asegurarse de tarar la báscula con el recipiente vacío, de modo que sólo se pese el residuo, o bien registrar el peso del recipiente por separado y restarlo del peso total.
- 4. Es preciso colocar el objeto a pesar sobre la báscula; espere a que el valor se estabilice y regístrelo en la hoja de datos correspondiente.
- 5. Después de cada medición, el objeto debe retirarse, y la báscula limpiarse de cualquier residuo y volverla a tarar o “poner a cero” antes de la siguiente medición.

Recopilación de datos de volumen

El volumen de los residuos por tipo de producto se recopila al final del ensayo. Los procedimientos para la recopilación de datos de volumen se encuentran actualmente en revisión, y se invita a proporcionar comentarios y sugerencias al respecto.

Volumen de los residuos durante el análisis

1. Prepárense recipientes vacíos de dimensiones conocidas para cuantificar el volumen; por ejemplo, un cubo de 19 litros (5 galones) con marcas en el interior que indiquen $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de llenado.
 - Para ello, el cubo debe llenarse de manera gradual con cantidades de agua conocidas y señalar con un marcador permanente los niveles en los costados.
2. Durante la recolección de los residuos de los artículos a partir del material dosificado, deben separarse los residuos en pilas distintas según el tipo de producto.
3. Debe cuantificarse el volumen por cada residuo. Para ello deberán seguirse los siguientes pasos
 - Colocar los fragmentos del producto en el recipiente marcado sin apretarlos.
 - Anotar el nivel de llenado estimado y el número de contenedores llenos en la hoja de datos de recuperación de residuos.

Recopilación de fotografías tomadas durante todo el ensayo

A lo largo del ensayo se toman fotografías para documentar el proceso y para capturar imágenes de los elementos de prueba y residuos, las cuales se utilizan para calcular el área superficial. Consulte la ***Lista de verificación de fotografías*** para conocer el conjunto completo de imágenes requeridas.

Fotografías del proceso: Deben tomarse fotografías desde una distancia suficiente para capturar todos los detalles necesarios. Asimismo, es necesario asignar títulos o descripciones a las fotografías, sobre todo cuando su propósito pueda no resultar evidente para quienes las interpretarán fueran de sitio.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Fotografías de los elementos de prueba: Deben tomarse fotografías de los materiales de prueba intactos al inicio y de sus residuos al final del ensayo. Todas las fotografías de dichos elementos deben incluir:

1. fondo con cuadrículado milimétrico;
2. elemento de prueba o residuo;
3. etiqueta con datos mínimos, como fecha, nombre de la instalación e identificación del producto, y
4. regla de ángulo recto.

Para tomar fotografías de los residuos de los elementos de prueba debe reservarse un área plana para tal fin y utilizar un teléfono o una cámara sobre un tripié colocado sobre papel cuadrículado. Se deben reunir los residuos del producto a medida que se van recuperando e intentar recrear su forma original siempre que sea posible.

1. **Seleccione un lugar para tomar fotografías** que sea plano, sin viento y con iluminación difusa, de modo que no se proyecten sombras.
2. **Coloque la regla de ángulo recto a lo largo del borde del fondo con cuadrículado milimétrico.**
3. [Opcional] **Utilice un tripié para ajustar la altura de la cámara.** Saque fotografías de prueba para comprobar que las líneas de la cuadrícula estén enfocadas y alineadas con las fotografías tomadas a la altura establecida.
4. **Fotografíe el elemento y los residuos.** Compruebe que la cuadrícula esté nítida y recta en cada foto, y vuelva a tomar la foto o reoriente la cámara si es necesario.
 - a. *Para elementos intactos:* Aplane el objeto contra el papel cuadrículado.
 - b. *Para residuos:* Fotografíe cada residuo recuperado por separado, tanto los elementos de prueba como los de control. Reúna cada uno de los residuos recuperados en la forma general del elemento original, de modo que sea posible comparar visualmente su tamaño con la foto del producto original. Si un residuo no es plano de forma natural y tiene una altura superior a 1 cm, córtelo hasta aplanarlo para poder fotografiarlo, pero sólo en la medida necesaria para que se parezca a la foto del elemento intacto representativo:
 - i) Asegúrese de que el borde del residuo no tape las marcas de medición de la regla o el borde de la cuadrícula.
 - ii) Recuerde también fotografiar cualquier material de control residual.
 - iii) Si no se encuentran residuos, fotografíe la regla con las etiquetas de identificación, tal y como se ha descrito anteriormente. Así tendrá constancia visual de que el producto no presentaba residuos aparentes. Consulte el apéndice C7 para ver un ejemplo de foto de “después”.

Planificación

Selección del sitio de prueba

1. **Seleccione dónde se realizará la prueba.** Elija un área que sea fácil de manejar y supervisar y donde sea poco probable que se produzcan alteraciones accidentales durante el periodo de prueba.
2. **Determine la cantidad de materia orgánica insumo del proceso a dosificar,** con base en los volúmenes que puedan delimitarse y manejarse fácilmente conforme al equipo y las operaciones habituales de la instalación, pero cerciorándose de contar con un volumen suficiente para alcanzar las condiciones típicas de compostaje de la instalación (por ejemplo, temperatura y humedad).

Determinación de materiales compostables a incorporar

La cantidad de elementos de materiales de envasado compostables a incorporar se determina en función de la tasa de dosificación objetivo. La *tasa de dosificación* es la concentración de elementos de prueba en la materia orgánica insumo del proceso, expresada en volumen. Los siguientes pasos permiten determinar las cantidades de envases alimentarios que es necesario agregar a las pilas de compostaje para llevar a cabo la prueba con base en una tasa de dosificación objetivo.

1. **Defina las tasas de dosificación** para tratamientos de dosis baja y dosis alta, generalmente entre 2 y 5 por ciento.
2. **Estime el volumen de cada elemento** con base en las especificaciones del fabricante.
3. **Calcule las cantidades deseadas de elementos** que permitan alcanzar la(s) tasa(s) de dosificación objetivo.
4. **Determine la cantidad disponible de cada elemento** y ajuste las cantidades de prueba según dicha disponibilidad.

Obtención de materiales y equipo

1. Revise la lista de materiales requeridos.
2. **Adquiera los materiales** de prueba en las cantidades calculadas.

Dosificación

Preparación de los elementos

1. **Reúna los elementos de prueba mezclándolos entre sí.** Abra las cajas de los elementos de prueba antes del día de la carga y sepárelos sin apretarlos en cajas o contenedores para prepararlos para la dosificación. Consulte la *Lista de verificación y registro de dosificación de elementos de prueba (Test Item Checklist and Dose Record)* a fin de familiarizarse con los artículos y sus cantidades.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

2. **Registre el volumen de los elementos.** En el cuadro de datos de *volumen inicial de elementos*, asiente cuántos contenedores se llenaron, el volumen de cada uno y el grado de llenado alcanzado con los elementos a incorporar.

Recopilación de datos iniciales

1. **Tome una muestra compuesta de la materia orgánica insumo del proceso mezclada para su análisis en laboratorio.** Consulte los videos de muestreo de la Fundación para la Investigación y la Educación sobre Composta (*Compost Research and Education Foundation*, CREF) para conocer la técnica de recolección de muestras compuestas: <<https://compostfoundation.org/Education/Sampling-Videos>>. Tome una muestra de 3.78 litros (1 galón), colóquela en una bolsa Ziploc, y etiquétela con el nombre de la instalación, la fecha y la etapa de la prueba. Envíe la muestra el mismo día en una hielera o bolsa aislante con un paquete de hielo. Refrigere la muestra si no puede enviarse de inmediato.
2. Evalúe y registre los parámetros operativos iniciales en la hoja de datos “Condiciones al inicio”. Registre las condiciones climáticas y mida la densidad aparente. Consulte la “prueba del balde” descrita en el apéndice para evaluar la densidad aparente en campo.

Dosificación de la materia orgánica insumo del proceso con elementos de prueba

1. **Recolecte materia orgánica insumo del proceso representativa.** En un lugar conveniente reúna la cantidad requerida de materia orgánica insumo del proceso previamente mezclada.
 - Asegúrese de que la materia orgánica insumo del proceso sea la misma que se utiliza en las operaciones habituales o que sea comparable en términos de la relación C/N.
 - Al registrar la composición de la materia orgánica insumo del proceso, anote cualquier variación respecto a la que típicamente se utiliza en la instalación.
 - La materia orgánica insumo del proceso seleccionada no debe tener más de dos días de antigüedad.
 - En la medida de lo posible, elimine contaminantes de la materia orgánica insumo del proceso (por ejemplo, plásticos convencionales, metal, vidrio u otros contaminantes), así como cualquier otro envase compostable que no forme parte del kit de prueba.
2. Dosifique la materia orgánica insumo del proceso, intercalando los productos y mezclando tanto como sea posible.
 - Distribuya los elementos de la manera más uniforme posible en todo el material dosificado.
 - Si hay viento fuerte, dosifique los productos poco a poco creando surcos, esparciendo en éstos los ingredientes mezclados y cubriéndolos con la materia orgánica insumo del proceso.
 - Al dosificar, tome una fotografía de la materia orgánica insumo del proceso antes de la dosificación; varias fotos del proceso de dosificación, y cuando menos dos imágenes de dicha materia ya dosificada (una de cerca y otra desde mayor distancia).

**¡Use guantes
y mascarilla!**

Monitoreo y manejo

Monitoreo de las condiciones de la composta durante todo el ensayo

A lo largo de la duración de la prueba, monitoree lo siguiente:

- **Temperatura: diaria.** Mida entre cinco (5) y diez (10) puntos alrededor del área de prueba, a cuando menos 60 cm (2 pies) por debajo de la superficie de la pila. Utilice el **Registro diario de temperatura** para reportar las lecturas de temperatura.
- **Humedad: semanal.** Se evalúa a partir de cinco (5) muestras tomadas alrededor del área de prueba. La prueba de compresión manual (*squeeze test*) es suficiente. El secado en horno es opcional y el análisis de laboratorio durante la prueba también es opcional. Utilice el **Registro semanal de mediciones** para reportar los valores de humedad.
- **Oxígeno: cada dos semanas.** Se evalúa en cinco (5) puntos alrededor del área de prueba. Utilice el **Registro semanal de mediciones** para reportar las lecturas.

Lo mismo si el monitoreo es manual o si es automatizado, registre los valores en las hojas de datos de monitoreo diario de temperatura y de mediciones semanales. Una vez finalizada la fase de compostaje activo, aplique la prueba básica de madurez de composta Solvita cada quince (15) días. Cuando el material alcance el nivel Solvita 5 o al final del curado (lo que ocurra primero), realice el análisis final.

Control del movimiento del material

A medida que el material dosificado se desplaza entre las distintas fases del compostaje, debe tenerse cuidado de no diluirlo con material adyacente no dosificado. Antes de mover el material, retire banderines o conos que delimiten el área dosificada y vuelva a colocarlos en la nueva ubicación para marcar nuevamente el área de prueba.

Recuperación de residuos

La extracción del material dosificado a efecto de prepararlo para el análisis debe realizarse entre uno (1) y tres (3) días antes del tamizaje programado, a fin de lograr la máxima eficiencia.

Extracción y traslado del material dosificado

1. **Registre parámetros.** En la hoja de datos de *Condiciones intermedias y finales* registre temperatura, humedad, densidad aparente (a partir de muestras compuestas o puntos de medición en el área dosificada), resultados de la prueba Solvita y cualquier otra observación relevante sobre las condiciones de las pilas.
2. **Recolecte una muestra compuesta de 3.78 litros (1 galón) del material dosificado para análisis de laboratorio, retirando previamente cualquier residuo de elementos de prueba de la muestra.** Utilice los métodos de muestreo de la CREF, disponibles en: <https://compostfoundation.org/Education/Sampling-Videos>.

3. **Envíe las muestras al laboratorio para su análisis.** Refrigere las muestras si no se envían el mismo día. Envíelas en un contenedor aislado.
4. **Retire los banderines o conos que marcan el área dosificada antes de mover el material.**
5. **Extraiga el material dosificado y mézclelo tanto como sea posible.** El objetivo es asegurar que los elementos de prueba estén distribuidos de la manera más uniforme posible en el material a tamizar. Evite incorporar cualquier material no dosificado durante la mezcla.
6. [Opcional] **Ponga a secar el material dosificado antes del tamizaje.** Si el material dosificado presenta humedad muy elevada el día de la extracción, puede secarse antes del tamizaje extendiéndolo en una capa relativamente delgada (60 cm [24"] de altura o menos). No realice este paso si hay viento fuerte o si se prevén precipitaciones, ya que los fragmentos de producto podrían dispersarse o el material podría humedecerse aún más.
7. **Elabore un informe con los datos registrados.**

Tamizaje del material dosificado

Idealmente, el material debe tamizarse al menos un día antes de la clasificación de fragmentos, con objeto de maximizar la eficiencia el día del análisis.

1. Traslade el material dosificado designado para tamizaje al área destinada a tal fin.
2. Prepare el área donde, después del tamizaje, se depositarán los elementos gruesos para su clasificación posterior. Delimite el área (por ejemplo, con conos) y asegúrese de que los residuos o fragmentos depositados puedan permanecer sin alteraciones entre el tamizaje y el momento de su recuperación.
3. Tamice el material dosificado. Siempre que sea posible, cierna todo el material dosificado en una sola operación.
4. Registre el volumen de los elementos gruesos. Coloque los fragmentos gruesos tamizados en el área designada para su análisis posterior y registre su volumen en la hoja de datos de *volumen final*.
5. Reincorpore los elementos finos al proceso de compostaje. Los elementos finos que pasan a través del tamiz pueden reincorporarse al proceso de compostaje, pero fuera del área de prueba donde aún pueda quedar material dosificado.
6. Aplane la pila de elementos gruesos tamizados. Extienda los elementos gruesos en una capa relativamente delgada (60 cm [24"] o menos de altura); lo ideal sería en forma más o menos cuadrada.

Análisis visual

Al menos dos y hasta tres personas del equipo a cargo del análisis deben recorrer la pila de elementos gruesos y contar los residuos visibles. Para ello, lo recomendable es recorrer de un lado a otro toda el área y buscar la presencia de elementos de prueba en la superficie, incluido cualquier material de control. En la hoja de datos provista han de registrarse el número de elementos localizados y anotarse observaciones sobre el estado de los residuos.

Recolección y tamizaje de muestras de elementos gruesos dosificados

1. Prepare el área de recopilación de datos junto a los elementos gruesos para su clasificación.
 - Disponga una superficie para el análisis de residuos (por ejemplo, mesas o lonas).
 - Instale estaciones para pesaje, evaluación de volumen, toma de fotografías y registro de datos (digital o en papel). Considere la ergonomía del montaje (evite agacharse durante periodos prolongados) y ubique las estaciones para registro de datos de forma que faciliten el flujo de trabajo.
 - Disponga el equipo y materiales para la recopilación de datos (como hojas de datos y etiquetas fotográficas).
2. **Superponga una cuadrícula numerada de 30 × 30 cm (1 × 1 pie) sobre los elementos gruesos tamizados.** Utilice conos y banderines para marcar la cuadrícula de muestreo. Emplee un generador de números aleatorios para seleccionar al menos 15 áreas de muestreo.
3. **Con un cubo de 19 litros (5 galones), recolecte muestras de elementos gruesos de cada punto seleccionado.** Registre los identificadores de las muestras en el *Registro de muestras de elementos gruesos*.
4. **Tamice las muestras y recupere los residuos de elementos de prueba.** Revise el material muestreado y recupere los fragmentos de dichos elementos. Utilice los productos de referencia intactos para ayudar a identificar a qué producto corresponde cada residuo.
5. **Cepille el material de los residuos de elementos de prueba.** Limpie con cuidado los residuos de material muestreado a fin de eliminar los restos de composta. En la medida de lo posible, procure no romper ni dañar dichos residuos.
6. **Fotografíe los residuos de los productos.** Fotografíe por separado los residuos de cada producto. Asegúrese de fotografiar también cualquier residuo de material de control (por ejemplo, película de celulosa).
7. [Opcional; requerido para datos de desintegración basados en peso] **Seque los residuos de elementos de prueba.** Seque al aire los productos biopoliméricos dejándolos en un lugar cubierto. Seque los residuos de fibra al aire durante varios días o mediante secado en horno.
8. [Opcional; requerido para datos de desintegración basados en peso] **Pese los residuos secos de los productos.**
9. **Registre la recuperación de residuos en la hoja de datos “Registro de recuperación de residuos”.** Espere alta variabilidad en la desintegración de un mismo producto. No descarte ningún resultado.

Análisis

Los datos recopilados en el lugar se procesan fuera del mismo para calcular las tasas de desintegración.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Teniendo en cuenta que la cantidad de material dosificado es enorme para poder tamizarlo, separarlo y clasificarlo en su totalidad de manera razonable, se emplea un método de submuestreo que requiere extrapolar los datos de los residuos recuperados del material muestreado.

El porcentaje de residuos restantes se puede calcular basándose en el volumen muestreado o, si se utiliza, en la presencia de un control negativo. Se prefiere el cálculo de desintegración basado en el volumen.

Cálculo de desintegración basado en el volumen

1. De los datos enviados por la instalación, tome el volumen total de elementos gruesos.
2. Calcule el volumen de elementos gruesos muestreados: número de muestras multiplicado por el volumen de cada muestra.
3. Calcule la proporción muestreada: volumen de elementos gruesos muestreados dividido entre el volumen total de elementos gruesos.
4. Calcule el factor de ajuste por volumen: porción del material dosificado tamizado multiplicado por la proporción muestreada. Dado que en cada punto de análisis se evalúa la mitad del material dosificado, la porción del material dosificado tamizado es 0.5.
5. Determine el peso y el área superficial de los residuos recuperados, por tipo de elemento. Utilizando los métodos de laboratorio para pesaje y determinación del área superficial, sume los valores correspondientes a todos los fragmentos recuperados de un mismo tipo de elemento. Dado que los elementos tienden a fragmentarse en varias piezas durante la descomposición, no es viable calcular la desintegración comparando un solo residuo con un solo elemento intacto en términos de peso o área superficial.
6. Calcule los residuos remanentes. Residuos remanentes = peso o área superficial de los residuos recuperados ÷ [peso o área superficial del elemento intacto × cantidad incorporada × factor de ajuste por volumen].

Cálculo de desintegración basado en el área superficial

1. Calcule el área superficial inicial total, por categoría de elemento.
2. Calcule el área superficial final total de los residuos, por categoría de elemento.
3. Calcule el porcentaje de pérdida de superficie: área total (cm²) antes de la experimentación menos área total (cm²) luego de la experimentación, dividida la diferencia obtenida entre el área total (cm²) antes de la experimentación:

$$\% \text{ pérdida de superficie} = \frac{\text{área superficial inicial} - \text{área superficial final}}{\text{área superficial inicial}} \times 100$$

Cálculo de desintegración basado en el peso

1. Calcule el peso inicial total, por categoría de elemento.
2. Calcule el peso final total de los residuos, por categoría de elemento.

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

3. Calcule el porcentaje de desintegración, por peso, donde: [peso inicial del número previsto de unidades por muestra menos peso final de los productos encontrados, por muestra] dividido entre el peso inicial del número previsto de unidades, por muestra, multiplicado por 100, es el porcentaje de desintegración.

$$\% \text{ de desintegración} = \frac{\text{peso inicial del núm. previsto de unidades por muestra} - \text{peso final}}{\text{peso inicial del núm. previsto de unidades por muestra}} \times 100$$

Interpretación de la ausencia de residuos recuperados en el material muestreado

Teniendo presente que sólo se toma una muestra de una parte del material cribado, que representa entre 1 y 7 por ciento del total de los elementos gruesos, es posible, desde el punto de vista técnico, que haya residuos en otras partes de los elementos gruesos y que no se hayan recogido en las muestras.

Apéndice 2: Registros de datos de las instalaciones

Cuadro A2-3: Registros diarios de temperatura de las pilas en la instalación 1

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
1	61 °C (141 °F)	16 °C (60 °F)	54 °C (130 °F)
2	62 °C (144 °F)	18 °C (64 °F)	59 °C (138 °F)
3	56 °C (132 °F)	23 °C (74 °F)	63 °C (145 °F)
4	61 °C (141 °F)	33 °C (92 °F)	48 °C (118 °F)
5	72 °C (162 °F)	41 °C (105 °F)	53 °C (128 °F)
6	69 °C (156 °F)	43 °C (109 °F)	57 °C (134 °F)
7	77 °C (170 °F)	44 °C (111 °F)	59 °C (138 °F)
8	72 °C (162 °F)	48 °C (118 °F)	62 °C (144 °F)
9	68 °C (155 °F)	49 °C (121 °F)	59 °C (138 °F)
10	65 °C (149 °F)	56 °C (132 °F)	66 °C (150 °F)
11	67 °C (152 °F)	59 °C (139 °F)	44 °C (111 °F)
12	68 °C (154 °F)	62 °C (144 °F)	42 °C (107 °F)
13	71 °C (160 °F)	63 °C (146 °F)	69 °C (157 °F)
14	70 °C (158 °F)	50 °C (122 °F)	74 °C (166 °F)
15	65 °C (149 °F)	51 °C (123 °F)	77 °C (171 °F)
16	64 °C (148 °F)	69 °C (157 °F)	78 °C (172 °F)
17	64 °C (147 °F)	64 °C (147 °F)	77 °C (171 °F)
18	65 °C (149 °F)	65 °C (149 °F)	78 °C (173 °F)
19	65 °C (149 °F)	66 °C (150 °F)	77 °C (170 °F)
20	67 °C (153 °F)	65 °C (149 °F)	74 °C (166 °F)
21	68 °C (155 °F)	65 °C (149 °F)	74 °C (166 °F)
22	52 °C (125 °F)	56 °C (133 °F)	76 °C (168 °F)
23	54 °C (129 °F)	61 °C (141 °F)	77 °C (171 °F)
24	42 °C (108 °F)	62 °C (143 °F)	77 °C (170 °F)
25	30 °C (86 °F)	65 °C (149 °F)	74 °C (166 °F)
26	24 °C (75 °F)	67 °C (153 °F)	65 °C (149 °F)
27	20 °C (68 °F)	69 °C (157 °F)	68 °C (154 °F)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
28	18 °C (64 °F)	68 °C (155 °F)	59 °C (139 °F)
29	16 °C (60 °F)	71 °C (159 °F)	62 °C (143 °F)
30	14 °C (58 °F)	70 °C (158 °F)	62 °C (143 °F)
31	16 °C (61 °F)	68 °C (155 °F)	68 °C (154 °F)
32	28 °C (82 °F)	68 °C (154 °F)	67 °C (152 °F)
33	59 °C (139 °F)	67 °C (153 °F)	67 °C (153 °F)
34	66 °C (150 °F)	61 °C (142 °F)	72 °C (161 °F)
35	62 °C (143 °F)	61 °C (142 °F)	71 °C (160 °F)
36	61 °C (141 °F)	51 °C (124 °F)	70 °C (158 °F)
37	30 °C (86 °F)	67 °C (152 °F)	68 °C (155 °F)
38	54 °C (129 °F)	76 °C (168 °F)	66 °C (150 °F)
39	66 °C (150 °F)	74 °C (165 °F)	58 °C (136 °F)
40	66 °C (150 °F)	74 °C (165 °F)	56 °C (133 °F)
41	65 °C (149 °F)	74 °C (165 °F)	55 °C (131 °F)
42	65 °C (149 °F)	74 °C (165 °F)	54 °C (130 °F)
43	65 °C (149 °F)	73 °C (164 °F)	
44	64 °C (147 °F)	72 °C (162 °F)	
45	62 °C (144 °F)	69 °C (156 °F)	
46	59 °C (138 °F)	66 °C (150 °F)	44 °C (111 °F)
47	58 °C (136 °F)	66 °C (150 °F)	62 °C (143 °F)
48	48 °C (119 °F)	68 °C (154 °F)	71 °C (160 °F)
49	46 °C (114 °F)	68 °C (155 °F)	66 °C (151 °F)
50	53 °C (127 °F)	66 °C (151 °F)	65 °C (149 °F)
51	57 °C (135 °F)	50 °C (122 °F)	64 °C (148 °F)
52	57 °C (134 °F)	65 °C (149 °F)	65 °C (149 °F)
53	55 °C (131 °F)	69 °C (157 °F)	51 °C (123 °F)
54	53 °C (127 °F)	69 °C (157 °F)	
55	46 °C (114 °F)	67 °C (152 °F)	
56	33 °C (91 °F)	66 °C (150 °F)	
57	34 °C (93 °F)	63 °C (145 °F)	
58	29 °C (84 °F)	64 °C (148 °F)	
59	28 °C (82 °F)	64 °C (147 °F)	46 °C (115 °F)
60		64 °C (148 °F)	

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
61		65 °C (149 °F)	
62		64 °C (147 °F)	
63		65 °C (149 °F)	
64		64 °C (147 °F)	43 °C (109 °F)
65		38 °C (100 °F)	
66		37 °C (99 °F)	
67		34 °C (93 °F)	
68		33 °C (91 °F)	43 °C (110 °F)
69		32 °C (89 °F)	
70		30 °C (86 °F)	
71		32 °C (89 °F)	41 °C (105 °F)
72		32 °C (90 °F)	
73			
74			
75			
76			
77			
78			41 °C (105 °F)
79			
80			
81			
82			
83			
84			
85			36 °C (97 °F)
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			34 °C (94 °F)

Cuadro A2-4: Registros diarios de temperatura de las pilas en la instalación 2

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
1	11 °C (52 °F)	6 °C (42 °F)	11 °C (52 °F)
2	15 °C (59 °F)	2 °C (36 °F)	12 °C (53 °F)
3	25 °C (77 °F)	14 °C (58 °F)	18 °C (65 °F)
4	44 °C (111 °F)	32 °C (90 °F)	24 °C (76 °F)
5	50 °C (122 °F)	57 °C (135 °F)	17 °C (62 °F)
6	53 °C (127 °F)	62 °C (144 °F)	36 °C (96 °F)
7	54 °C (129 °F)	67 °C (153 °F)	52 °C (126 °F)
8	57 °C (134 °F)	53 °C (127 °F)	59 °C (139 °F)
9	59 °C (138 °F)	59 °C (138 °F)	61 °C (141 °F)
10	64 °C (147 °F)	59 °C (139 °F)	64 °C (148 °F)
11	63 °C (146 °F)	66 °C (150 °F)	64 °C (147 °F)
12	56 °C (133 °F)	67 °C (153 °F)	50 °C (122 °F)
13	58 °C (136 °F)	66 °C (150 °F)	66 °C (151 °F)
14	64 °C (148 °F)	59 °C (139 °F)	50 °C (122 °F)
15	59 °C (139 °F)	62 °C (144 °F)	57 °C (134 °F)
16	52 °C (126 °F)	60 °C (140 °F)	67 °C (152 °F)
17	54 °C (130 °F)	64 °C (147 °F)	67 °C (153 °F)
18	64 °C (148 °F)	67 °C (153 °F)	67 °C (152 °F)
19	66 °C (150 °F)	67 °C (152 °F)	44 °C (111 °F)
20	53 °C (128 °F)	66 °C (150 °F)	56 °C (133 °F)
21	56 °C (133 °F)	64 °C (147 °F)	67 °C (152 °F)
22	59 °C (138 °F)	67 °C (152 °F)	66 °C (150 °F)
23	56 °C (133 °F)	69 °C (157 °F)	66 °C (151 °F)
24	64 °C (148 °F)	66 °C (151 °F)	67 °C (153 °F)
25	66 °C (150 °F)	68 °C (154 °F)	66 °C (150 °F)
26	68 °C (155 °F)	67 °C (152 °F)	72 °C (161 °F)
27	70 °C (158 °F)	67 °C (153 °F)	73 °C (163 °F)
28	69 °C (157 °F)	69 °C (156 °F)	72 °C (162 °F)
29	69 °C (156 °F)	67 °C (152 °F)	68 °C (155 °F)
30	60 °C (140 °F)	60 °C (140 °F)	68 °C (155 °F)
31	65 °C (149 °F)	56 °C (133 °F)	66 °C (151 °F)
32	64 °C (148 °F)	Pérdida de conexión	62 °C (143 °F)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
33	69 °C (156 °F)	39 °C (102 °F)	72 °C (161 °F)
34	69 °C (156 °F)	44 °C (111 °F)	71 °C (160 °F)
35	67 °C (153 °F)	44 °C (112 °F)	70 °C (158 °F)
36	67 °C (152 °F)	60 °C (140 °F)	67 °C (153 °F)
37	53 °C (128 °F)	60 °C (140 °F)	64 °C (147 °F)
38	61 °C (142 °F)	58 °C (136 °F)	62 °C (143 °F)
39	58 °C (136 °F)	34 °C (94 °F)	61 °C (142 °F)
40	66 °C (150 °F)	49 °C (120 °F)	44 °C (111 °F)
41	69 °C (156 °F)	54 °C (129 °F)	68 °C (154 °F)
42	69 °C (156 °F)	49 °C (121 °F)	68 °C (154 °F)
43	68 °C (155 °F)	45 °C (113 °F)	66 °C (151 °F)
44	66 °C (150 °F)	46 °C (115 °F)	61 °C (142 °F)
45	64 °C (148 °F)	27 °C (80 °F)	54 °C (130 °F)
46	64 °C (147 °F)	32 °C (89 °F)	52 °C (125 °F)
47	38 °C (100 °F)	39 °C (102 °F)	Pérdida de conexión
48	61 °C (142 °F)	38 °C (100 °F)	Pérdida de conexión
49	64 °C (147 °F)	35 °C (95 °F)	Pérdida de conexión
50	63 °C (146 °F)	34 °C (93 °F)	45 °C (113 °F)
51	64 °C (147 °F)	33 °C (91 °F)	47 °C (117 °F)
52	63 °C (146 °F)	35 °C (95 °F)	44 °C (112 °F)
53	62 °C (144 °F)	21 °C (70 °F)	50 °C (122 °F)
54	42 °C (108 °F)	36 °C (96 °F)	50 °C (122 °F)
55	47 °C (117 °F)	37 °C (99 °F)	61 °C (142 °F)
56	54 °C (130 °F)	43 °C (110 °F)	61 °C (142 °F)
57	55 °C (131 °F)	45 °C (113 °F)	59 °C (139 °F)
58	55 °C (131 °F)	34 °C (93 °F)	58 °C (137 °F)
59	54 °C (129 °F)	32 °C (89 °F)	56 °C (133 °F)
60	31 °C (87 °F)	29 °C (84 °F)	54 °C (129 °F)
61	34 °C (93 °F)	Pérdida de conexión	54 °C (130 °F)
62	40 °C (104 °F)	Pérdida de conexión	66 °C (150 °F)
63	46 °C (115 °F)	19 °C (67 °F)	73 °C (164 °F)
64	51 °C (124 °F)	16 °C (61 °F)	71 °C (160 °F)
65	53 °C (128 °F)	20 °C (68 °F)	68 °C (155 °F)

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

Día	Pila de control (CP)	Pila de dosis baja (LD)	Pila de dosis alta (HD)
66	54 °C (129 °F)	23 °C (73 °F)	66 °C (151 °F)
67	54 °C (130 °F)	31 °C (87 °F)	54 °C (129 °F)
68	37 °C (99 °F)	43 °C (110 °F)	58 °C (137 °F)
69	36 °C (96 °F)	58 °C (137 °F)	61 °C (141 °F)
70	34 °C (94 °F)	62 °C (143 °F)	59 °C (138 °F)
71	34 °C (94 °F)	60 °C (140 °F)	58 °C (137 °F)
72	34 °C (94 °F)	57 °C (135 °F)	58 °C (137 °F)
73	33 °C (91 °F)	53 °C (128 °F)	58 °C (136 °F)
74	32 °C (90 °F)	51 °C (124 °F)	57 °C (135 °F)
75	32 °C (90 °F)	49 °C (120 °F)	57 °C (134 °F)
76	Pérdida de conexión	47 °C (117 °F)	56 °C (133 °F)
77	Pérdida de conexión	45 °C (113 °F)	55 °C (131 °F)
78	Pérdida de conexión	42 °C (107 °F)	54 °C (129 °F)
79	27 °C (81 °F)	41 °C (106 °F)	52 °C (125 °F)
80	24 °C (76 °F)	42 °C (108 °F)	46 °C (115 °F)
81	23 °C (73 °F)	65 °C (149 °F)	44 °C (111 °F)
82	25 °C (77 °F)	70 °C (158 °F)	43 °C (109 °F)
83	26 °C (79 °F)	66 °C (150 °F)	42 °C (107 °F)
84	30 °C (86 °F)	61 °C (142 °F)	40 °C (104 °F)
85	33 °C (91 °F)	59 °C (138 °F)	36 °C (96 °F)
86	38 °C (100 °F)	57 °C (135 °F)	33 °C (91 °F)
87	44 °C (111 °F)	55 °C (131 °F)	32 °C (89 °F)
88	50 °C (122 °F)	54 °C (129 °F)	31 °C (88 °F)
89	53 °C (127 °F)	52 °C (126 °F)	31 °C (87 °F)
90	57 °C (134 °F)	51 °C (123 °F)	31 °C (87 °F)
91	60 °C (140 °F)	49 °C (121 °F)	30 °C (86 °F)
92	61 °C (142 °F)	47 °C (116 °F)	29 °C (84 °F)
93	61 °C (141 °F)	44 °C (112 °F)	28 °C (83 °F)
94	60 °C (140 °F)	43 °C (110 °F)	28 °C (82 °F)
95			28 °C (82 °F)

Cuadro A2-5: Lecturas periódicas de humedad y oxígeno de las pilas en la instalación 1

	Pila de control		Pila de dosis baja		Pila de dosis alta	
Semana	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)
1	65		65			
2	55		55	11	60	12
3	60	10	55	13	65	8
4	60	8	50	15	60	8
5	55	12	50		50	16
6	52	9	45	11	40	12
7	30	20	50		40	17
8	50	8	40	16	35	
9		14	45	14	40	18
10	45		45		40	
11	40	18	40	17	35	18
12	35	20	40			
13			35	18	30	19
14			35	19	30	19
15			35			
16			30	20		

Cuadro A2-6: Lecturas periódicas de humedad y oxígeno de las pilas en la instalación 2

	Pila de control		Pila de dosis baja		Pila de dosis alta	
Semana	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)
1	49-50		44-49		44-49	
2	49-54	20	49-54	13	44-49	12
3	44-49		49-54		49-54	
4	50-54	8	49-54	10	49-54	19
5	50-54		44-49		49-54	
6	49-54	9	44-49	20	49-54	10
7	44-49		40-44		44-49	
8	44-49	15	40-44	19	44-49	20
9	44-49		40-44		49-54	

Compostaje a escala piloto de envases alimentarios de fibra con recubrimientos poliméricos certificados como compostables

	Pila de control		Pila de dosis baja		Pila de dosis alta	
Semana	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)	Humedad (%)	Oxígeno (%)
10	44-49	16	40-44	20	49-54	18
11			44-49		49-54	
12	44-49	20	44-49		49-54	20
13	49-54		44-49	20	44-49	
14			40-44		44-49	



CEC
CCA
CCE

cec.org

