

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**EVALUACIÓN DE BIOPOLÍMEROS UTILIZADOS PARA EMPAQUE DE
ALIMENTOS EMPLEADOS EN CONDICIONES DE COMPOSTAJE CASERO**

Trabajo final de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como
parte de los requisitos para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Kevin Segura Rodríguez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

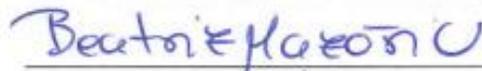
San José, Costa Rica

2023

Trabajo final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas



Ing. Kevin Segura Rodríguez
Candidato



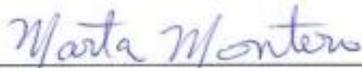
Beatriz Mazón Villegas, PhD
Directora, Comité Asesor



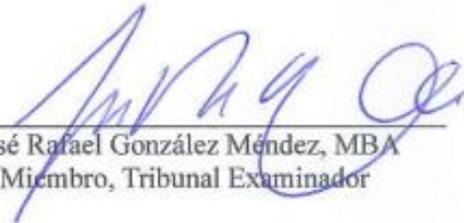
Gabriela Montes de Oca Vásquez, PhD
Miembro, Comité Asesor



Ana María Quirós Blanco, Lic.
Miembro, Comité Asesor



Marta Montero Calderón, PhD
Presidenta, Tribunal Examinador



José Rafael González Méndez, MBA
Miembro, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelo, Don Felo

A mi madre, Sandra

A mi familia

Gracias por sus enseñanzas en el camino de la vida

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por siempre ser un apoyo incondicional durante toda mi vida. En especial a mi madre, Sandra, quien siempre ha sido mi soporte emocional y a la cual le estoy plenamente agradecido por todo lo que me ha dado. A mis dos abuelas, María y Gerardina, por todo el amor que me brindan día con día. A mis tías, Hazel y Angela, por siempre estar para mí y ser grandes consejeras.

A Beatriz Mazón Villegas, directora del proyecto, quien me dio su apoyo desde el primer día. Le agradezco por su paciencia, confianza, guía y consejos a lo largo de todo el proceso.

A Gabriela Montes de Oca Vásquez, por su guía y recomendaciones durante todo el proceso. Por estar anuente a enseñarme sobre el trabajo que realiza en el laboratorio.

A Ana María Quirós Blanco, por su apoyo y recomendaciones brindadas.

A Diego Batista Menezes, por la capacitación brindada en el uso de los equipos de caracterización. Sus recomendaciones y ayuda fueron importantes durante la investigación.

A Silvia Fernández Fernández, por ser mi consejera y apoyo incondicional, estar a mi lado durante todo el proceso y siempre con la disposición de ayudarme en todo momento.

A Yeymi Torrez Sequeira, por su amistad, apoyo y aconsejarme durante la investigación.

A María José Vega Mora, por su inigualable amistad y siempre aconsejarme durante todos estos años.

A mis amigos y los amigos que hice durante esta etapa universitaria, personas que admiro y con las que siempre voy a estar agradecido por su amistad, por las risas y momentos que vivimos.

Al programa de becas CeNAT-CONARE por financiar este proyecto de investigación, al LANOTEC por facilitarme los insumos y equipos requeridos.

Al proyecto de acción social ED-3530 “Estrategias para la sustitución de plásticos de un solo uso en servicios de alimentación y pequeñas empresas tradicionales guanacastecas”, del cual forma parte este proyecto.

A la empresa DosMil50 Empaques Compostables y José González por aportar los bioplásticos para realizar este proyecto y por buscar alternativas de empaques más amigables con el medio ambiente.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y la Universidad de Costa Rica por el proceso de formación académica que me brindaron para concluir esta etapa.

TABLA DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE TABLAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo General.....	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1. Plásticos	5
3.1.1. Definición	5
3.1.2. Clasificación	5
3.1.3. Producción de plásticos y su problemática.....	6
3.2. Bioplásticos	7
3.2.1. Definiciones y clasificación.....	7
3.2.2. Bioplásticos: PLA y PBAT	8
3.2.2.1. Ácido Poliláctico (PLA).....	8
3.2.2.2. Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT)	9
3.2.3. Bioplásticos: alternativas y desafíos.....	10
3.3. Proceso de compostaje.....	11
3.3.1. Definiciones y etapas.....	11
3.3.2. Variables fundamentales en el proceso	12
3.3.2.1. pH.....	13
3.3.2.2. Temperatura	13
3.3.2.3. Relación carbono-nitrógeno	14
3.3.2.4. Humedad	14
3.3.2.5. Aireación	15
3.3.3. Sistemas de compostaje	15
3.4. Compostaje de Bioplásticos.....	16
3.4.1. Biodegradable vs compostable	16
3.4.2. Normativa y certificaciones.....	16
3.4.3. Antecedentes del compostaje de bioplásticos.....	17
3.4.4. Ecotoxicidad	18
3.5. Caracterización de los bioplásticos.....	19
3.5.1. Análisis termogravimétrico (TGA)	19
3.5.2. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	20
3.5.3. Espectroscopía Infrarroja por Transformada De Fourier (FTIR)	21
3.5.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
4.1. Bioplásticos utilizados en el proceso de compostaje.....	25
4.1.1. Preparación de los bioplásticos para el ensayo de compostaje.....	25
4.2. Sistemas de compostaje utilizados	26
4.2.1. Reactores tipo caja.....	26

4.2.2.	Reactores rotatorios	27
4.3.	Preparación del residuo sintético.....	29
4.4.	Control de las variables durante el proceso de compostaje	33
4.4.1.	Variables controladas en los reactores tipo caja.....	33
4.4.2.	Variables controladas en los reactores rotatorios	34
4.5.	Validación del ensayo de compostaje.....	34
4.5.1.	Determinación del grado de desintegración de los bioplásticos.....	34
4.5.2.	Disminución del contenido de sólidos volátiles	35
4.6.	Análisis de caracterización de bioplásticos compostados	36
4.6.1.	Análisis termogravimétrico	36
4.6.2.	Calorimetría diferencial de barrido.....	37
4.6.3.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.....	38
4.6.4.	Microscopía electrónica de barrido	39
4.7.	Análisis de la composición química del compost final	40
4.8.	Prueba de ecotoxicidad mediante germinación de semillas para el compost final	41
4.8.1.	Armado del ensayo de ecotoxicidad.....	41
4.8.2.	Control de la germinación, crecimiento y biomasa de las plantas.....	43
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
5.1.	Desintegración y caracterización de bioplásticos en un sistema de compostaje a escala casera	45
5.1.1.	Desintegración de los bioplásticos	45
5.1.2.	Análisis de la caracterización de los bioplásticos.....	51
5.1.2.1.	Análisis termogravimétrico (TGA).....	51
5.1.2.2.	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	56
5.1.2.3.	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	59
5.1.2.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	63
5.2.	Análisis del compost resultante con y sin bioplásticos de los sistemas de compostaje.....	68
5.2.1.	Análisis de las variables críticas durante el proceso de compostaje con bioplásticos.....	68
5.2.1.1.	Temperatura	68
5.2.1.2.	Control de masa y contenido de humedad	72
5.2.1.3.	Sólidos volátiles	74
5.2.2.	Análisis químico completo del residuo sintético utilizado para el compostaje de bioplásticos	75
5.2.2.1.	Residuo sintético en RC	75
5.2.2.2.	Residuo sintético en RR	76
5.2.2.3.	Comparación de los resultados del análisis químico de RS por bioplástico	77
5.2.2.4.	Clasificación final del compost obtenido de los sistemas de compostaje.	80
5.3.	Análisis de la ecotoxicidad del compost resultante con la adición de bioplásticos	82
5.3.1.	Variación de temperatura y humedad relativa.....	82

5.3.1.1.	Temperatura	83
5.3.1.2.	Humedad relativa	84
5.3.2.	Porcentaje de germinación de las semillas previo a realizar el análisis de ecotoxicidad.....	84
5.3.3.	Análisis de ecotoxicidad en plantas de lechuga cultivadas en tierra comercial y compost de sistemas de compostaje RC y RR.....	85
5.3.3.1.	Germinación máxima de lechuga.....	85
5.3.3.2.	Longitud de plantas	87
5.3.3.3.	Biomasa producida.....	89
5.3.4.	Análisis de ecotoxicidad en plantas de cebolla cultivadas en tierra comercial y compost de sistemas de compostaje RC y RR.....	91
5.3.4.1.	Germinación máxima de cebolla.....	91
5.3.4.2.	Longitud de plantas	93
5.3.4.3.	Biomasa producida.....	94
6.	CONCLUSIONES	97
7.	RECOMENDACIONES	99
8.	REFERENCIAS	100
9.	ANEXOS	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los bioplásticos.	7
Figura 2. Variación de la temperatura (°C) y pH versus tiempo durante las cuatro fases de compostaje.	11
Figura 3. Ilustración de una curva típica de termogravimetría que representa la pérdida de peso (%) versus la temperatura (°C).	19
Figura 4. Eventos en una curva DSC.	21
Figura 5. Espectros FTIR. a) Espectro de absorción b) Espectro infrarrojo típico de una muestra.	22
Figura 6. Micrografías SEM de PLA que fueron tratadas en sistemas de compostaje caseros. a) Vista superficial. b) Vista Lateral.	23
Figura 7. Materiales de empaque empleados para realizar el proceso de compostaje. a) PLA. b) PBAT.	25
Figura 8. Bioplásticos de PLA y PBAT cortados y secados a 40°C alcanzar masa constante.	26
Figura 9. Reactores de compostaje tipo caja (RC) utilizados para el proceso de compostaje de PLA y PBAT durante 6 meses.	26
Figura 10. Distribución de los RC para ejecutar el proceso de compostaje con la adición de bioplásticos y el respectivo control sin bioplásticos. CB: Muestras para análisis de caracterización de bioplásticos. EE: Muestras para análisis de ecotoxicidad.	27
Figura 11. Compostera rotatoria KS-100 (360 Soluciones Verdes, modelo KS).	28
Figura 12. Distribución de RR para realizar el proceso de compostaje con adición de bioplásticos y control sin bioplásticos.	28
Figura 13. Proceso de elaboración de RS. a) Hidratación de alimento para conejo. b) Adición de compost maduro, aceite de maíz, azúcar, urea y almidón de maíz. c) Incorporación de aserrín. d) RS luego de mezclar todos los materiales.	32
Figura 14. Reactores de compostaje tipo caja con la adición de PLA, PBAT y control al RS, respectivamente.	32
Figura 15. Analizador termogravimétrico (TGA) empleado para analizar muestras de PLA y PBAT durante la duración del proceso de compostaje.	37
Figura 16. Análisis de DSC. a) Equipo DSC. b) Detalle de cápsulas empleadas en el análisis.	38
Figura 17. Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier.	38
Figura 18. Microscopio Electrónico de Barrido.	39
Figura 19. Vista de perfil y superficial de las muestras de PLA preparadas para realizar la cobertura iónica de carbón y oro.	40
Figura 20. Total de las muestras para realizar la prueba de ecotoxicidad en los RC y los RR.	42
Figura 21. Bandejas de germinación utilizadas para la prueba de ecotoxicidad.	43
Figura 22. Invernadero utilizado para ensayos de ecotoxicidad. a) Invernadero b) Acomodo de bandejas de germinación.	43
Figura 23. Puntos de inicio y final para tener la longitud total (hojas, tallo y raíz) de plantas de lechuga y cebolla.	44
Figura 24. Porcentaje de Material desintegrado y no desintegrado (ND) promedio de bioplásticos de PLA y PBAT en sistemas de compostaje tipo caja (CPLA y CPBAT) y composteras rotatorias (RPLA y RPBAT).	46
Figura 25. Termogramas de los bioplásticos durante el proceso de compostaje. A: CPLA, B: RPLA, C: CPBAT y D: RPBAT.	51

Figura 26. Derivada (D_{TGA}) del peso de los bioplásticos durante el proceso de compostaje. A: CPLA, B: RPLA, C: CPBAT y D: RPBAT.	54
Figura 27. Curvas de calentamiento mediante análisis DSC para el PLA durante el compostaje. A: CPLA, B: RPLA. T_g : Temperatura de transición vítrea. T_f : Temperatura de fusión.....	56
Figura 28. Curvas de calentamiento mediante análisis de DSC para PBAT durante el compostaje. A: CPBAT, B: RPBAT.....	59
Figura 29. Espectro FTIR de PLA y PBAT durante el proceso de compostaje. A) CPLA B) RPLA C) CPBAT y D) RPBAT.	60
Figura 30. Temperatura interna ($^{\circ}C$) de los sistemas de compostaje RPLA, RPBAT y RCON, señalando las fases principales del proceso de compostaje.	71
Figura 31. La masa (g) del residuo sintético en reactores tipo caja durante 180 días de duración del proceso de compostaje.....	72
Figura 32. Contenido de humedad (%) del residuo sintético en reactores rotatorios durante 180 días de duración del proceso de compostaje.	73
Figura 33. Disminución (R) del contenido de sólidos volátiles para los tratamientos de compostaje en RC y RR con y sin adición de bioplásticos.....	74
Figura 34. Temperatura y HR promedio en el invernadero registradas durante los ensayos de germinación y el desarrollo de las plántulas de lechuga y cebolla.	82
Figura 35. Germinación máxima de las semillas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).	86
Figura 36. Longitud de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).....	88
Figura 37. Biomasa seca de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).	89
Figura 38. Biomasa seca de la lechuga obtenida a) 100 % tierra comercial (TC) y b) 100 % CF de RC obtenido sin bioplásticos.	90
Figura 39. Germinación máxima de las semillas de cebolla resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).	93
Figura 40. Longitud de plantas de cebolla resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).....	94
Figura 41. Biomasa seca de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).	95
Figura 42. Ubicación de sistemas de compostaje.....	120
Figura 43. Medición de temperatura interna de compost.....	120
Figura 44. Recubridor iónico de oro y carbón para muestras SEM	120
Figura 45. Muestras de bioplásticos recubiertas con oro	120
Figura 46. Secado de compost previo a tamizar.....	120
Figura 47. Tamizado de PBAT	120
Figura 48. Prueba de germinación de semillas de a) lechuga y b) cebolla.....	121
Figura 49. Ensayo de ecotoxicidad a) invernadero utilizado, b) distribución de bandejas	121
Figura 50. Cosecha de a) cebolla y b) lechuga.....	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normativa relacionada con el compostaje de bioplásticos.....	17
Tabla 2. Estudios desarrollados en compostaje de bioplásticos a nivel mundial.....	18
Tabla 3. Composición del residuo sintético.....	29
Tabla 4. Masas requeridas de cada material para elaborar RS en reactores de compostaje tipo caja y rotatorio.....	31
Tabla 5. Días de medición durante el proceso de compostaje, Adaptado de UNE-EN ISO 20200:2015	33
Tabla 6. Desintegración del PLA a lo largo del tiempo (días) del proceso de compostaje en CPLA y RPLA.....	48
Tabla 7. Desintegración del PBAT a lo largo del tiempo (días) del proceso de compostaje en CPBAT y RPBAT.....	49
Tabla 8. Pérdida de masa a tres temperaturas (300, 350 y 400 °C) de los diferentes sistemas de compostaje.....	52
Tabla 9. Eventos principales de degradación (T_{PLA} y T_{PBAT} (°C)) obtenidos del DTGA para ambos bioplásticos en los sistemas de compostaje estudiados.....	55
Tabla 10. Temperaturas de transición vítrea (T_g) y de fusión (T_f) del PLA obtenidos durante el proceso de compostaje en CPLA y RPLA.....	57
Tabla 11. Rangos de longitudes de onda asociados al PLA y PBAT reportados en la literatura.....	59
Tabla 12. Longitud de onda y absorbancia para PLA y PBAT en los dos sistemas de compostaje, en los días 0, 84 y 180.....	61
Tabla 13. Índice carbonilo para PLA en los dos sistemas de compostaje.....	62
Tabla 14. Índice carbonilo para PBAT en los dos sistemas de compostaje.....	62
Tabla 15. Micrografías SEM obtenidas del PLA durante un proceso de compostaje de 180 días... 64	64
Tabla 16. Micrografías SEM obtenidas del PBAT durante un proceso de compostaje de 180 días. 67	67
Tabla 17. Temperaturas promedio, máximas y mínimas recopiladas de los reactores de compostaje tipo caja (RC) y tipo rotatorias (RR) durante los 180 días del proceso de compostaje.....	68
Tabla 18. Análisis químico completo del residuo sintético en RC y RR.....	78
Tabla 19. Clasificación final del compost obtenido de los dos sistemas de compostaje según el RTCR 485:2016.....	80
Tabla 20. Valores promedio de las variables medidas para los tratamientos con siembra de lechuga en 100 % tierra comercial (TC).....	85
Tabla 21. Valores promedio de las variables medidas para los tratamientos sembrados con cebolla en 100 % tierra comercial.....	91
Tabla 22. Principales condiciones que afectaron de manera adicional los ensayos de ecotoxicidad.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS

B: Boro
bio-PA: Biopoliamida
bio-PE: Biopolietileno
bio-PET: Biotereftalato de polietileno
BS: Biomasa de lechuga o cebolla luego de ser secadas en el horno a 60 °C hasta masa constante
BT: Biomasa total de plantas de lechuga o cebolla luego de ser cosechadas
C: Carbono
C:N: Relación carbono nitrógeno
Ca: Calcio
CB: Caracterización de Biopolímeros
CCON: Tratamientos sin biopolímeros en reactores tipo Caja
CE: Conductividad eléctrica
CeNAT: Centro Nacional de Alta Tecnología
CF: Compost final obtenido de los procesos de compostaje
CFSB: CF sin la adición de bioplásticos
CH: Contenido de humedad (%)
CHC: Contenido de humedad de los cultivos luego de cosecharlos (%)
CIA: Centro de Investigaciones Agronómicas
CIPRONA: Centro de Investigaciones en Productos Naturales
CO₂: Dióxido de carbono
CPBAT: Tratamientos con PBAT en reactores tipo Caja
CPLA: Tratamientos con PLA en reactores tipo Caja
Cu: Cobre
D: Porcentaje de desintegración (%)
DSC: Calorimetría Diferencial de Barrido
DTGA: Derivada de los termogramas TGA
EF: Ensayo de Ecotoxicidad
EE-RC: Ensayo de Ecotoxicidad utilizando compost final de reactores tipo caja
EE-RR: Ensayo de Ecotoxicidad utilizando compost final de reactores rotatorios
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FDA: American Food and Drug Administration
Fe: Hierro
FTIR: Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier
GM: Germinación máxima de semillas de lechuga o cebolla que brotaron
HR: Humedad relativa (%)
Ico: Índice carbonilo
K: Potasio
LANOTEC: Laboratorio Nacional de Nanotecnología
LP: Longitud de plantas
Mg: Magnesio
Mn: Manganeseo

N: Nitrógeno
NCh2880: Compost – Clasificación y requisitos
NH₃: Amoníaco
P: Fósforo
PBAT: Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato)
PBS: Succinato de Polibutileno
PCL: Policaprolactona
PE: Polietileno
PET: Tereftalato de polietileno
PF: Cantidad de plantas al finalizar el ensayo
PHA: Polihidroxialcanoato
PLA: Ácido poliláctico
PM₃₀₀: Pérdida de masa obtenida por TGA de una muestra al alcanzar 300 °C
PM₃₅₀: Pérdida de masa obtenida por TGA de una muestra al alcanzar 350 °C
PM₄₀₀: Pérdida de masa obtenida por TGA de una muestra al alcanzar 400 °C
PP: Polipropileno
PP: Cajas de polipropileno
PTT: Tereftalato de Politrimetileno
R: Disminución en el contenido de sólidos volátiles (g)
RC: Reactores tipo Caja
RCON: Tratamientos sin biopolímeros en reactores tipo Rotatorias
RPBAT: Tratamientos con PBAT en reactores tipo Rotatorias
RPLA: Tratamientos con PLA en reactores tipo Rotatorias
RR: Reactores tipo composteras Rotatorias
RS: Residuo sintético preparado para iniciar el proceso de compostaje
RTCR 485:2016: Sustancias químicas, fertilizantes y enmiendas para uso agrícola. Tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos y contaminantes
S: Azufre
SEM: Microscopía Electrónica de Barrido
SV: Contenido de sólidos volátiles (%)
TC: Tierra comercial
Tf: Temperatura de fusión
Tg: Temperatura de transición vítrea
TGA: Análisis Termogravimétrico
T_{PBAT}: Temperatura donde se da la degradación del PBAT obtenido de los gráficos de DTGA
T_{PLA}: Temperatura donde se da la degradación del PLA obtenido de los gráficos de DTGA
Zn: Zinc

RESUMEN

La demanda mundial de plásticos sigue en aumento, siendo los plásticos de un solo uso una problemática a nivel mundial, dado que por lo general terminan en la basura. Una alternativa para mitigar los efectos de los plásticos de fuentes fósiles son los bioplásticos, que se pueden producir a partir de biomasa o recursos alimentarios. Para su uso, es importante conocer la forma adecuada de desecharlos para que realmente cumplan con el objetivo por el cual fueron fabricados. Por este motivo, el compostaje de bioplásticos es una alternativa viable para revalorizar los bioplásticos que cumplieron su función principal. El éxito del compostaje de los bioplásticos depende de las propiedades específicas de cada material, entre otros factores.

En esta investigación se analizó el proceso de compostaje casero en reactores tipo caja (RC) y reactores rotatorios (RR) de dos bioplásticos de 20 μm utilizados en la industria de alimentos (PLA y PBAT). Mediante el seguimiento de las normas AS 5810-2010 y UNE-EN ISO 20200:2015 para determinar el grado de desintegración de ambos bioplásticos. Para estudiar los cambios en los materiales que sugieran biodegradación se utilizaron técnicas de caracterización de materiales como TGA, DSC, FTIR y SEM. Luego del proceso de compostaje se realizaron análisis del compost final (CF) resultante de los tratamientos (PLA, PBAT y control) de los dos sistemas de compostaje (RC y RR) incluidos en este estudio. La finalidad es determinar si hay efecto de los bioplásticos sobre las propiedades iniciales del residuo sintético en comparación con los tratamientos. Finalmente, se utilizó la norma AS 5810-2010 en complemento con la UNE-EN 13432:2001 para establecer la ecotoxicidad del compost resultante en la germinación, crecimiento y biomasa de plantas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) y cebolla (*Allium cepa L.*).

El PLA en RC se desintegró un 6,1 %, y en RR un 97,5%. El PBAT se desintegró un 20,9 % en RC y un 46,3 % en RR. Del análisis TGA, la tendencia general es que conforme avanza el tiempo de compostaje y aumenta la temperatura del análisis TGA, también aumenta la pérdida de masa de los bioplásticos. Los análisis de TGA evidenciaron que la estructura del PLA es más susceptible a los cambios de temperatura luego de 180 días de

compostaje. El análisis DSC permitió determinar las temperaturas de transición vítrea (T_g) y de fusión de los bioplásticos versus el tiempo. La T_g inicial del PLA fue de 61,2 °C; al final esta fue de 59,5 °C y 55,7 °C en RC y RR, respectivamente. Mediante SEM se estableció que ambos bioplásticos presentaron biodegradación, debido a la presencia de grietas y agujeros en la superficie.

El análisis químico posterior al proceso de compostaje determinó que, entre tratamientos los parámetros analizados para RC no presentaron diferencias significativas. Esto implica que la adición de bioplásticos desintegrados no tuvo efecto en las propiedades finales del compost. El resultado contrario se obtuvo en el compost final de RR. Los parámetros P, B, Ca y CE presentaron diferencias entre tratamientos. Estas se pueden asociar a la desintegración de los bioplásticos en el compost.

Los ensayos de ecotoxicidad no son concluyentes para la germinación máxima, longitud de plantas y biomasa de lechuga y cebolla en las mezclas de compost utilizadas. En lechuga, el tratamiento con 75 % Tierra comercial (TC) y 25 % CF con residuos de PBAT tuvo como efecto que las variables aumentaran con respecto al 100 % TC en el CF para ambos sistemas de compostaje, lo que implica que es un mejor sustrato para el desarrollo de lechuga. Lo contrario sucedió en cebolla, donde las variables tienden a disminuir respecto a TC (100 %). El CF de ambos sistemas con 50 % TC y 50 % CF con residuos de PLA tuvo como efecto una disminución en las variables incluidas en este análisis.

Este estudio estableció que el compostaje a escala casera empleando composteras rotatorias es una alternativa para la desintegración del PLA y PBAT de 20 μm utilizados en esta investigación. Además, propone el compostaje casero como una alternativa consecuente con el medio ambiente. Está a la vez implementa beneficios como la economía circular y la disminución de la huella de carbono.

Palabras Clave: bioplásticos, compost casero, empaques, desintegración, biodegradabilidad, ecotoxicidad

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los plásticos están presentes en la vida cotidiana de las personas [1] y su demanda mundial sigue en aumento [2]. La producción global de plásticos para 2021 fue de 390 millones de toneladas [3], de los cuales el 90,2 % proviene de fuentes fósiles [4]. Diversas proyecciones estiman que para el 2050 la producción global de plásticos puede llegar a 1480 millones de toneladas [5], o bien, alcanzar los 1231 millones de toneladas anuales para el 2060 [6]. Ambos escenarios son preocupantes, dado que proyectan que se estaría alcanzando aproximadamente un poco más del triple de la masa de plástico que la producida en 2021.

La excesiva producción de plásticos se debe a la dependencia que existe en este material en la mayoría de las industrias. Para 2021, la producción se destinaba principalmente para empaque (44 %), edificaciones y construcciones (18 %), mercado automotriz (8 %), electrónicos (7 %), casero (7 %), agricultura (4 %) y otros (12 %) [4]. La producción de plásticos es de bajo costo, fácil producción [7], disponibilidad y permite la producción en masa [8] haciéndolos indispensables en muchas industrias. Los plásticos se adaptan y se utilizan en diversas aplicaciones debido a la capacidad que presentan para modificar su estructura química [9], brindándoles propiedades de flexibilidad, durabilidad y ligereza [8].

Sin embargo, la gran problemática radica en que muchos de los plásticos son de un solo uso, siendo propensos a terminar en la basura [10]. Además, se ha identificado que existe desinformación sobre la forma correcta de descartarlos una vez cumplen su función. Lo que conlleva a que se generen desechos a partir de la producción continua de plásticos derivados del petróleo [11], lo cual produce contaminación ambiental y compromete la supervivencia de seres humanos y organismos vivos [12].

La excesiva acumulación de residuos plásticos sintéticos se desintegra por procesos físicos químicos y biológicos [13]. Estos con el paso del tiempo van generando fragmentos más pequeños (microplásticos o nanoplásticos). Estos fragmentos se pueden encontrar prácticamente en los organismos vivos y toda la biosfera del planeta [14]. Por esta razón surge la necesidad de buscar alternativas a los plásticos convencionales. Los bioplásticos

son una opción interesante que se viene investigando con más fuerza en los últimos años. Estos son una potencial solución para mitigar el impacto que han tenido los plásticos de fuentes fósiles [15].

Los bioplásticos pueden ser biodegradables, biobasados o tener ambas propiedades [16]. Su producción se puede obtener a partir de biomasa o recursos alimentarios, como almidón, maíz, caña de azúcar, entre otros. Esto genera ventajas como la implementación de una economía circular, la disminución de la huella de carbono y las cargas medioambientales [15], así como la reducción del uso de recursos fósiles al sustituirlos por materias renovables [17].

Según estimaciones, la producción mundial de bioplásticos será de 6,3 millones de toneladas para el 2027, siendo el ácido poliláctico (PLA) el que destaque con un 37,9 % seguido por la poliamida (PA) con un 18,7 % y el Polibutilén Adipato-co-Tereftalato (PBAT) tendrá una producción de tan solo el 1,6 % del total [3]. Si bien, estos materiales han adquirido interés presentan algunas desventajas, como su costo de producción, que los hace más caros que los derivados del petróleo [18]. Además, estos requieren condiciones específicas para el compostaje. Los bioplásticos compostables requieren condiciones determinadas de temperatura y presión [19] para el compostaje. Por ende, resulta importante efectuar una correcta disposición de los bioplásticos una vez cumplen su vida útil.

El compostaje es una de las alternativas más adecuadas para su revalorización. En las condiciones adecuadas, el compostaje puede ser capaz de descomponer los materiales en compost, y el producto obtenido puede ser aplicado como enmienda. A nivel nacional se ha desarrollado el *I Plan Nacional de compostaje 2020-2050* con el objetivo de facilitar a la sociedad practicas correctas para evitar el envío de materia orgánica a rellenos sanitarios. Además, este tiene el fin de disminuir las emisiones de metano y, por ende, contribuir a la descarbonización [20]. La Norma **INTE B25:2019/Enm 1:2020** “*Etiquetado RCM para materiales renovables y compostables. Productos con contenido de materiales plásticos*”, establece el correcto etiquetado de productos con materiales plásticos, y su identificación por origen, compostabilidad y capacidad de biodegradabilidad [21].

Además, se han realizado a nivel país dos investigaciones orientadas al compostaje empleando bioplásticos. En el 2022, el Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA) de la Universidad de Costa Rica (UCR), evaluó la biodegradabilidad de productos etiquetados como “compostable”, “biodegradable”, “oxodegradable” o “biobasado”, empleando sistemas de compostaje casero en condiciones tropicales. Además, se estudiaron las comunidades microbianas presentes, que se relacionan con otros estudios de degradación [22]. Además, la investigación de Torrez, S., caracterizó el proceso y calidad del compost obtenido empleando PLA y PBAT de 20 μm de espesor en condiciones de compostaje a escala laboratorio [23].

Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la calidad y ecotoxicidad del compost casero producido a partir de un residuo sintético y la adición de bioplásticos que se utilizan como material de empaque para alimentos. Para ello, se analizará el proceso de desintegración y degradación de dos bioplásticos en dos sistemas de compostaje casero y se determinarán las propiedades del compost resultante. Finalmente, se efectuará un análisis de ecotoxicidad. Los cultivos de lechuga y cebolla se usarán para evaluar la calidad del compost y su posible uso como abono orgánico.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo General*

- Evaluar el proceso de degradación y las propiedades de la calidad y la ecotoxicidad del compost producido de la incorporación de biopolímeros usados como material de empaque para alimentos en condiciones de compostaje casero.

2.2. *Objetivos Específicos*

1. Analizar el proceso de degradación de dos biopolímeros (PLA y PBAT) usados para el empaque de alimentos en dos sistemas de compostaje casero, tipo caja y tipo cilindro rotatorio.
2. Determinar el efecto en las propiedades del compost casero obtenido de la degradación de dos biopolímeros usados para el empaque de alimentos.
3. Efectuar un análisis de ecotoxicidad para establecer la calidad del compost casero obtenido de los sistemas de compostaje con y sin residuos de bioplásticos de PLA y PBAT (20 μm).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. *Plásticos*

3.1.1. **Definición**

El concepto de polímero es necesario establecerlo antes de definir que es un plástico. Un polímero se forma a partir de la unión de moléculas orgánicas pequeñas, para formar cadenas largas [24]. Las moléculas que se unen se llaman monómeros. Estas forman una molécula de mayor tamaño con las mismas características de la original [25]. Esta unión es la columna vertebral del polímero que está formada principalmente por combinaciones entre carbono, oxígeno, nitrógeno y azufre, aunque también se dan combinaciones entre hidrógeno, carbono, oxígeno, cloro, flúor y bromo. Las diferentes combinaciones que se pueden realizar forman polímeros únicos [26].

Plástico es por definición una sustancia que se puede moldear o deformar plásticamente por calor o presión, además esta conserva su forma si alguna de las variables mencionadas no está presente [27], [28]. Está formado de un aglutinante combinado con plastificantes, rellenos, pigmentos u otros [28]. Otra definición para un material plástico es aquel que posee polímeros sintéticos como sus principales componentes [29].

3.1.2. **Clasificación**

Existen diversas clasificaciones de los plásticos, siendo el origen de la fuente del que se obtienen una clasificación importante por considerar. Los plásticos convencionales son materiales sintéticos derivados de fuentes de petróleo y gas natural, algunos ejemplos son el polipropileno (PP), polietileno de alta y baja densidad, entre otros. Los plásticos alternativos se conocen como oxodegradables, biodegradables, compostables y los bioplásticos [30].

Otra clasificación se basa en las propiedades térmicas, donde los polímeros y materiales plásticos se clasifican como termoplásticos o termoestables. Los termoplásticos soportan cambios de temperatura, se pueden recalentar, congelarlos varias veces y darles una forma

nueva [27]. Estos materiales tienen un bajo peso molecular, bajos puntos de fusión y baja resistencia a la ruptura [31]. Algunos ejemplos son el polietileno, polipropileno, poliestireno, entre otros [32].

Por su parte, los termoestables son aquellos que cuando sufren un cambio químico este es irreversible [27] y no se les puede dar una nueva forma [33]. Algunas propiedades es que tienen un alto peso molecular, elevado punto de fusión y gran resistencia a la ruptura [31]. Se pueden mencionar como materiales termoestables las resinas de silicón y el poliéster [32].

3.1.3. Producción de plásticos y su problemática

La producción de plásticos funciona como un medio para brindar soporte a otras industrias que dependen de los productos elaborados a base de polímeros. La ventaja de los plásticos elaborados de manera sintética es que brindan propiedades que normalmente no se encuentran en materiales naturales [34]. Los plásticos tienen la capacidad de cambiar su estructura química, esto les permite adaptarse a las necesidades de distintas industrias [9]. El problema es que suelen convertirse en desechos luego de cumplir su vida útil, si bien se pueden incinerar, reciclar o colocarlos en vertederos esto no disminuye la contaminación por este material [35]. En el mercado mundial en 2015 un 78 % de los residuos terminaban en rellenos sanitarios o en el ambiente, mientras que el 9% pasaba por algún proceso de reciclaje [36]. Para 2019 40 % de los desechos plásticos con una vida útil menor a cinco años provenían de la industria de empaque [37].

Parte del problema es que hay una gran diversidad de plásticos, donde no todos se desechan de la misma forma ni se degradan igual en el ambiente. Por estas razones, se han realizado esfuerzos para buscar otras alternativas que los sustituyan, siendo los bioplásticos una opción interesante que va tomando más fuerza. Los bioplásticos presentan la ventaja sobre los plásticos convencionales de reducir la dependencia de fuentes fósiles limitadas y reducir emisiones de gases de efecto invernadero [38], [39].

3.2. Bioplásticos

3.2.1. Definiciones y clasificación

Un material plástico se puede considerar bioplástico si es de base biológica (biobasados), biodegradable o cuenta con ambas propiedades. Los bioplásticos son un grupo de diferentes materiales que poseen propiedades y aplicaciones diferentes [16], [40]. La **Figura 1** muestra la clasificación general de los bioplásticos, dependiendo si son biodegradables, no biodegradables, biobasados u obtenido de fuentes fósiles.

Los biobasados utilizan materias primas de origen renovable, o biológico, como los materiales de origen vegetal [30]. Además, el término biobasado solo hace referencia al origen de los componentes de carbono con los que se elabora y no al fin de su vida útil [41]. Estas materias primas provienen de diferentes fuentes como papa, soja, caña de azúcar, aceite vegetal, fibra de trigo, celulosa de madera, maíz, arroz, fibra de palma [42], [43] entre otras.

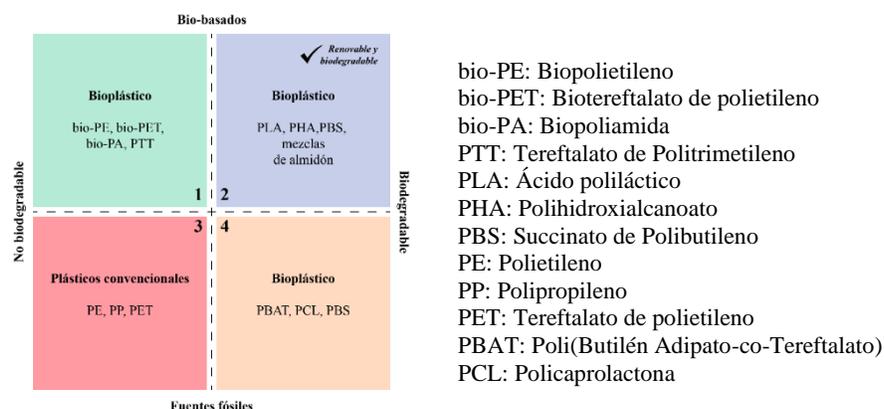


Figura 1. Clasificación de los bioplásticos. Adaptado de [40], [41], [43]

El término biodegradable hace referencia a la capacidad que presenta el material para que los microorganismos presentes en el ambiente lo puedan convertir en sustancias naturales como agua, dióxido de carbono y biomasa, además depende de las condiciones del ambiente como temperatura y humedad [40]. Esta propiedad no es única de los bioplásticos, ya que hay materiales plásticos elaborados con productos petroquímicos que

además contienen aditivos biodegradables, que mejoran su biodegradación en condiciones ambientales específicas [44].

Las definiciones anteriores implican que un material biodegradable no necesariamente es biobasado, ni que un material biobasado es estrictamente biodegradable [40]. La **Figura 1** muestra 4 cuadrantes donde solamente el cuadrante inferior izquierdo (3) corresponde a aquellos materiales plásticos que se consideran convencionales, tales como PE, PP y PET, es decir que no son biodegradables y que provienen de fuentes no renovables. La clasificación de los bioplásticos se puede obtener de los cuadrantes 1, 2 y 4. Los materiales biobasados y no biodegradables se encuentran en el primer cuadrante de los asignados para bioplásticos. En el cuarto cuadrante aquellos que son biodegradables, pero de fuentes fósiles, como el PBAT. En el segundo, los biodegradables y biobasados, como el PLA, siendo este el escenario ideal, ya que cuenta con ambos atributos de un bioplástico.

3.2.2. Bioplásticos: PLA y PBAT

En este trabajo de investigación se utilizan los bioplásticos de PLA y la mezcla polimérica de PBAT. Por lo que es importante definir que son, algunas de sus características principales, ventajas y usos en la industria. La información mostrada de PBAT hace referencia al material puro, sin mezclar, solamente se sabe que es una mezcla polimérica de PLA, PBAT y almidón de maíz. Sin embargo, no se tiene información específica de las propiedades de esta mezcla polimérica de PBAT utilizada.

3.2.2.1. Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA se considera un bioplástico sintetizado a partir de monómeros de ácido láctico, tiene la característica que los enlaces éster presentes son sensibles a la hidrólisis química y enzimática [45]. Se produce a base de fuentes de almidón, lactosa o sacarosa [46]. Las cuales pueden provenir de maíz, yuca [47], suero de leche y melaza [46], entre otras.

El PLA es termoestable [48] ya que sus propiedades térmicas dependen de su peso molecular, la pureza y el historial térmico [45]. El peso molecular es mayor a $1,2 \times 10^5$, el punto de fusión se estima en un rango de 120 a 175 °C, mientras que la temperatura de

transición vítrea entre 133 y 145 °C [49]. Este material se considera rígido, quebradizo [50], brillante e incoloro [30].

Las aplicaciones del PLA son diversas, se puede emplear para fines caseros, aplicaciones agrícolas y biomédicas [52]. En general, se pueden fabricar botellas, bandejas, blísteres [50], ropa, vasos, juguetes, materiales de ingeniería, partes de vehículos, materiales de construcción y empaques de alimentos [52].

El PLA es un material adecuado y propicio para utilizar en la industria de alimentos y bebidas, debido a su naturaleza no tóxica [51]. Presenta una adecuada barrera contra sabores y olores, además tiene propiedades de alta transferencia de vapor de agua, esto lo hace un empaque adecuado para que los alimentos estén libres de hongos, debido a que se mantiene seco su entorno [53]. Este material es generalmente reconocido como seguro (GRAS, por sus siglas en inglés) que se puede utilizar en contacto con alimentos por la FDA (American Food and Drug Administration) [54]. Además, el PLA presenta una buena capacidad de resistencia ante aceites, grasas, agua y radiación UV comparado con otros bioplásticos [53].

El PLA funciona como sustituto de los plásticos convencionales de fuentes fósiles, ya que su producción reduce las emisiones de CO₂ [47]. Es uno de los poliésteres biodegradables más importantes en la actualidad [55], además de ser biodegradable puede ser biobasado, esto lo hace uno de los plásticos de empaque más utilizados [50].

3.2.2.2. *Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) (PBAT)*

El PBAT se produce a través de una reacción de policondensación a base de petróleo, entre 1,4-butanodiol, ácido adípico y ácido tereftalato [56]–[58]. Es considerado como un poliéster alifático aromático, siendo de los polímeros biodegradables comerciales más exitosos, junto al PLA y el PBS [59]. Las buenas propiedades mecánicas y la integridad del material se deben a la parte aromática. Mientras que la fracción alifática es la que se encarga de la biodegradación del material, siempre y cuando las enzimas naturales que se encargan del proceso se encuentren en un entorno favorable [60].

Dentro de las propiedades del PBAT se pueden destacar su procesabilidad, durabilidad y biodegradabilidad, que son propiedades fisicoquímicas excelentes [56]. Además, la composición y peso molecular de los monómeros que lo conforman afectan sus propiedades mecánicas [57]. Las limitaciones del PBAT es que presenta un bajo rendimiento térmico [58] y un alto costo de producción, lo cual afecta su uso en muchas aplicaciones [56]. Una forma de mejorar sus propiedades y bajar los costos de producción es realizar mezclas con otros materiales, como almidón o PLA, ya que se mantienen sus propiedades de biodegradabilidad [57], [60].

Las aplicaciones del PBAT se han dado en diversos sectores, como biomedicina, agricultura y alimentos. Este material se ha empleado como cobertura de cultivos, bolsas para empaque de alimentos [58], envases desechables, bolsas compostables para residuos orgánicos [56]. Adicionalmente, las mezclas que contienen PBAT se utilizan en diversas aplicaciones debido al coste competitivo que tienen, rendimiento y calidad satisfactorias [57].

3.2.3. Bioplásticos: alternativas y desafíos

El uso de los bioplásticos es una alternativa para reducir el impacto ambiental [61] en comparación con los polímeros tradicionales. Estos presentan un potencial para reemplazar a los plásticos en diversas aplicaciones [62]. Su uso puede disminuir la dependencia de combustibles fósiles que generan CO₂, generando una reducción en las emisiones de carbono y propiciando alcanzar la huella de carbono neutral [39].

Los bioplásticos se consideran una alternativa “eco-friendly” o amigable con el ambiente. Sin embargo, su descarte genera serios desafíos a nivel mundial, debido a su composición. La degradación de los bioplásticos requiere condiciones específicas que varían de acuerdo con el material y el tipo de procedimiento que se utilice dificultando su descarte [63].

3.3. Proceso de compostaje

3.3.1. Definiciones y etapas

El compostaje consiste en la degradación aeróbica de materia orgánica que genera como resultado compost [64]. Este proceso permite descomponer rápidamente materiales orgánicos por acción de microorganismos aeróbicos en condiciones controladas [65]. El compost es el producto obtenido de la biodegradación de una mezcla formada mayoritariamente por residuos vegetales y otro material orgánico [66], que se utiliza para fertilizar la tierra [67]. El compost permite mejorar la estructura, drenaje, aireación, evitar la erosión, recuperación de suelos, entre otros. La mayor viabilidad económica y ambiental del compost promueve la disminución de materia orgánica en rellenos sanitarios [68].

Cada proceso de compostaje es diferente, pero en general su finalidad es descomponer la materia orgánica mediante el control de temperatura, humedad y oxigenación [69]. Un proceso de compostaje se compone de cuatro etapas ilustradas en la **Figura 2**.

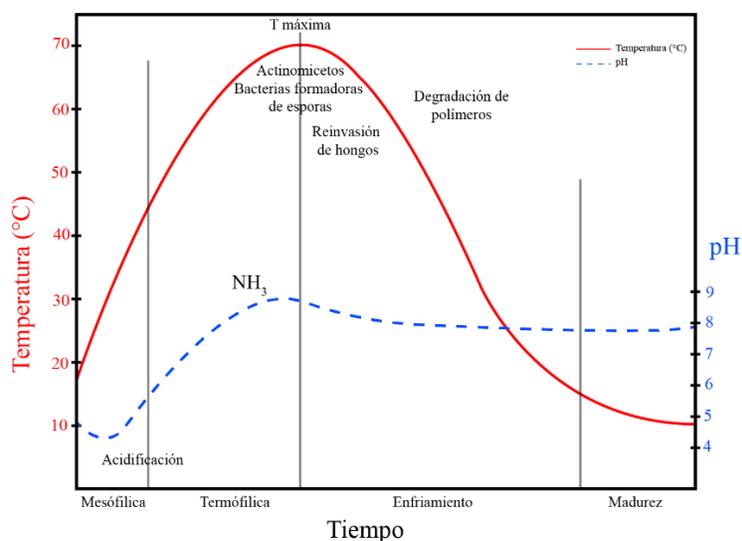


Figura 2. Variación de la temperatura (°C) y pH versus tiempo durante las cuatro fases de compostaje. Adaptado de [70]

De acuerdo con el “*Manual de Compostaje del Agricultor*” desarrollado por la FAO [71] estas etapas se caracterizan por:

- **Fase mesófila I (2 a 8 días):** Tal como se muestra en la **Figura 2** el proceso inicia a temperatura ambiente hasta alcanzar 45 °C en horas o pocos días. Este aumento de temperatura se da debido a la acción de los microorganismos que colonizan la materia orgánica y descomponen los azúcares y compuestos solubles generando un proceso exotérmico y la producción de ácidos orgánicos que acidifican el medio.
- **Fase termófila (1 a 3 semanas):** Se caracteriza por presentar temperaturas superiores a 45 °C, donde las bacterias termófilas tienen un papel importante e inician la degradación de la celulosa y la lignina. A su vez transforman el nitrógeno en amoníaco generando un incremento en el pH. Al alcanzar temperaturas superiores a 55 °C funciona como un proceso de higienización que permite destruir bacterias y contaminantes de origen fecal (*E.coli*, *Salmonella*) predominando únicamente las bacterias formadoras de esporas como los actinomicetos.
- **Fase mesófila II (2 a 5 semanas):** Consiste en un descenso de la temperatura hasta valores inferiores a 45 °C, debido a que las fuentes de carbono y nitrógeno se han acabado y las bacterias no tienen alimento. En cambio, los hongos termófilos aparecen e invaden el sustrato continuando el proceso de degradación de la celulosa. Este proceso requiere un periodo de asimilación de los microorganismos que es lento y que genera una disminución de calor.
- **Maduración (3 a 6 meses):** la temperatura se estabiliza hasta que alcanza el mismo valor que la temperatura ambiente, predominando los microorganismos mesófilos. El proceso es extenso generando únicamente reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados que da lugar al humus.

3.3.2. Variables fundamentales en el proceso

Durante el proceso de compostaje es de suma importancia que se cumplan las cuatro etapas antes descritas para alcanzar la calidad adecuada. Dado que esto permitirá que el compost inmaduro obtenido sea curado, de no ser así el producto final podrá contener alto contenido de sales, ácidos orgánicos, pH y una relación inadecuada carbono/nitrógeno, que al

aplicarse al campo podrá dañar los cultivos [72]. Para evaluar la calidad del compost existen diversas variables que afectan directamente el desarrollo de los microorganismos e influyen en la eficacia del proceso.

3.3.2.1. *pH*

El pH es un parámetro que condiciona la presencia de microorganismos. Si bien valores extremos no paralizan el proceso, si interfieren directamente en el crecimiento de los microorganismos y por ende en la velocidad de avance del proceso [73]. El pH es considerado como un indicativo de la evolución del compostaje al existir una correlación directa con la calidad y cantidad del humus [70].

Al comienzo del compostaje es recomendable mantener valores cercanos a 7 que permiten mantener una diversidad microbiana [74]. Conforme inicia el proceso se da una acidificación debido a los ácidos orgánicos producidos por los microorganismos. Acorde a la descomposición continúa, estos ácidos son descompuestos liberándose bases y altos contenidos de amoníaco que ayudan a elevar el pH y posteriormente se da nuevamente una estabilización [75]. Durante las cuatro fases de compostaje los principales microorganismos presentes son las bacterias y hongos, que requieren valores de pH específicos. Sin embargo, el rango ideal es de 5,8 a 7,5 [72].

3.3.2.2. *Temperatura*

La temperatura durante el compostaje se debe a la gran actividad biológica de los microorganismos durante la mineralización de los materiales orgánicos, que al ser de fácil adaptación y degradables generan calor, por ende, un aumento de la temperatura permitiendo un desarrollo correcto del proceso [75]. Cuando la materia orgánica se degrada, las moléculas presentes liberan energía almacenada en sus enlaces, transformándose en otras más sencillas y aumentando la temperatura del medio [73].

Es importante conseguir un equilibrio entre la máxima higienización y la biodegradación para evitar la inhibición de los microorganismos [75]. Las temperaturas superiores a 55 °C

aseguran la higienización, aquellas entre 45 y 55 °C permiten la máxima biodegradación y entre 35 y 40 °C propician la mayor variedad microbiana [74].

3.3.2.3. *Relación carbono-nitrógeno*

Durante el compostaje la materia orgánica proporciona nutrientes para el desarrollo de los microorganismos. Sin embargo, nutrientes como el carbono y nitrógeno deben encontrarse en una proporción adecuada. Diversos autores indican que la relación ideal de C:N es 30:1 [70], [74] dado que una relación superior a 35:1 indica un exceso de carbono generando un enfriamiento y ralentización del proceso. Relaciones menores a 15:1 indica mayor presencia de nitrógeno, provocando un calentamiento excesivo y la generación de malos olores producto del amoniaco liberado [71].

La proporción de C:N permite conocer la fase de descomposición o maduración en la que se encuentra el compost. Al inicio del compostaje el nitrógeno presente en los materiales es orgánico como parte de las proteínas y péptidos simples. Producto de la actividad microbiana es mineralizado a NH_3 . Este compuesto puede ser inmovilizado por los microorganismos como fuente de alimento, o bien volatilizado cuando se alcanzan altas temperaturas y pH superiores a 7,5 [73].

3.3.2.4. *Humedad*

La humedad es un parámetro vinculado a los microorganismos, ya que permite el empleo de las moléculas orgánicas disueltas en agua, favoreciendo a su vez la colonización microbiana y migración [73]. Un contenido de humedad entre 40 y 60 % se considera adecuado. La actividad microbiana disminuye e incluso puede detenerse a una humedad inferior a 40 %. Una humedad superior a 60 % provoca que el agua desplaza el aire, generando condiciones anaeróbicas, lixiviación de nutrientes, disminución de la velocidad del proceso y malos olores [70]–[72].

El contenido de humedad disminuye durante el compostaje debido al calor generado. Es importante mantener un valor adecuado ya que permite la supervivencia de los

microorganismos. El equilibrio se logra con la adición de agua cuando se reportan porcentajes bajos, o bien con el volteo cuando los valores son elevados [73].

3.3.2.5. Aireación

El compostaje es un proceso aerobio; el oxígeno es vital para la respiración y metabolismo de los microorganismos, permitiendo la oxidación de moléculas orgánicas y evitando el encharcamiento o compactación del material [71]. Siendo la fase termofílica la que requiere la mayor tasa de consumo de aire. Si bien la aireación puede variar, se establece un porcentaje ideal de 10%.

Cuando la saturación de oxígeno es inferior al 5% genera exceso de humedad debido a que se impide una evaporación suficiente y correcta; en consecuencia, provoca un ambiente anaeróbico, ácido y con malos olores. Si bien los microorganismos aeróbicos son capaces de sobrevivir en concentraciones de baja aeración lo recomendado es la adición o el volteo del material [71], [74]. En cambio, valores superiores al 15% provoca pérdida de humedad, desaceleración de la descomposición por falta de agua, disminución de la temperatura y deshidratación de los microorganismos [73]

3.3.3. Sistemas de compostaje

En la actualidad existen diversos sistemas de compostaje clasificados como sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos destaca el apilamiento estático, apilamiento con volteo y apilamiento con volteo y aireación forzada por ventilación. En los sistemas cerrados se emplean reactores verticales (continuos o discontinuos) y horizontales (estáticos o con rotación) [70]. Además, se pueden clasificar según el lugar en el que se desarrolle, ya sea industrial, agrícola, urbano o casero. La presente investigación empleó compost casero siguiendo las normas **AS 5810-2010** [64] y **UNE-EN ISO:20200:2015** [66], principalmente.

El compostaje casero es un proceso que se define como la obtención de compost elaborado a partir de residuos orgánicos (residuos de alimentos, jardín y papel) mediante un proceso

de compostaje realizado de manera privada o doméstica. El compost producido se utiliza como enmienda en suelos de propiedad privada sin haber pasado por una transacción comercial [64]. Es decir, una persona o familia puede producir compost con los residuos orgánicos que se generan en su hogar y posteriormente lo aplica en el campo.

3.4. *Compostaje de Bioplásticos*

3.4.1. Biodegradable vs compostable

En el mercado hay productos de empaque que contienen etiquetas con información relacionada a la disposición de este luego de haber cumplido con su vida útil, como biodegradable o compostable. Sin embargo, hay confusión con estos términos, biodegradable hace referencia a la degradación debido a una actividad biológica que genera cambios en la estructura química del material [30]. Esta situación se logra a la temperatura y humedad relativa adecuadas [76].

Un material compostable es aquel que sufre degradación por procesos biológicos y genera agua, compuestos inorgánicos y biomasa, donde al finalizar su proceso de compostaje no deja residuos visibles o tóxicos [30]. Para que un material sea compostable debe tener un tiempo de desintegración de tres meses, también requiere temperaturas prolongadas de más de 50 °C [76].

3.4.2. Normativa y certificaciones

A nivel mundial se han realizado esfuerzos para crear normas que verifican si un material biodegradable es descartable en sistemas de compostaje. La **Tabla 1** describe algunas de las normas empleadas en esta temática. Además, existen diversas certificaciones como OK compost INDUSTRIAL, OK Biobased, Ok compost HOME, Seedling, Compostable (BPI) que avalan el uso de las normas descritas. Otras normativas existentes en esta área son ASTM D6400, ASTM D6866, ASTM D6868, NFT51800, EN 14995, ISO 18606 y ISO 17088 [30].

Tabla 1. Normativa relacionada con el compostaje de bioplásticos.

Código	Objetivo
AS 5810:2010 Biodegradable plastics— Biodegradable plastics suitable for home composting.	Determinar si un material plástico es biodegradable en condiciones de compostaje casero, además sienta las bases para un etiquetado correcto.
UNE-EN ISO 20200:2015 Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio.	Específica un método de determinación del grado de desintegración de materiales plásticos cuando se exponen a un ambiente de compostaje en laboratorio.
UNE-EN 13432:2001 Envases y embalajes Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.	Específica los requisitos y procedimientos para determinar la compostabilidad y la tratabilidad anaerobia de los envases o embalajes y materiales de envase o embalaje.
oSIST prEN 17427:2020 Packaging - Requirements and test scheme for carrier bags suitable for treatment in well-managed home composting installations.	Especifica pruebas y requisitos para la designación de bolsas de cualquier material que se consideren adecuadas para su incorporación a instalaciones de compostaje casero.

3.4.3. Antecedentes del compostaje de bioplásticos

La **Tabla 2** señala diversos ensayos desarrollados que utilizaron bioplásticos según el tipo de proceso de compostaje. Estos ensayos incluyen estudios realizados con bioplásticos como el PLA, PBAT, PHA, entre otros, además; diferentes tipos de compost como casero, pila estática, escala laboratorio, apilamiento y vermicompost.

Tabla 2. Estudios desarrollados en compostaje de bioplásticos a nivel mundial.

Material	Tipo de compost	País	Referencia
Oxobiodegradable, PE, PLA, Papel	Casero	Costa Rica	[22]
PLA, PBAT + PLA	En pila y túnel, ambas a escala piloto e industrial	España	[77]
PLA+ PHA, PBAT, PE	Pila estática aeróbica	Estados Unidos	[78]
Almidón + PLA +PBAT	Enterrado en suelo	China	[79]
PCL, PHB, PLA, PBS	Enterrado en suelo	Reino Unido	[80]
PLA	Enterrado en suelo	Grecia	[81]
PLA, PLA+maíz	Escala laboratorio	España	[82]
PLA, PBAT	Escala laboratorio	Costa Rica	[23]
PLA	Vermicompost	India	[83]
PBAT +PLA, PBAT+PBS	Industrial y casero	Sudáfrica	[84]
PLA, PBAT, PBAT+PLA	Enterrado en suelo	China	[85]
PBAT	Enterrado en suelo	Canadá	[86]
PHA, papel	Apilamiento	Estados Unidos	[87]
PBS, PBS+almidón, PLA	Escala laboratorio	Japón	[88]
PLA, PLA+TPS	Escala laboratorio	Canadá	[89]

+ implica que es una mezcla de polímeros

3.4.4. Ecotoxicidad

Conocer la ecotoxicidad del compost resultante es un parámetro importante y requerido de acuerdo con algunas normas, que evalúan los efectos ecotóxicos de un biopolímero ya degradado y presente en compost, específicamente de su germinación y crecimiento [64], [90]. Existe otro concepto relacionado que es la fitotoxicidad, se define como la capacidad de un compuesto de generar daños temporales o de larga duración en las plantas [91],

siendo capaces de afectar a una especie definida o diversas plantas. Debido a que el empleo de compost involucra contacto con plantas, las pruebas de fitotoxicidad corresponden a uno de los mecanismos más económicos y confiables para evaluar su calidad [92], [93]. Conocer la presencia de compuestos tóxicos puede evitar problemas en el cultivo tales como cambios en su ciclo de desarrollo, coloración, aparición de deformaciones y rendimiento en la cosecha. Las pruebas de ecotoxicidad generalmente comprenden el registro del número de plantas y medición de la longitud, peso de las plantas, así como la evaluación visual del estado de las plantas [94].

3.5. Caracterización de los bioplásticos

3.5.1. Análisis termogravimétrico (TGA)

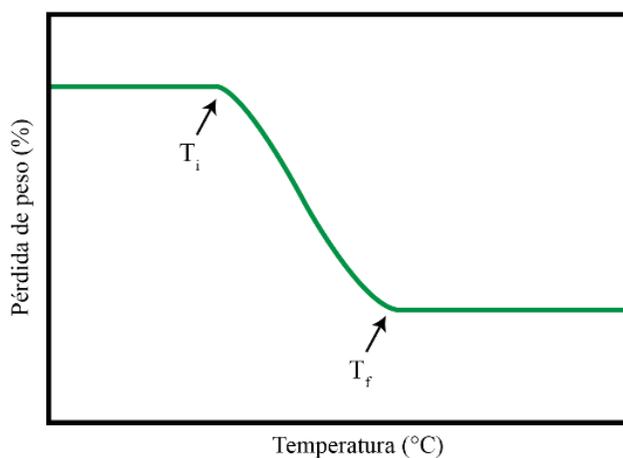


Figura 3. Ilustración de una curva típica de termogravimetría que representa la pérdida de peso (%) versus la temperatura (°C). Adaptado de [95].

El TGA es una técnica de análisis térmico, mediante el uso de un analizador termogravimétrico [96]. Se realiza mediante el pesado continuo de una muestra en un ambiente específico en función de la temperatura [97], que puede ir desde la temperatura ambiente hasta 1000 °C [98]. La temperatura y la atmósfera a la que se someten son

variables que se controlan a lo largo del proceso, la atmósfera utilizada puede ser nitrógeno, aire, aplicando vacío u otro gas [98].

Esta técnica es útil para caracterizar térmicamente materiales de diversas industrias, como de alimentos, productos farmacéuticos y petroquímicos [99]. Su implementación permite estudiar fenómenos térmicos como la descomposición, absorción, vaporización, sublimación, entre otros [95]. Puede emplearse para determinar la temperatura de degradación, estabilidad térmica y cinéticas de degradación [100]–[103].

La **Figura 3** muestra el resultado de una curva típica obtenida de TGA, donde muestra la variación del peso en función del aumento de la temperatura. La curva muestra una única etapa de descomposición, donde T_i y T_f son las temperaturas donde inicia y finaliza la descomposición, respectivamente [95]. Estos valores dependen de la estabilidad térmica de cada material, además la curva puede variar, por ejemplo, en un proceso de descomposición en varias etapas [95], donde se dan temperaturas de inicio y final para cada una de las etapas.

3.5.2. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Esta técnica analiza los cambios en la capacidad calorífica de un material, bajo el principio de utilizar una masa conocida y aplicar calentamientos y enfriamientos, de donde se pueden obtener cambios en el flujo de calor [104]. Tiene la facilidad que las velocidades de calentamiento y enfriamiento pueden variarse de acuerdo con el material que se está analizando, además se recomienda que para este tipo de análisis se utilicen masas entre 2,5 y 6 mg [105].

Mediante DSC se logra información sobre la temperatura de transición vítrea, fusión y cristalización, calor de fusión, y porcentaje de cristalinidad del material en estudio [106], además de entalpías de cristalización y de fusión [105]. Estos eventos térmicos se muestran en la **Figura 4**. La zona de transición vítrea se debe al calentamiento de la muestra, e implica una transición reversible del estado frágil al estado fundido. Luego de superar esta etapa, se llega a la temperatura óptima para alcanzar la cristalización, esto debido a que el

polímero es más móvil o manipulable, al aplicar más calor suceden los eventos de fusión [107].

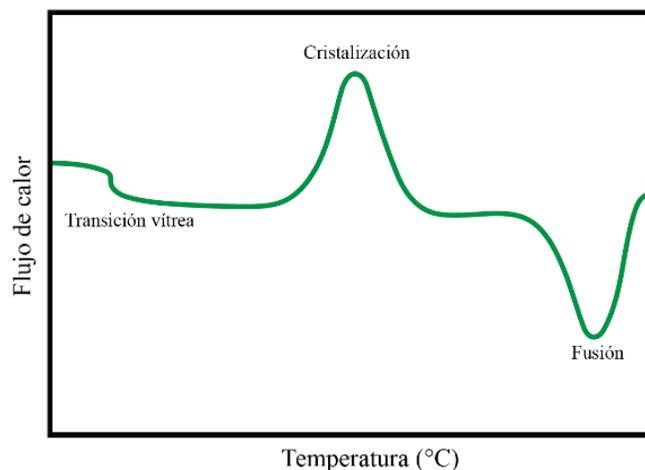


Figura 4. Eventos en una curva DSC. Adaptado de [107]

3.5.3. Espectroscopía Infrarroja por Transformada De Fourier (FTIR)

Esta técnica tiene como finalidad que las moléculas de una sustancia química interactúen con la luz infrarroja. La frecuencia a la cual se absorbe la energía infrarroja en las moléculas depende de su estructura [108]. Esta técnica utiliza la luz infrarroja para estudiar la interacción de las moléculas de una sustancia química y la frecuencia a la cual se absorbe la energía infrarroja en las moléculas, lo cual depende de su estructura [108]. De esta técnica se pueden obtener los espectros de absorción [109] y es capaz de analizar materiales en los tres estados, líquido, gaseoso y sólido [110].

Con esta técnica se obtienen resultados como los mostrados en la **Figura 5**. Donde las características de las bandas de absorción incluyen tanto la longitud de onda de absorción máxima como la intensidad de absorción [108]. En a) se observa que se obtienen resultados como la transmitancia que es la relación entre la intensidad luminosa de la muestra (I) y la intensidad luminosa inicial (I_0) a una longitud de onda establecida. Además, la muestra absorbe una cantidad de luz que puede medirse mediante la absorbancia y está dada por

$A = \log(I_0/I)$ [108]. En b) se aprecia un espectro infrarrojo típico de una muestra luego de ser analizado por el equipo de FTIR.

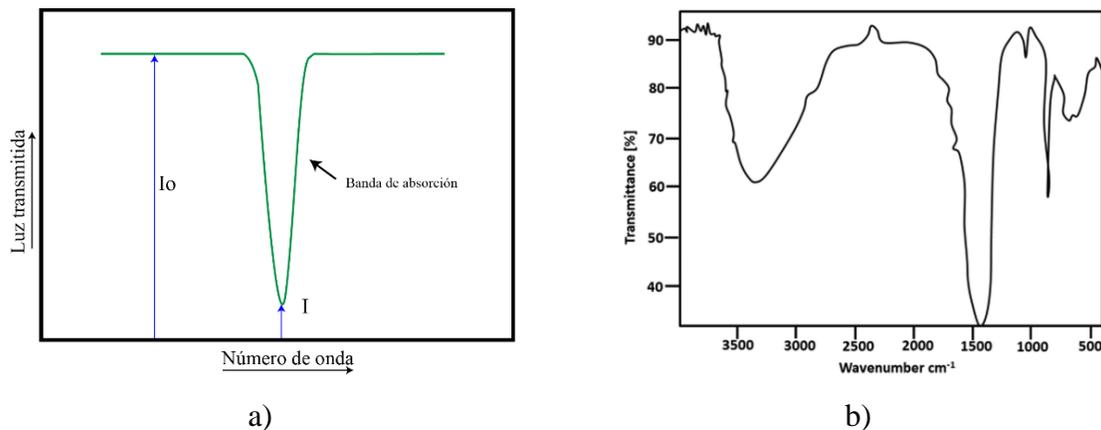


Figura 5. Espectros FTIR. a) Espectro de absorción (Adaptado de [108]) b) Espectro infrarrojo típico de una muestra (Tomado de [110]).

El espectro que se puede obtener de una muestra en un FTIR permite identificar los grupos funcionales y la composición química de las moléculas analizadas de manera cualitativa [110], en determinadas frecuencias, donde están los grupos funcionales se dan vibraciones. Las vibraciones pueden ser de dos tipos, de estiramiento y flexión. La primera hace referencia a que la distancia disminuye o aumenta entre los átomos, y se generan vibraciones simétricas y asimétricas. En las vibraciones por flexión el átomo cambia su posición respecto al eje original [108].

El espectro que se genera se puede dividir en cuatro regiones, de acuerdo con los enlaces que se pueden encontrar. En la región de 2500 a 4000 cm^{-1} , se pueden encontrar enlaces simples como O-H, C-H y N-H. Los enlaces triples se obtienen en la región de 2000 a 2500 cm^{-1} y los enlaces dobles se obtienen en la región de 1500 a 2000 cm^{-1} . En la última zona, de 650 a 1500 cm^{-1} se produce mayor vibración de la molécula por lo que se pueden apreciar más cambios en el espectro, pero son funcionales para la identificación del material [112].

3.5.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido permite la visualización de los plásticos mediante imágenes (**Figura 6**) que muestran su morfología [113]–[115] y espesor [113].

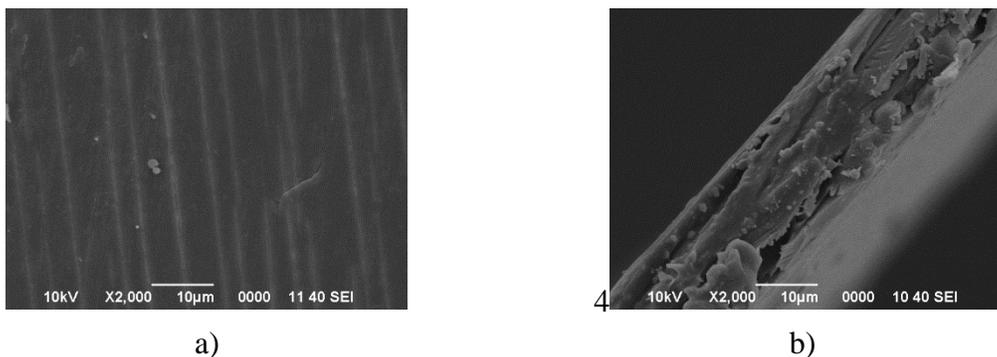


Figura 6. Micrografías SEM de PLA que fueron tratadas en sistemas de compostaje caseros. a) Vista superficial. b) Vista Lateral.

La preparación de las muestras para un análisis de este tipo debe tomar algunas consideraciones. En primer lugar, la superficie del material que se desea analizar debe estar correctamente expuesta, aún si es una parte interna del material. En segundo lugar, la muestra se debe montar firmemente. Por último, para evitar los efectos de carga en el material se debe tener una buena conductividad, por lo que se pueden aplicar como recubrimiento sobre la muestra finas películas de algún material metálico altamente conductor [116].

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se desarrolló principalmente en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), ubicado en Pavas, San José, Costa Rica. El proyecto implementó dos sistemas de compostaje casero según los procedimientos establecidos en normas internacionales. Durante el tiempo de compostaje se efectuaron análisis mensuales para caracterizar los materiales. Al finalizar el proceso se midió el grado de desintegración de dos bioplásticos. El contenido de sólidos volátiles del compost se midió en el Laboratorio de Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica. El análisis de abonos orgánicos y pruebas de ecotoxicidad para verificar la calidad del compost resultante se ejecutó con la colaboración del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR. Por último, la evaluación del efecto del compost resultante en la germinación y el desarrollo de plantas de cebolla y lechuga se ejecutaron en el CeNAT.

El proceso de desintegración de bioplásticos en compost se basó en los procedimientos de la norma australiana **AS 5810-2010** “*Biodegradable plastics – Biodegradable plastics suitable for home composting* [64] y la norma **UNE-EN ISO 20200:2015** “*Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio* [66]. Según lo recomienda la **AS 5810-2010** se implementaron modificaciones al tiempo de compostaje (6 meses) y se estableció el sistema a una temperatura de $25,0 \pm 5^{\circ}\text{C}$ para emplear la **UNE-EN ISO 20200:2015**.

Otra normativa utilizada en esta investigación incluye la norma europea **prEN 17428:2020** “*Determination of the degree of disintegration under simulated home composting conditions* [117]”, que se utilizó para establecer el tamaño del corte de los bioplásticos colocados en las composteras rotatorias. Por último, se empleó el Anexo E de la norma **UNE-EN 13432:2001** “*Envases y embalajes - Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación - Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje*”. Este anexo se utilizó para determinar los efectos ecotóxicos en dos tipos de plantas.

4.1. Bioplásticos utilizados en el proceso de compostaje

Se emplearon dos bioplásticos comúnmente utilizados en la industria de alimentos y empaque, PLA y PBAT (**Figura 7**). Ambos bioplásticos fueron brindados por la empresa *DosMil50 Empaques Compostables* que se ubica en la Lima de Cartago. El PLA se obtiene de almidones de vegetales, por ejemplo, maíz o yuca en condiciones anaerobias [118]. De las bolsas mostradas en **Figura 7 (a)** se utilizó únicamente la parte transparente que corresponde a PLA (20 μm). El papel Kraft es otro material que conformaba este tipo de bolsas, sin embargo, este no formaba parte de los alcances de este trabajo. Además, se tienen las bolsas tipo camiseta de PBAT, que de acuerdo con la información de *DosMil50 Empaques compostables*, es una combinación de PLA con almidón de maíz y PBAT [118]. Tanto para el PLA como para el PBAT que se utilizaron en este proyecto se especifica un espesor de 20 μm . De manera tal, que esta variable no adiciona un efecto sobre el proceso de compostaje de los bioplásticos que podría atribuirse al espesor.



Figura 7. Materiales de empaque empleados para realizar el proceso de compostaje. a) PLA [118]. b) PBAT.

4.1.1. Preparación de los bioplásticos para el ensayo de compostaje

Los bioplásticos seleccionados fueron cortados y secados antes de mezclarlos con el compost. Se trabajó con dos sistemas de compostaje, reactores tipo caja (RC) y reactores de compostaje rotatorios (RR). Las muestras de ambos bioplásticos empleados en los RC se cortaron en cuadros de 2,5 cm [66] y en los RR se cortaron en cuadros de 5 cm [117]. Esto

porque por el tamaño de los RR se requirió una gran cantidad de bioplásticos y al ser un proceso manual de corte de los bioplásticos se optó por realizar el corte de 5 cm para RR.

Los bioplásticos de PLA y PBAT se secaron en una estufa a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. El tiempo de secado corresponde a ~ 3 h para RC y ~ 6 h para RR. La **Figura 8** muestra los dos bioplásticos después del secado. Posteriormente, la masa requerida para cada reactor de compostaje se pesó y se agregaron 15 g de bioplástico de PLA o PBAT en cada RC. La masa por cada reactor RR fue de ~ 274 g. En total, para ambos sistemas, RC y RR se cortaron 912 g de cada bioplástico.



Figura 8. Bioplásticos de PLA y PBAT cortados y secados a 40°C alcanzar masa constante.

4.2. *Sistemas de compostaje utilizados*

4.2.1. Reactores tipo caja

Los reactores tipo caja (RC) se prepararon con cajas de polipropileno (PP) transparentes que luego se pintaron de negro (**Figura 9**). Estos reactores tienen dimensiones de $34,6 \times 21,0 \times 12,4$ cm. La circulación y el intercambio aeróbico con el exterior se garantizó con la perforación de dos orificios ($\text{Ø} = 5$ mm) en el ancho de la caja a 6 cm de la base.



Figura 9. Reactores de compostaje tipo caja (RC) utilizados para el proceso de compostaje de PLA y PBAT durante 6 meses.

En total se utilizaron 18 RC, la **Figura 10** ilustra la distribución realizada. En total se prepararon seis reactores de compostaje para PLA (CPLA), seis de PBAT (CPBAT) y seis reactores que se usaron como controles (CCON). Tres de los reactores que contienen las muestras de PLA se usaron para sacar muestras del bioplástico cada 28 días y realizar la caracterización de los bioplásticos (CB) hasta completar 180 días del proceso de compostaje. Los otros tres reactores con PLA fueron empleados al finalizar el proceso de compostaje para realizar el ensayo de ecotoxicidad (EE) del compost resultante.

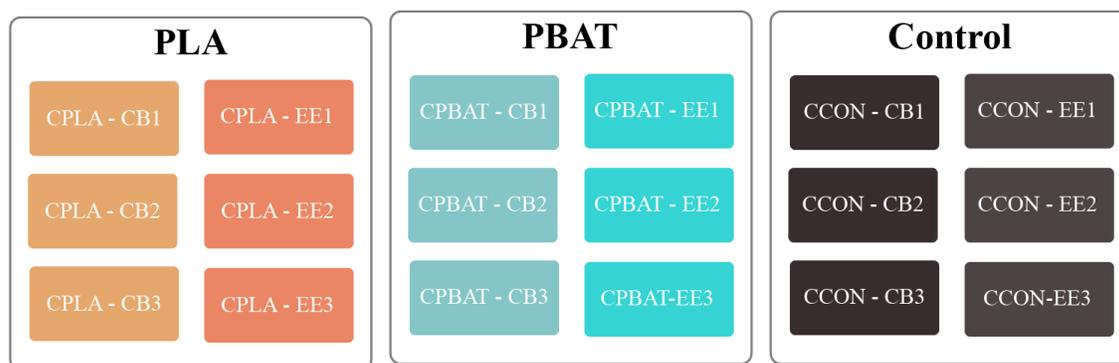


Figura 10. Distribución de los RC para ejecutar el proceso de compostaje con la adición de bioplásticos y el respectivo control sin bioplásticos. CB: Muestras para análisis de caracterización de bioplásticos. EE: Muestras para análisis de ecotoxicidad.

La misma dinámica se aplicó para el PBAT y los controles. Todos los reactores ilustrados en la **Figura 10** contenían una masa de compost suficiente para que al finalizar el ensayo fuera posible extraer una muestra de 500 g para realizar el análisis químico completo de abonos orgánicos. Estas muestras de 500 g se obtuvieron de los reactores que se emplearon para realizar la CB.

4.2.2. Reactores rotatorios

Las composteras rotatorias (360 Soluciones Verdes, KS-100) (**Figura 11**) se utilizaron para el proceso de compostaje en los reactores o composteras rotatorias (RR). Estas tienen dimensiones de 94 cm de altura, ancho 72 cm, largo de 80 cm y un volumen total de 160 L. El proceso de compostaje se realizó siguiendo la metodología establecida en la norma

australiana AS 5810-2010 y la UNE-EN ISO 20200:2015. Además, se tomó como referencia adicional la norma prEN 17428:2020. **Figura 11**



Figura 11. Compostera rotatoria KS-100 (360 Soluciones Verdes, modelo KS).

En total, se utilizaron 4 RR, cada una con dos cámaras independientes. Se contó con 3 cámaras para PLA (RPLA), tres para PBAT (RPBAT) y dos cámaras para los controles sin adición de bioplásticos (RCON) (**Figura 12**).

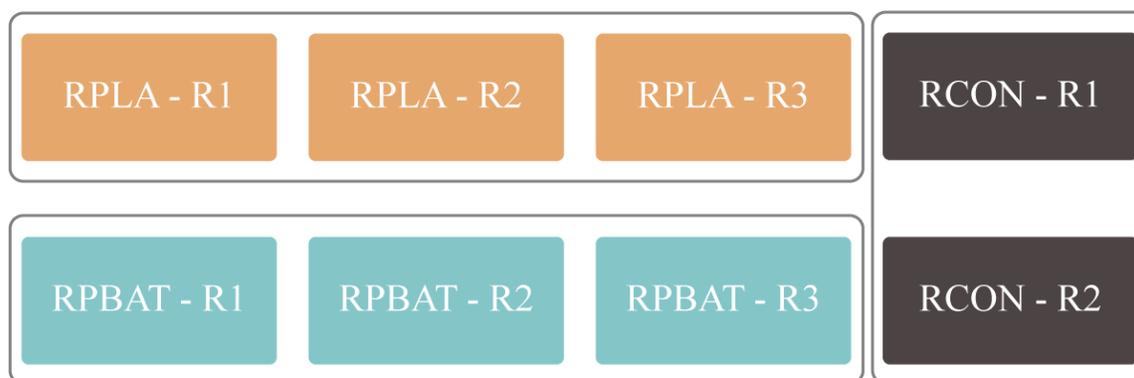


Figura 12. Distribución de RR para realizar el proceso de compostaje con adición de bioplásticos y control sin bioplásticos.

4.3. Preparación del residuo sintético

Tal como lo establece la norma **UNE-EN ISO 20200:2015** se preparó un residuo sintético (RS) utilizado como medio para el compostaje, compuesto por los materiales que se especifican en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Composición del residuo sintético.

Material	Masa seca (%)
Aserrín	40
Alimento para conejos	30
Compost maduro	10
Almidón de maíz	10
Sacarosa	5
Aceite de maíz	4
Urea	1
Total	100

La fracción requerida de cada material está dada en porcentaje de masa seca. La humedad inicial del aserrín, alimento para conejos, compost maduro y urea se midieron para cuantificar la masa total requerida para cada material. De esta manera se calculó la cantidad necesaria de cada material. El resto de los materiales de la **Tabla 3** se asumió que no aportan humedad. El material se secó en una estufa a 105°C, para el cálculo del contenido de humedad (CH) se empleó la ecuación (1). Donde m_f es la masa final, cuando se alcanzó una masa constante y m_i es la masa inicial, antes del secado en el horno.

$$CH[\%] = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Se utilizó una mezcla de aserrín de maderas no tratadas, entre ellas se pueden incluir; laurel, pino, “chancho blanco” y “chancho colorado”. El alimento para conejos seleccionado fue a base de alfalfa con otros ingredientes como avena, soya fermentada, pasto fermentado, hierbas fermentadas y carbonato de calcio. Este cuenta con un contenido

de proteína de 16%, lo cual es cercano al valor de 15% recomendado en la norma **UNE-EN ISO 20200:2015**. La urea (SERACSA, 46% m/m de nitrógeno) y el compost maduro (EverGreen) se adquirieron comercialmente. Este último se utilizó como inóculo para iniciar el proceso de compostaje. El almidón de maíz, la sacarosa y el aceite de maíz fueron adquiridos en locales comerciales.

Posteriormente, las cantidades requeridas de cada material se calcularon para elaborar RS para los reactores tipo caja y rotatorios. La masa total del RS en los dos tipos de reactores se calculó para obtener un contenido de humedad final de 55% ($\%_{H_{req}}$) por lo tanto una masa seca de 45% ($\%_{M_{seca}}$). La materia inicial de cada material (M_i) requerida se determinó mediante la ecuación (2), donde m_s es la masa seca y m_h es la masa húmeda de cada material. El cálculo empleado está representado en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente. La masa total requerida para el caso especial de la urea que tiene una concentración del 46% de nitrógeno, empleó la ecuación (5). Luego, siguiendo la norma **UNE-EN ISO 20200:2015** se añadió agua destilada para completar la masa final requerida en cada sistema de compostaje.

$$M_i = m_s + m_h \quad (2)$$

$$m_s = C_{req} \times \%_{H_{req}} \times \%_{M_{seca}} \quad (3)$$

$$m_h = \frac{m_s \times CH}{100\% - CH} \quad (4)$$

$$M_{i_{urea}} = (m_s + m_h) \times \frac{100\%}{46\%} \quad (5)$$

La **Tabla 4** muestra las masas que se utilizaron de cada material para elaborar el RS para un reactor de tipo caja y un reactor de tipo rotatorio. Se decidió elaborar un porcentaje adicional de RS para cada reactor de compostaje.

Tabla 4. Masas requeridas de cada material para elaborar RS en reactores de compostaje tipo caja y rotatorio.

Material	Sistema de compostaje	
	Un reactor tipo caja	Un reactor tipo rotatorio
Residuo sintético por elaborar	1 kg	18,3 kg
% adicional elaborado	16,5%	4,0%
RS realmente elaborado	1,165	19,019
Aserrín (kg)	0,243	3,974
Alimento para conejos (kg)	0,176	2,866
Compost maduro (kg)	0,075	1,222
Almidón de maíz (kg)	0,052	0,856
Sacarosa (kg)	0,026	0,428
Aceite de maíz (kg)	0,021	0,342
Urea (kg)	0,012	0,191
Agua (kg)	0,560	9,140
Reactores totales	18 RC	8 RR
Masa total RS elaborado (kg)	20,970	152,152

La elaboración de la mezcla inició con la disolución de la urea en el 10% de la masa de agua destilada total requerida. El alimento para conejo se hidrató con el 50% de la masa total de agua destilada. El almidón de maíz se mezcló con el compost maduro y 10 minutos después se agregó el alimento para conejo previamente hidratado, el azúcar, el aceite de maíz, la urea disuelta, y se homogenizó la mezcla de estos materiales. Posteriormente, la masa total de aserrín se dividió en tres. La primera parte del aserrín se integró con los materiales previamente mezclados. La segunda parte del aserrín con el 20% de la masa total de agua se incorporó a la mezcla de los materiales. Por último, la parte restante de aserrín y

el 20% de la masa total de agua se agregaron hasta obtener la mezcla homogénea del RS. En la **Figura 13** se pueden apreciar las etapas involucradas en la elaboración del RS.

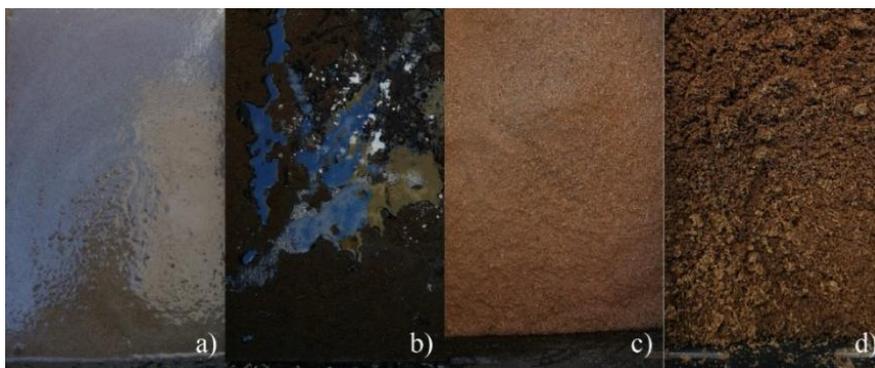


Figura 13. Proceso de elaboración de RS. a) Hidratación de alimento para conejo. b) Adición de compost maduro, aceite de maíz, azúcar, urea y almidón de maíz. c) Incorporación de aserrín. d) RS luego de mezclar todos los materiales.

Los reactores se prepararon agregando 1 kg y 18,3 kg en cada RC y RR, respectivamente. En ambos casos, el bioplástico se incorporó en el reactor que correspondía, la **Figura 14** muestra la distribución para los reactores tipo caja. Cada reactor de RC y RR se mezcló durante 2 minutos después de agregar el bioplástico correspondiente para que se mezclaran con el RS.



Figura 14. Reactores de compostaje tipo caja con la adición de PLA, PBAT y control al RS, respectivamente.

4.4. Control de las variables durante el proceso de compostaje

4.4.1. Variables controladas en los reactores tipo caja

Las mediciones de la masa del RS se realizaron periódicamente según lo indica la norma **UNE-EN ISO 20200:2015 (Tabla 5)**. Si se identificaba una disminución en la masa, el valor inicial se restablecía con la incorporación de agua destilada. El aspecto visual del compost y la presencia de olores se verificaron según la **Tabla 5** y el RS se mezcló según la misma tabla. Adicionalmente, la temperatura se monitoreó con un sensor multiparámetro (marca Gobetter). La temperatura también se verificó con un termómetro de mercurio con escala de 0 a 150°C. Los valores de temperatura y masa se midieron y se reportaron los mismos días en todos los reactores.

Tabla 5. Días de medición durante el proceso de compostaje, Adaptado de **UNE-EN ISO 20200:2015**.

Duración desde el comienzo del ensayo (días)	Operación
0	Se registra la masa inicial del reactor
1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 100% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje.
8, 10, 16, 18, 21, 23, 25, 28	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 100% de la masa inicial. No se mezcla la materia de compostaje
30, 45	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje
Entre 30 y 60, dos veces por semana	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 80% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje
60 y en adelante, dos veces por semana	Se pesa el reactor y, si fuera necesario, se añade agua para restituir la masa al 70% de la masa inicial. Se mezcla la materia de compostaje

4.4.2. Variables controladas en los reactores rotatorios

La medición de la masa se dificultó en las composteras rotatorias debido a la cantidad de RS en cada una (~18,3 kg). La masa se controló indirectamente determinando el contenido de humedad durante el proceso de compostaje mediante el método del horno de convección forzada a una temperatura de 105°C. Además, el RS se volteó diariamente durante los primeros 30 días del experimento de acuerdo con la **UNE-EN ISO 20200:2015** para propiciar el proceso de degradación. Después de 30 días, la rotación se realizó dos días por semana. Además, se midieron los valores de temperatura interna del RS.

4.5. Validación del ensayo de compostaje

Para verificar que los bioplásticos de PLA y PBAT empleados cumplen con las normas **AS 5810-2010** y **UNE-EN ISO 20200:2015** fue necesario realizar dos pruebas. La medición del grado de desintegración del bioplástico mediante cribas de tres tamaños diferentes, la disminución del contenido de sólidos volátiles mediante un secado a 105°C y una calcinación de las muestras a 550°C.

4.5.1. Determinación del grado de desintegración de los bioplásticos

La determinación del grado de desintegración de los bioplásticos empleados en los dos sistemas de compostaje se realizó únicamente al finalizar los 180 días del proceso de compostaje. Debido a que se dificultaba realizar este procedimiento en etapas intermedias del proceso de compostaje, por las posibles pérdidas de compost al momento de realizar el tamizado.

El compost resultante se secó en un invernadero por razones prácticas. Se reportaron temperaturas superiores a 40 °C durante el día, facilitando el secado. Además, el compost se mezcló diariamente durante una semana para acelerar el proceso de secado. El compost final se tamizó en tres pasos mediante cribas de 10, 5 y 2 mm. La fracción resultante del bioplástico se recolectó de cada criba. La suma de los bioplásticos recolectados de los tres tamices se cuantificó como la fracción no desintegrada.

Las partículas de compost adheridas al bioplástico luego del proceso de tamizado fueron removidas manualmente para dejar limpio el bioplástico y el exceso de polvo fue removido mediante lavado con agua destilada. La fracción de bioplástico de cada repetición se secó en una estufa a 40°C hasta obtener una masa constante, de acuerdo con la norma **UNE-EN ISO 20200-2015**. Posteriormente, el bioplástico se tamizó nuevamente para separar cada fracción según el tamaño. Finalmente, el material recolectado del bioplástico se sumó por cada repetición y se procedió a determinar el porcentaje de desintegración con la ecuación (6). Donde **D** corresponde al porcentaje de desintegración, m_i es la masa seca inicial del material de ensayo, m_f es la masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado. Este cálculo se repitió para cada reactor de compostaje.

$$D = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (6)$$

Para verificar la similitud de los datos se utilizaron pruebas estadísticas. Primero se verificó la normalidad de los datos, y al confirmar que no son normales se empleó un ANOVA de Kruskal Wallis para comparar las medianas de los datos con un valor de significancia de 0,05.

4.5.2. Disminución del contenido de sólidos volátiles

Una muestra de cada repetición se secó a 105 °C hasta alcanzar una masa constante para obtener la masa seca (m_s), la cual se representó como porcentaje de la masa total de la muestra que se puso a secar. La m_s se calcinó en una mufla *Cole Parmer Box Furnace* a 550°C durante 8 h, para obtener la masa luego de la calcinación (m_c). La pérdida de masa luego de este proceso corresponde al contenido en sólidos volátiles el cual se representó como un porcentaje de m_s de la muestra y se establece en la ecuación (7). Este procedimiento se realizó para los reactores antes y después del proceso de compostaje.

$$SV = \frac{(m_s - m_c)}{m_s} \times 100 \quad (7)$$

La fórmula utilizada para calcular la disminución en el contenido de sólidos volátiles (**R**) se muestra en la ecuación (8). Donde m_i es la masa inicial del residuo sintético húmedo

introducido en el reactor; $(DM)_i$ es la masa seca inicial del residuo sintético, en decimales; $(SV)_i$ es el contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético, en decimales; m_f es la masa final del compost; $(DM)_f$ es la masa seca final del compost, en decimales; $(SV)_f$ es el contenido final en sólidos volátiles del compost, en decimales.

$$R = \frac{[m_i \times (DM)_i \times (SV)_i] - [m_f \times (DM)_f \times (SV)_f]}{[m_i \times (DM)_i \times (SV)_i]} \times 100 \quad (8)$$

4.6. Análisis de caracterización de bioplásticos compostados

Los análisis para caracterizar los bioplásticos de PLA y PBAT se realizaron durante los seis meses de duración del sistema de compostaje en ambos tipos de composteras (cajas y rotatorias). De cada reactor de compostaje se recolectaron muestras de 20 a 50 mg de cada bioplástico mensualmente. La cantidad recolectada fue suficiente para realizar los análisis de caracterización. El exceso de compost se removió cuando se extrajo la muestra. Cada muestra se pesó, se registró la masa y se fotografió para documentar las muestras extraídas de cada sistema de compostaje.

Los análisis para caracterizar los bioplásticos incluyen la Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), Análisis termogravimétrico (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés). Para cada uno de los análisis de caracterización se realizó un análisis inicial de las muestras puras de PLA y PBAT. Los análisis siguientes se realizaron cada 4 semanas (28 días), los días 28, 56, 84, 112, 140, 168, 180. La diferencia entre todos es de 28 días, a excepción de las últimas dos mediciones que tienen una diferencia de 12 días. En cada extracción de bioplásticos se colectaron tres muestras de cada uno (PLA y PBAT) para cada sistema de compostaje.

4.6.1. Análisis termogravimétrico

El analizador termogravimétrico (TA Instruments, Q500) de la **Figura 15** se utilizó para verificar los cambios en la estabilidad térmica de los bioplásticos. El software TA Instrument Explorer generó gráficas de pérdida de masa (%) versus temperatura (°C). Un análisis TGA se realizó en las muestras sin compostar de ambos bioplásticos, por el

comportamiento de las muestras se trabajó la temperatura en un rango de 25 a 600°C para todos los análisis posteriores durante el proceso de compostaje. El procedimiento consistió en colocar $5,2 \pm 0,2$ mg en una cápsula de platino la cual posteriormente se colocó dentro del analizador termogravimétrico.



Figura 15. Analizador termogravimétrico (TGA) empleado para analizar muestras de PLA y PBAT durante la duración del proceso de compostaje.

El equipo se programó para incrementos de temperatura de 10°C/minuto hasta alcanzar la máxima. Este equipo se alimenta con nitrógeno, con un flujo de purga para el equilibrio de 10 ml/min y un flujo de purga de la muestra de 90 ml/min. Posteriormente la presentación de las gráficas finales se procesó mediante el software OriginPro 2019b versión 9.6.5.169.

4.6.2. Calorimetría diferencial de barrido

Un calorímetro diferencial de barrido (TA Instruments, modelo Q200) como el de la **Figura 16** se utilizó con las muestras recolectadas de PLA y PBAT durante la duración del ensayo. Inicialmente, el equipo se equilibró a 25°C. El ensayo se ejecutó en dos fases, una de calentamiento, en esta la temperatura aumentó 10°C/min hasta alcanzar 200°C. Posteriormente, una fase de enfriamiento que partió de 200 a 25°C, este enfriamiento se realizó a una velocidad de 10°C/min. La puesta en marcha del ensayo consistió en pesar ~2,5 mg del bioplástico en una cápsula de aluminio. La muestra se pesó y se selló antes de colocarla en el equipo. Este consta de un sistema de contrapesos, en un lado se coloca una

cápsula vacía y en el otro la cápsula con bioplástico, ambas sufren los efectos del calentamiento y el enfriamiento (**Figura 16 b**).



Figura 16. Análisis de DSC. a) Equipo DSC. b) Detalle de cápsulas empleadas en el análisis.

4.6.3. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

Los análisis por FTIR son principalmente descriptivos. Se utilizó un espectrómetro infrarrojo (**Figura 17**) (Thermo Fischer Scientific, Nicolet 6700 FT-IR). El rango cubierto para los análisis realizados en este trabajo abarcó una longitud de onda de $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$. Los espectros obtenidos fueron tratados y corregidos en el software OMNIC 8.1 (OMNIC Series 8.1.10, Thermo Fischer Scientific).



Figura 17. Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier.

El procedimiento para obtener los grupos funcionales de una muestra mediante espectroscopia infrarroja consistió en realizar una colecta inicial mediante el software antes mencionado. El diamante se limpió con isopropanol, posteriormente, se colocó la muestra de bioplástico y se obtuvo una gráfica que representa cada grupo funcional asociado al bioplástico. Los resultados obtenidos de la gráfica mostraron en el eje horizontal la longitud de onda (cm^{-1}) y en el eje vertical la transmitancia (%). Los datos se procesaron para eliminar el ruido presente en cada muestra, para esto se realizó una corrección de la línea base para eliminar las interferencias y posteriormente un suavizado de 25 puntos ($12,053 \text{ cm}^{-1}$). El procedimiento de suavizado se realizó 10 veces hasta disminuir el ruido encontrado en la muestra. Por último, la presentación de las gráficas finales para su análisis se realizó mediante el software OriginPro 2019b versión 9.6.5.169.

4.6.4. Microscopía electrónica de barrido

Esta técnica de caracterización se realizó para analizar la estructura y morfología del PLA y PBAT durante el proceso de compostaje en ambos sistemas. Un microscopio electrónico de barrido (JEOL, JSM 6390LV) (**Figura 18**) permitió crear imágenes de cada muestra de PLA y PBAT. La detección de señales de interacción de los electrones incidentes con la superficie de la muestra [119] se realizó siguiendo la metodología desarrollada por el LANOTEC.



Figura 18. Microscopio Electrónico de Barrido.

El bioplástico se cortó en $\sim 1 \times 1$ mm y se colocó sobre la base siendo esta la vista de la superficie de la lámina, adicionalmente se hizo un corte de $2 \times 0,5$ mm aproximadamente y se colocó de manera vertical para obtener una vista lateral como se muestra en la **Figura 19**. Posteriormente, se realizó una cobertura iónica de oro y carbón en un cobertor iónico *Denton Vacuum, Desk V*. Este equipo permitió recubrir los bioplásticos que son poco conductores para este tipo de análisis. Las condiciones a las que operó el cobertor iónico para todas las repeticiones de cada colecta fueron 20 mAh y 180 s de duración. Posteriormente, las muestras se analizaron mediante SEM para obtener imágenes amplificadas de las muestras de bioplásticos que permiten ver en detalle si sucede un cambio sobre la superficie de estos.

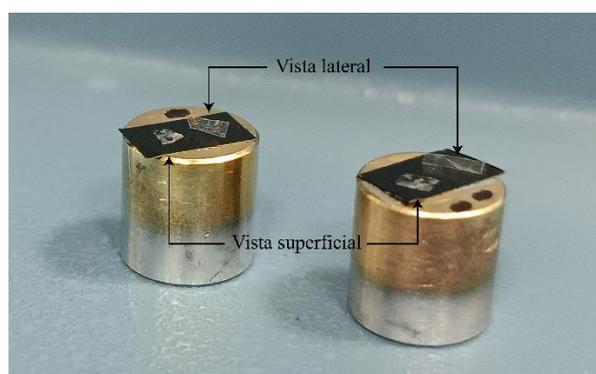


Figura 19. Vista de perfil y superficial de las muestras de PLA preparadas para realizar la cobertura iónica de carbón y oro.

4.7. Análisis de la composición química del compost final

Los estudios fueron realizados por el Laboratorio de Suelos y Foliare en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR. El análisis corresponde al de abonos orgánicos sólidos, este incluye un análisis químico completo para determinar los contenidos de carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B) y azufre (S); además la humedad, el pH y la conductividad eléctrica.

Un análisis inicial del RS se realizó con una muestra de 500 g. Una muestra de cada repetición se extrajo tanto de los RC como de los RR para un análisis posterior del proceso

de compostaje. La masa extraída corresponde a 500 g de cada repetición, estas se tamizaron previamente con una criba de 2 mm para evitar que las partículas de mayor tamaño se mezclaran dentro de la muestra. Todas las muestras se empacaron en bolsas con cierre el día de la extracción y se transportaron al CIA para una evaluación posterior.

Las muestras control se recolectaron para realizar una comparación de los resultados de los parámetros del análisis químico con respecto a las muestras de residuo sintético. El primer control proviene de la muestra inicial de residuos sintético (RS). El segundo control proviene de las muestras finales de compost obtenidas luego del proceso de compostaje (CF) que no contenían adición de ningún bioplástico (CF_{SB}). Las muestras se compararon estadísticamente contra los controles de CF sin adición de bioplásticos. La comparación consistió en emplear análisis estadísticos para identificar la normalidad de los datos. Los datos que presentaron normalidad entre las repeticiones se analizaron mediante un ANOVA de Tukey con una significancia de 0,05. Los datos no normales se analizaron mediante ANOVA de Kruskal Wallis con significancia de 0,05. el software IBM SPSS Statistics 26 se utilizó para este análisis estadístico.

4.8. Prueba de ecotoxicidad mediante germinación de semillas para el compost final

4.8.1. Armado del ensayo de ecotoxicidad

Los efectos fitotóxicos del compost resultante se determinaron en dos variedades de plantas, lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa*). Este procedimiento se ejecutó siguiendo parte de los procedimientos establecidos en la norma **AS 5810 – 2010**, la **UNE-EN 13432** y la **OECD 208** “*OECD Guideline for testing of chemical 208 Terrestrial plants Growth Test*” [120]. Realizando modificaciones para seguir la metodología establecida por Torrez [23], y tener un punto de comparación de los resultados obtenidos con un sustrato de referencia. Este sustrato fue adquirido comercialmente y se denomina como **Super tierra** (Ever Green), el cual se empleó como el control positivo y que de ahora en adelante se va a denominar tierra comercial (TC). Esta TC tiene las propiedades adecuadas para una buena oxigenación, un correcto drenaje y retener la cantidad de agua necesaria [121].

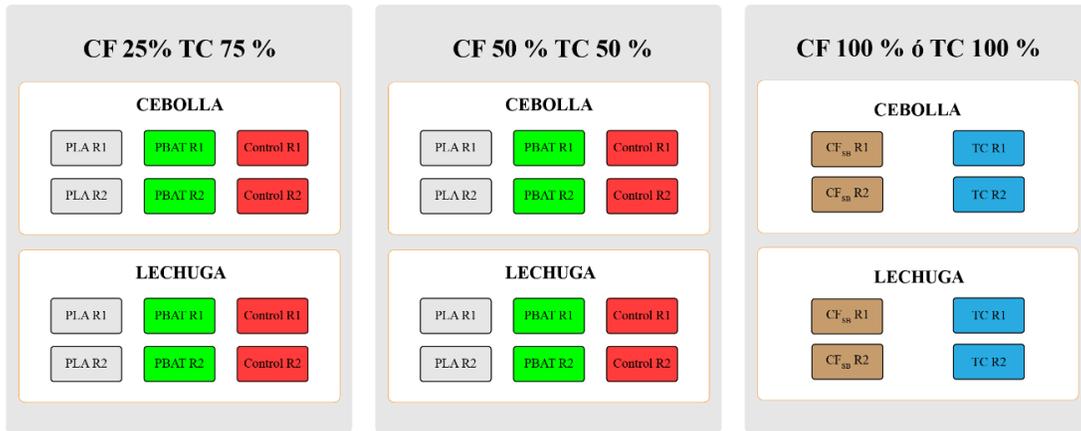


Figura 20. Total de las muestras para realizar la prueba de ecotoxicidad en los RC y los RR. R1: Repetición 1 / R2: Repetición 2 / TC: Tierra comercial / CF_{SB}: Compost final sin bioplásticos.

La **Figura 20** muestra un esquema detallado de la distribución realizada para los ensayos de ecotoxicidad. En cada sistema de compostaje (rotatorias y cajas). Se realizaron mezclas de sustratos en distintos porcentajes, como se ve en la figura con un 25 % de compost final y un 75 % de TC, además de 50 % CF y 50 % TC. Por último, se tuvieron mezclas con un 100 % de CF, que funcionó como un control negativo, este era CF sin la adición de bioplásticos (CF_{SB}). Mientras que se tuvieron controles positivos con 100 % TC. Los TC son el punto de comparación que van a tener las mezclas de TC y CF. La **Figura 20** presenta los dos cultivos seleccionados. Además, se incluyen las dos repeticiones por cada mezcla de CF con TC y por cada cultivo con el CF obtenido del proceso previo de compostaje. Además, toda la distribución mencionada se realizó en cada sistema de compostaje por separado.

La masa de la mezcla de CF y TC utilizada en cada repetición es de 300 g (CF 25 % TC 75 %) y de 350 g (CF 50 % TC 75 %) dependiendo de la humedad y el volumen ocupado por cada material. Además, las muestras de 100 % TC tenían una masa de 400 g y las muestras de 100 % CF tenían una masa de 350 g. Estas masas se estimaron según la masa que podían contener los espacios de las bandejas. Se emplearon bandejas de germinación (**Figura 21**) de 105 espacios. En cada una de las bandejas se colocaron 2 repeticiones según la **Figura 20**. En total, se emplearon 35 espacios de la bandeja por cada repetición y en cada espacio

se colocaron 3 semillas para un total de 105 semillas por replica. Finalmente, una capa de material inerte (perlita) se agregó en la superficie para cubrir las semillas según lo recomendado por la norma.



Figura 21. Bandejas de germinación utilizadas para la prueba de ecotoxicidad.

4.8.2. Control de la germinación, crecimiento y biomasa de las plantas

Las bandejas de germinación se colocaron en un invernadero (**Figura 22**). La temperatura afectó la humedad presente en el suelo, por lo que diariamente se agregó agua para mantener la humedad y que las plantas pudieran continuar su desarrollo sin verse afectadas. De acuerdo con la **UNE-EN 13423**, la humedad se debe mantener entre 70 y 100%, por lo que se agregó agua hasta percibir visualmente que el suelo estaba saturado.



a)



b)

Figura 22. Invernadero utilizado para ensayos de ecotoxicidad. a) Invernadero b) Acomodo de bandejas de germinación.

La germinación se empezó a contabilizar cuando los controles positivos de cada cultivo y sistema de compostaje contaban con un 50% de sus plantas germinadas, equivalente a 53 plántulas. Luego, el ensayo se extendió durante 21 días. Las mediciones de las plántulas germinadas se cuantificaron tres veces por semana. Durante la germinación se obtuvieron dos valores, la germinación máxima (GM) que es la mayor cantidad de semillas que brotaron y la cantidad de plantas al finalizar el ensayo (PF). Sin embargo, para efectos de comparación con el TC de cada cultivo y cada sistema de compostaje se tomó como referencia en el análisis la GM. A los 21 días de haber germinado el 50 % de cada TC, las plántulas se extrajeron y se limpiaron los residuos presentes, posteriormente se midió el largo total de la planta (LP) desde la raíz (**Figura 23**).



Figura 23. Puntos de inicio y final para tener la longitud total (hojas, tallo y raíz) de plantas de lechuga y cebolla.

Finalmente, se pesaron las plántulas. Este peso se consideró como el peso fresco o biomasa total (BT) de los dos cultivos. Posteriormente, según el **OECD 208** se secaron las muestras a 60 °C hasta obtener una masa constante. De donde se obtuvo el peso seco o biomasa seca (BS) que se usó para hacer el análisis. Adicionalmente, entre ambas biomásas obtenidas se determinó el contenido de humedad de los cultivos (CH_c) como porcentaje de la BT, mediante la ecuación (9).

$$CH_c = \frac{[BT - BS]}{[BT]} \times 100 \quad (9)$$

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. *Desintegración y caracterización de bioplásticos en un sistema de compostaje a escala casera*

5.1.1. Desintegración de los bioplásticos

A partir de las pruebas de desintegración realizadas a los bioplásticos se obtuvieron diversos resultados, entre estos el porcentaje de material desintegrado y el tamaño de los fragmentos de los bioplásticos. La **Figura 24** muestra el porcentaje de material desintegrado y no desintegrado de los bioplásticos de PLA y PBAT analizados en cajas (CPLA y CPBAT) y en composteras rotatorias (RPLA y RPBAT). Esta desintegración se midió una vez finalizado el proceso de compostaje de 180 días de duración, debido a que realizarlo en etapas intermedias del proceso de compostaje podría generar pérdidas del compost que se iba obteniendo de ambos sistemas, las cuales habrían afectado otros resultados de la investigación. Además, se muestra la clasificación de los fragmentos de los bioplásticos desintegrados según el tamaño. Se observan tres rangos de tamaño de los fragmentos, mayor a 10 mm, entre 5 y 10 mm y entre 2 y 5 mm. El material desintegrado corresponde a la masa de bioplásticos que pasó por el tamiz de 2 mm.

Los bioplásticos en cajas presentaron una desintegración menor. El CPLA alcanzó una desintegración promedio de $6,07 \pm 1,37\%$. Por su parte, el CPBAT alcanzó una desintegración de $20,58 \pm 0,32\%$. El PLA y PBAT tuvieron porcentajes de desintegración superiores en los sistemas rotatorios que en las cajas. El RPLA presentó una desintegración de $97,54 \pm 2,10\%$ y el RPBAT de $46,34 \pm 17,85\%$. Estos resultados muestran que la desintegración del PBAT en ambos sistemas es diferente en comparación con los sistemas con PLA. La desintegración del RPLA fue superior a un 95%; mientras que en cajas tuvo un comportamiento diferente y no se desintegró.

Es importante reportar que las composteras rotatorias por su diseño cuentan con orificios de ventilación donde se da una pérdida de pequeñas cantidades de residuo sintético al momento de aplicar rotación. En este escenario se podría afirmar que se dio una pérdida

mínima de fragmentos pequeños de bioplásticos (<1 mm). Estas pérdidas fueron pocas; además no eran cuantificables por razones prácticas, debido al número y el tamaño su obtención no resultaba práctica para la escala del presente estudio. En consecuencia, se podría afirmar que este factor no afecta significativamente los resultados del porcentaje de desintegración obtenido para los sistemas en rotatorias.

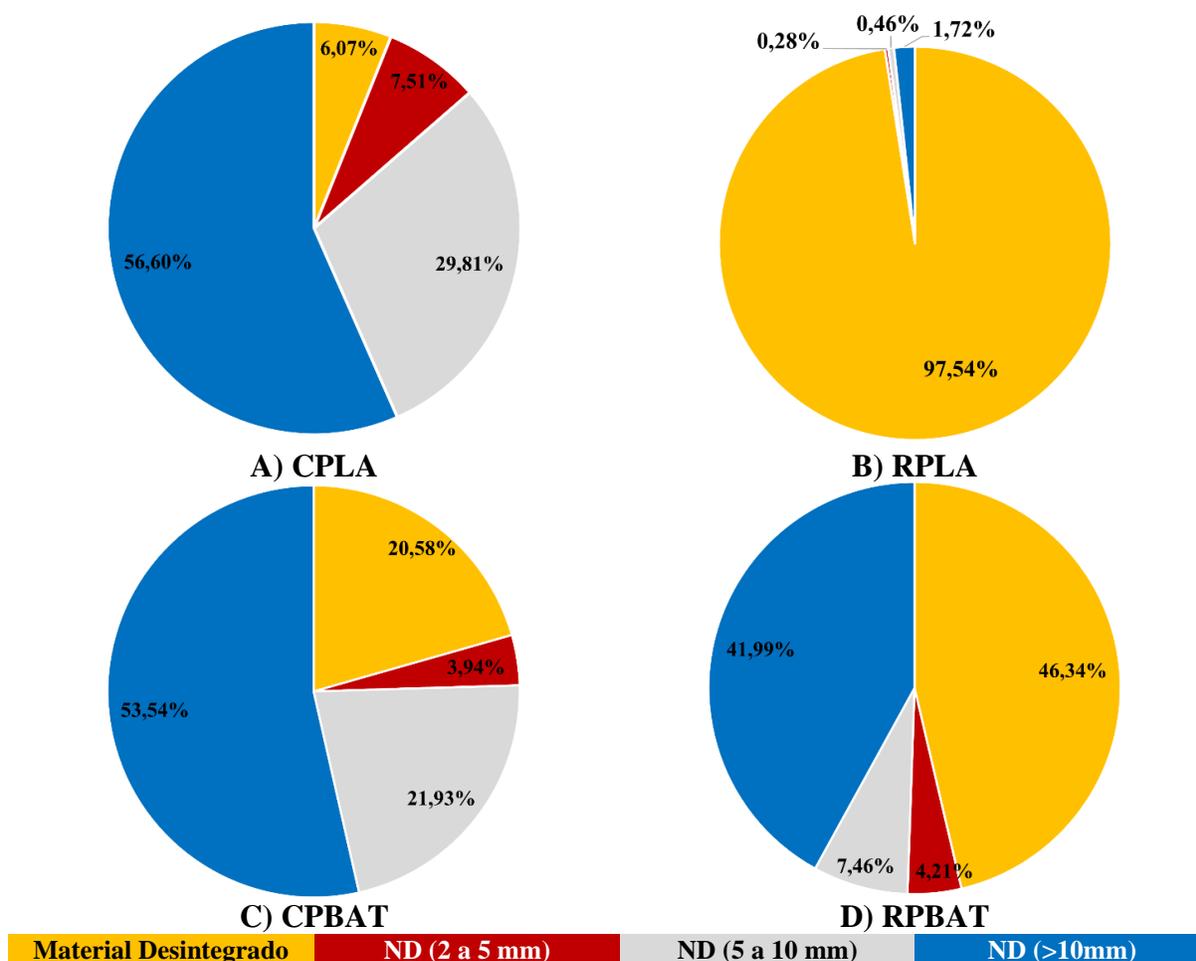


Figura 24. Porcentaje de Material desintegrado y no desintegrado (ND) promedio de bioplásticos de PLA y PBAT en sistemas de compostaje tipo caja (CPLA y CPBAT) y composteras rotatorias (RPLA y RPBAT).

Los valores de la desviación estándar muestran que la variabilidad de los resultados entre las réplicas de cada sistema es inferior a 20%, los cuales están dentro de los límites aceptados en la norma **UNE-EN ISO 20200** [66]. Por lo tanto, este resultado revela que los datos de desintegración obtenidos son válidos. Además, los resultados estadísticos

mediante la prueba de Kruskal-Wallis para datos no paramétricos indicaron que, al estudiar cada sistema de compostaje por separado, sí existen diferencias significativas en la desintegración. Tales diferencias fueron observadas entre los bioplásticos, el tipo de sistema de compostaje y también en la interacción entre el sistema de compostaje y el tipo de bioplástico.

La tendencia de los datos en todos los sistemas es similar para los tres tamaños de fragmentos de bioplásticos. Se puede observar en RPLA, que, en los tres casos, los porcentajes de material no desintegrado son muy bajos. Mientras que el CPLA presenta los mayores porcentajes de bioplásticos no desintegrados en los tres tamaños de partícula obtenidos. En los sistemas con PLA, hay que destacar el efecto del tamaño del bioplástico agregado al inicio del ensayo, si bien el RPLA tenía fragmentos de 5 x 5 cm presentó mejores rendimientos en cuanto a la desintegración. El mismo material presentó rendimientos menores en las cajas que tenían fragmentos de menor tamaño (2,5 x 2,5 cm). El uso del menor tamaño de los trozos de bioplásticos (2,5 x 2,5 cm) en ambos sistemas es probable que diera como resultado una mayor desintegración en las composteras rotatorias; es decir que se hubiese facilitado aún más el proceso en estas composteras.

En los sistemas con el CPBAT y RPBAT, el porcentaje de los fragmentos de tamaño entre 5 y 10 mm y superiores a 10 mm es mayor en CPBAT. Estos resultados sugieren que el PBAT presenta más material no desintegrado, en consecuencia, necesitará más tiempo para desintegrarse.

La **Figura 24** también considera la masa de bioplásticos no desintegrado, que es la retenida en cada uno de los tres tamices empleados. La primera diferencia observada indica que más del 40% de las partículas retenidas presentan un tamaño superior a los 10 mm en todos los sistemas, excepto para el RPLA que tan solo representa el 1,72%. Lo anterior debido al alto grado de desintegración del RPLA.

Los bioplásticos en composteras rotatorias presentaron mayor desintegración que los bioplásticos en cajas. Esta información se puede corroborar visualmente con las imágenes de la **Tabla 6** y **Tabla 7**. La **Tabla 6** muestra imágenes de cómo evolucionó el proceso de

desintegración del PLA en los dos sistemas. Las imágenes del CPLA muestran que no hay un cambio visual fácilmente perceptible. Estos resultados son consistentes con los de la **Figura 24** que presentan un bajo porcentaje de desintegración. Este se mantuvo igual desde el día 0 hasta el día 180. En la investigación realizada por Arrieta et al., donde emplearon la **UNE-EN ISO 20200:2015** y una temperatura de compostaje de 58 °C, luego de 7 días había incrementado la opacidad del PLA [121]. Estos resultados son diferentes a los encontrados para el caso del CPLA, ya que el material presentó brillo durante los 180 días del proceso de compostaje.

En los primeros 16 días del proceso de compostaje el RPLA alcanzó temperaturas superiores a 50 °C, aunque fue un periodo breve de temperaturas termófilas favoreció la desintegración del PLA. Tal como lo indica Torrez, empleando compostaje a escala laboratorio (58 °C) se obtuvo una desintegración de 100 % luego de 3 meses de compostaje, sin embargo, desde el día 11 del proceso se dificultaba apreciar los fragmentos del PLA. Este, resultado, se podría atribuir a la temperatura de compostaje utilizada [23]. El RPLA presenta una desintegración evidente a los 28 días. Se puede observar cómo los bordes se fraccionaron, por lo tanto, se puede asumir que el área superficial de los cuadrados de PLA se redujo. Además, para el día 180 el área del bioplástico RPLA se redujo en un 75% en comparación al inicio del proceso de compostaje. Esto confirma los resultados de porcentaje de desintegración analizados previamente.

Tabla 6. Desintegración del PLA a lo largo del tiempo (días) del proceso de compostaje en CPLA y RPLA.

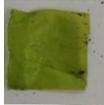
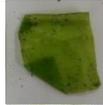
Día / Sistema	0	28	56	84	112	140	168	180
CPLA								
RPLA								

La **Tabla 7** muestra las imágenes de CPBAT y RPBAT donde se pueden apreciar los cambios en los bioplásticos durante el tiempo de compostaje. Las imágenes del CPBAT ejemplifican que no hay un cambio que evidencie una desintegración relevante. Al contrario, el RPBAT si muestra algunos cambios como la rotura del material. Además, se logró apreciar en los dos sistemas de compostaje que el PBAT perdió el brillo inicial y se palpaba más frágil al tacto. Sin embargo, en general para ambos sistemas la apariencia cambio poco a lo largo del proceso, a pesar de presentar porcentajes de desintegración de 20,58% y 46,34% para CPBAT y RPBAT, respectivamente.

Estos resultados determinan que se dio una desintegración del PBAT debido a las temperaturas alcanzadas al inicio del proceso de compostaje, específicamente para el PBAT en rotatorias que durante los primeros días de compostaje alcanzó temperaturas termófilas, en un estudio previo utilizando cajas se demostró que una temperatura constante de 58 °C durante 3 meses reflejaba resultados de desintegración de hasta un 99,43 % [23]. Lo que implica que la temperatura es una variable que afecta directamente el proceso de compostaje y por ende el tiempo de desintegración de los bioplásticos.

Oliveira et al., estudiaron la biodegradación de películas de PBAT enterradas en suelo y encontraron que para el PBAT la pérdida de masa luego de 75 días fue menor al 6%. Además, los cambios en la apariencia del PBAT no se observaron durante los primeros 60 días de estar enterrado en el suelo [123]. Este último dato sobre la apariencia es similar a lo que se visualiza en la **Tabla 7** especialmente para el caso del CPBAT, donde solamente después de 140 días comienzan a notarse leves fisuras en el material.

Tabla 7. Desintegración del PBAT a lo largo del tiempo (días) del proceso de compostaje en CPBAT y RPBAT.

Día	0	28	56	84	112	140	168	180
CPBAT								
RPBAT								

Los resultados de la desintegración y los mostrados en la **Figura 24** destacan que el PBAT presentó el mayor porcentaje de desintegración en el sistema de compostaje en cajas (CPLA: 6,08 % y CPBAT: 20,58 %) . Sin embargo, esta situación no fue igual en los sistemas en rotatorias, ya que el RPLA presentó una desintegración de 97,54 % mientras que el PBAT de 46,34 %. Los bioplásticos presentan un comportamiento inverso en la desintegración que depende del sistema de compostaje en el que se encontraban. Una de las razones de este comportamiento puede ser las comunidades microbianas presentes en el compost que pudieron tener efecto en la forma que consumieron el PBAT para desintegrarlo.

En el desarrollo de esta investigación no se realizaron análisis de comunidades microbianas presentes en el compost. Sin embargo, existe una investigación, donde si bien no se utilizó compost, se empleó *Stenotrophomonas sp.* para degradar PBAT a 37°C, siendo este un microorganismo que se desarrolla adecuadamente de 20 a 45 °C [124]. Asumiendo que un microorganismo como el mencionado tuvo algún efecto sobre la degradación del PBAT, implicaría que pudo también favorecer su desintegración en sistemas en cajas, debido a que la temperatura interna siempre fue menor a 28 °C. Mientras que el PBAT en rotatorias no fue igual, ya que las temperaturas mayores a 45 °C pudieron inhibir el crecimiento; por ende frenar la desintegración por este tipo de microorganismos que se desarrollan mejor a temperatura ambiente.

Es necesario realizar análisis de comunidades microbianas presentes en el compost. De manera tal que se puedan identificar y aislar las variables como temperatura, humedad, oxígeno, entre otras que tienen efecto en el proceso y podrían contribuir en dilucidar este comportamiento. Sin embargo, para efectos de esta investigación no estaba dentro de los alcances determinar las comunidades microbianas presentes y su interacción con el compost y los bioplásticos.

5.1.2. Análisis de la caracterización de los bioplásticos

5.1.2.1. Análisis termogravimétrico (TGA)

Los termogramas de la **Figura 25** brindan información importante sobre la pérdida de masa de los bioplásticos al ser sometidos a distintas temperaturas (25 a 600 °C). Se puede observar la degradación que sufre cada material. Además, la **Figura 26** complementa la información al mostrar la derivada de los termogramas (D_{TGA}). La derivada facilita la visualización de los eventos principales de la degradación de las muestras, como lo son la degradación del PLA y del PBAT.

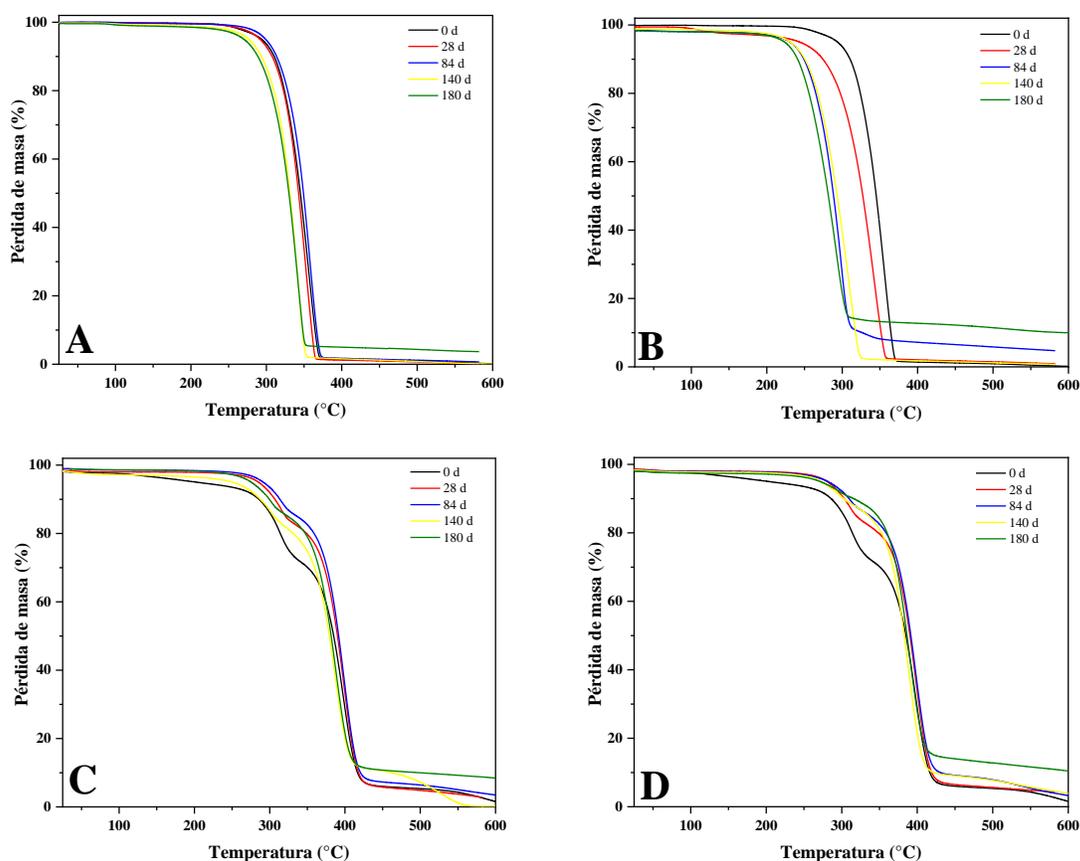


Figura 25. Termogramas de los bioplásticos durante el proceso de compostaje. A: CPLA, B: RPLA, C: CPBAT y D: RPBAT.

Se determinó que las muestras de CPLA y RPLA tuvieron una pérdida de masa en un solo paso. Esto evidencia que las muestras están compuestas únicamente por ácido poliláctico.

Caso contrario al CPBAT y RPBAT donde la pérdida de masa se da en dos pasos. El primer cambio en el termograma evidencia la desintegración del PLA y el segundo cambio la del PBAT. Estos resultados corresponden con lo esperado ya que las bolsas tipo camisa de PBAT empleadas son una mezcla de PLA, PBAT y almidón de maíz. Este último, presenta temperaturas de degradación entre 286 °C y 328 °C [125], [126]. Se ha encontrado que la degradación del almidón de maíz también puede ir desde 250 hasta 400 °C [127]. En esta investigación para estos rangos dados se dan los eventos principales de degradación del PLA y PBAT, por lo que la degradación del almidón se superpone con la de estos materiales.

Los resultados de la pérdida de masa de la **Tabla 8** se extraen de la **Figura 25**. Se consideraron tres temperaturas clave para determinar el comportamiento de pérdida de masa, 300, 350 y 400 °C, ya que están dentro del rango (250 – 400 °C) donde suceden los mayores eventos de degradación de ambos materiales. Se muestra entonces la pérdida de masa asociada a las tres temperaturas para cada sistema de compostaje. La tendencia general en los cuatro sistemas es que conforme avanza el tiempo de compostaje y aumenta la temperatura del análisis TGA, también aumenta la pérdida de masa.

Tabla 8. Pérdida de masa a tres temperaturas (300, 350 y 400 °C) de los diferentes sistemas de compostaje.

Sistema	Pérdida de masa, PM (%)											
	CPLA			RPLA			CPBAT			RPBAT		
	Día	PM ₃₀₀	PM ₃₅₀	PM ₄₀₀	PM ₃₀₀	PM ₃₅₀	PM ₄₀₀	PM ₃₀₀	PM ₃₅₀	PM ₄₀₀	PM ₃₀₀	PM ₃₅₀
0	6,4	60,8	98,6	6,4	60,8	98,6	13,9	29,8	71,7	13,9	29,8	71,7
28	7,2	67,9	98,8	21,8	88,7	97,9	8,1	20,3	67,0	9,2	20,3	66,5
56	7,6	65,1	98,6	44,6	97,7	98,1	7,5	19,9	67,0	7,0	16,8	63,5
84	5,3	51,1	98,3	74,4	91,8	92,8	6,6	17,4	65,4	7,9	17,7	65,0
112	8,3	75,7	98,0	66,3	95,5	96,0	8,2	19,5	64,7	6,3	14,1	63,3
140	13,3	94,9	98,4	60,8	97,9	98,2	13,4	25,1	80,3	11,9	21,8	93,7
168	14,9	96,3	97,0	50,2	96,0	96,6	12,2	24,8	81,6	8,5	16,7	75,7
180	15,8	93,6	95,0	78,8	86,8	87,3	10,4	21,1	78,8	8,5	16,0	71,7

En primer lugar, se observan estos cambios para los dos sistemas con PLA. En CPLA con las temperaturas de PM₃₀₀ y PM₃₅₀ conforme pasaron los días de compostaje aumentó la pérdida de masa. En PM₄₀₀ las pérdidas de masa son mayores a un 95,0 %

independientemente del día de compostaje. Esto implica que el PLA a una temperatura superior a 400 °C se desintegra. Este mismo comportamiento se observó en la PM₄₀₀ de RPLA.

En CPLA para el día 180, la PM₃₀₀ alcanzó una pérdida de masa de 15,8 %, en RPLA esta pérdida fue de 78,8 %. Esto es un claro indicativo de que la estructura del PLA cambió en RPLA luego de 180 días de compostaje. Haciéndolo más susceptible a los cambios de temperatura que el compostado en CPLA, en la **Figura 25** se observa de manera más clara que conforme aumenta el tiempo de compostaje se da una disminución a la que se da la degradación del material.

Los cambios descritos no son exclusivos al finalizar el proceso de compostaje, ya desde el día 28 se lograban apreciar. El análisis TGA en PM₃₀₀ refleja una pérdida de masa de 7,2 % para CPLA, mientras que en RPLA es de 21,8 %. Sucede lo mismo para PM₃₅₀ en el día 28 con una pérdida de 67,9 % en CPLA y de 88,7 % en RPLA. Se observa que, en ambos sistemas, para el día 28 la pérdida de masa de PLA es mayor en los sistemas rotatorios. Este comportamiento se podría explicar debido a la temperatura interna en los sistemas de compostaje. Las cuales afectaron la composición y estructura del PLA, no así en las cajas, donde las temperaturas internas fueron inferiores a 28 °C. Estos datos evidencian que las temperaturas internas de los sistemas de compostaje influyen en la degradación y/o los cambios en la estructura del PLA.

Un comportamiento similar a PM₃₀₀ se obtuvo para PM₃₅₀. La diferencia principal radica en que el RPLA para PM₃₅₀ alcanzó una pérdida de masa de 88,7 % a los 28 días de compostaje. Lo cual no sucedió así para CPLA el proceso se dio de manera más escalonada, siendo el día 140 donde se alcanzó una pérdida de masa de 94,9 %. Los días anteriores las pérdidas de masa se mantuvieron en un rango de 51,1 a 75,7 %.

En cuanto a los sistemas que contenían PBAT se puede apreciar un comportamiento diferente al PLA. La primera diferencia que se puede apreciar es que para PM₃₀₀ de CPBAT y RPBAT no se obtienen pérdidas de masa superiores al 10%, desde el día 0 al 180 en

ambos sistemas. Además, en PM₄₀₀ para ambos sistemas se alcanzan pérdidas de masa inferiores a las obtenidas en los sistemas con PLA.

La pérdida de masa versus el tiempo no presenta diferencias en ambos sistemas de compostaje con PBAT en las tres temperaturas clave seleccionadas. Por ejemplo, a los 28 días en PM₃₅₀ se reportó una pérdida de masa de 20,3 % en ambos sistemas. Similarmente sucedió en el día 84 para PM₃₅₀, la pérdida de masa correspondió a 17,4 % para CPBAT y 17,7 % para RPBAT. Esto no sucedió así en los sistemas que contenían PLA.

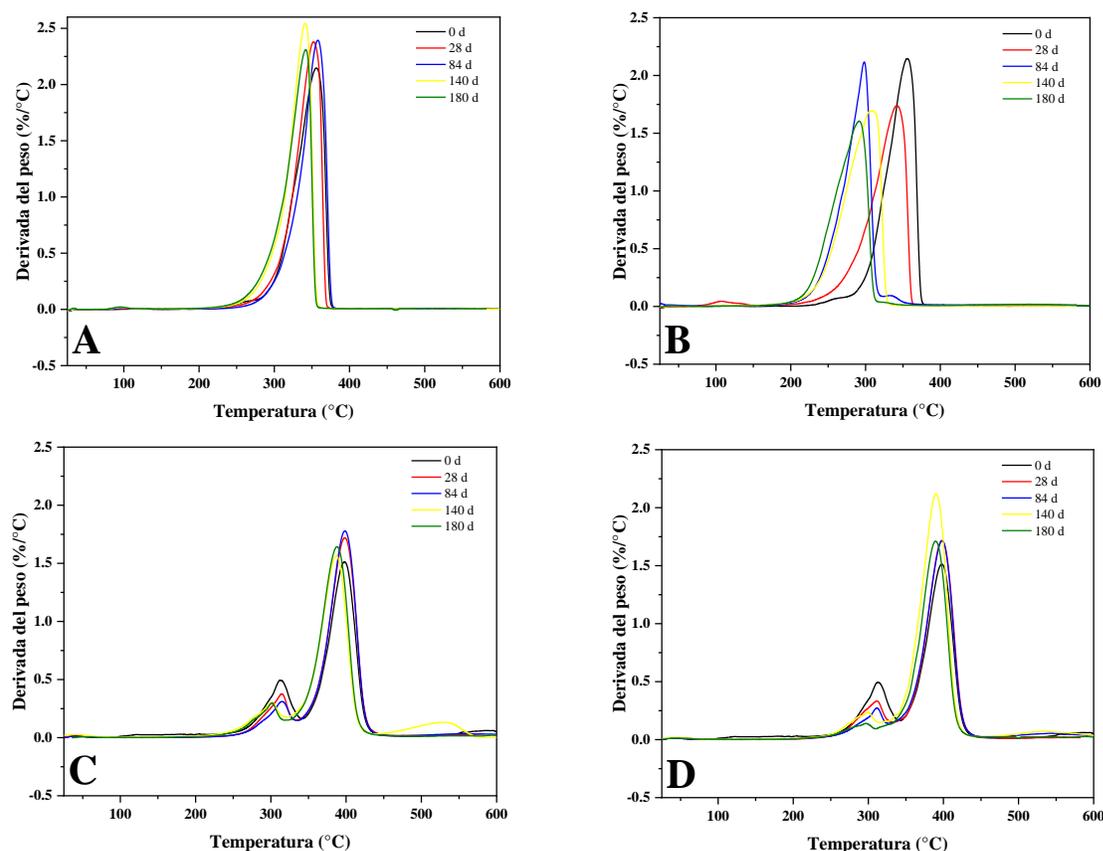


Figura 26. Derivada (D_{TGA}) del peso de los bioplásticos durante el proceso de compostaje. A: CPLA, B: RPLA, C: CPBAT y D: RPBAT.

Los resultados revelan que el PBAT indistintamente del sistema de compostaje tiene una resistencia a cambiar su estructura en procesos de compostaje en escala casera, si se compara con el PLA. Ya que al estudiar la degradación del PBAT mediante TGA no presenta pérdidas de masa tan significativas como las encontradas en los sistemas con PLA.

La **Tabla 9** presenta los resultados de los eventos principales de la degradación de los cuatro sistemas de compostaje analizados. Las temperaturas donde se dan los eventos principales de degradación del PLA (T_{PLA}) y del PBAT (T_{PBAT}) se obtuvieron de la **Figura 26**. Las correspondientes a PLA muestran el único evento correspondiente a su degradación (T_{PLA}). Mientras que las que involucran PBAT muestran dos eventos principales. El primero corresponde a la T_{PLA} y el segundo a la T_{PBAT} .

Tabla 9. Eventos principales de degradación (T_{PLA} y T_{PBAT} (°C)) obtenidos del DTGA para ambos bioplásticos en los sistemas de compostaje estudiados.

Sistema Día	Bioplástico PLA (°C)		Bioplástico PBAT (°C)			
	CPLA	RPLA	CPBAT		RPBAT	
	T_{PLA}	T_{PLA}	T_{PLA}	T_{PBAT}	T_{PLA}	T_{PBAT}
0	356	356	313	398	313	398
28	352	342	315	398	311	398
56	354	321	316	398	313	400
84	358	298	315	398	311	398
112	347	296	312	399	307	398
140	341	309	301	387	299	390
168	338	315	305	389	299	389
180	342	291	302	388	297	390

De manera general se puede apreciar que las dos temperaturas analizadas (T_{PLA} y T_{PBAT}) disminuyen significativamente en el día 180 respecto al día 0 en ambos sistemas de compostaje. El análisis de los sistemas con PLA revela que el sistema RPLA presenta una disminución de 64,7 °C, mientras que para CPLA esta reducción fue de 14 °C. Se obtiene un resultado en una menor magnitud para los sistemas con PBAT, la T_{PLA} disminuyó 11 °C en CPBAT y 16 °C en RPBAT. Mientras que la T_{PBAT} disminuyó 10 °C en CPBAT y 8 °C en RPBAT. La diferencia de temperatura en los sistemas de PBAT es menor que en los de PLA. Este resultado es consistente con el análisis previo de pérdida de masa, se determinó que el PBAT presenta una mayor resistencia térmica, conforme avanzó el tiempo de compostaje la diferencia de temperaturas no aumentó de acuerdo con lo esperado.

Se puede establecer que ambos bioplásticos evidencian una degradación de los materiales en compostaje. Además, independientemente del sistema de compostaje, el PBAT presenta menor degradación que el PLA. De acuerdo con los resultados obtenidos, el compost

producido de la desintegración de PLA en composteras rotatorias se vuelve un proceso más eficiente.

5.1.2.2. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El análisis de calorimetría diferencial de barrido se emplea para medir los cambios físicos y químicos a través de la transferencia de calor en un material. El DSC permitió obtener las gráficas del flujo de calor (W/g) versus temperatura durante el proceso de compostaje. La **Figura 27** muestra los resultados del análisis DSC para el PLA en los dos sistemas de compostaje estudiados cada 28 días. La temperatura de transición vítrea (T_g) y la temperatura de fusión (T_f) del PLA se encontraron presentes en ambos sistemas de compostaje. Este resultado indica que el material en estudio se considera un bioplástico semicristalino como el polipropileno o polietileno. Las temperaturas reportadas a lo largo del proceso de compostaje se muestran en la **Tabla 10**, donde se pueden observar los cambios que presentaron durante el ensayo de compostaje.

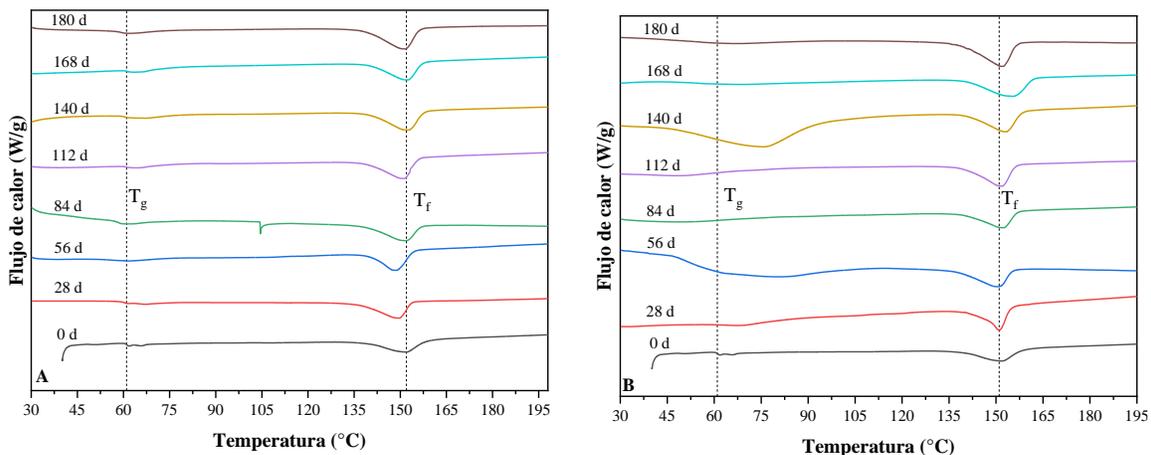


Figura 27. Curvas de calentamiento mediante análisis DSC para el PLA durante el compostaje. A: CPLA, B: RPLA. T_g : Temperatura de transición vítrea. T_f : Temperatura de fusión.

Tal como se muestra en la **Figura 27** y la **Tabla 10** el valor de T_g del PLA antes de iniciar el proceso de compostaje (0 d) es de 61,2 °C. Investigaciones enfocadas en la biodegradación del PLA han determinado que este valor puede ser de 60 °C [85] o de 65,5 °C [128]. Estos resultados indican que el valor obtenido en esta investigación es

consecuente a lo reportado en la literatura. Estos autores además reportaron que la T_g no presentó cambios posteriores a los procesos de biodegradación que emplearon [85], [128]. Caso contrario al de esta investigación donde la T_g si varió para CPLA y RPLA. El cual oscilo en un rango de 56,0 a 61,2 °C para CPLA. No se identifica una tendencia en el tiempo a aumentar o disminuir, si no que oscila entre el rango brindado. Al mantenerse la T_g del material similar durante todo el proceso no hay un cambio importante en la estructura química del material, lo que puede implicar que no está sufriendo una biodegradación significativa.

Los valores de T_g para RPLA presentan una variación mayor que en CPLA durante el proceso de compostaje (54,3 a 64,2 °C), pero de igual forma que CPLA no sigue una tendencia definida si no que oscila entre el rango mencionado. De los datos mostrados en la **Tabla 10** se puede observar que entre el primer y último día de medición la T_g disminuyó 5,4 °C, siendo esto un indicativo de un cambio mayor que para CPLA (1,7 °C) en la estructura química del material. Una reducción de la T_g con el tiempo se puede relacionar con la movilidad de las moléculas debido al proceso hidrolisis, tal como lo obtuvieron Gorrasi & Pantani al estudiar muestras de PLA en ensayos de hidrolisis con temperatura de compostaje de 58°C [129]. Esto implica una incidencia en los cambios de la estructura polimérica del PLA, influenciado por el sistema de compostaje en el cual estaba el biopolímero.

Tabla 10. Temperaturas de transición vítrea (T_g) y de fusión (T_f) del PLA obtenidos durante el proceso de compostaje en CPLA y RPLA.

Día	CPLA		RPLA	
	T_g (°C)	T_f (°C)	T_g (°C)	T_f (°C)
0	61,2	152,0	61,2	152,0
28	60,3	149,6	64,2	151,0
56	56,0	148,7	51,2	150,7
84	58,3	151,7	-	152,5
112	61,1	151,4	-	152,0
140	60,5	152,7	57,6	153,4
168	61,2	152,5	54,3	155,5
180	59,5	151,6	55,7	152,2

A pesar de encontrar una variación de la T_g durante el proceso de compostaje para los dos sistemas con PLA, la temperatura del compost durante todo el proceso es un factor importante para considerar en este análisis. Mistry et al., emplearon diferentes bacterias para biodegradar PLA semicristalino a 30 °C y obtuvieron porcentajes bajos en la pérdida de peso del material. Una de las razones a las cuales atribuyen esta condición es que la T_g del PLA siempre fue mayor que la temperatura de biodegradación empleada (30 °C) [130].

Lo que se puede inferir es que si en el proceso de compostaje no alcanza valores cercanos a T_g no hay un cambio en la flexibilidad del PLA y por ende no hay biodegradación. El compost de RPLA alcanzó temperaturas de un máximo de 55 °C en los primeros días del proceso que, si bien no llegaron a 61,2 °C, si favoreció el cambio en la flexibilidad del material y por ende en la biodegradación. Caso contrario el CPLA que durante todo el proceso alcanzó una temperatura máxima de 26 °C, esto podría explicar la poca desintegración y biodegradación del material.

En cuanto a la temperatura de fusión, se determinó que al iniciar el proceso la T_f es de 152,0 °C, similar a valores reportados por otros autores de 150,6 °C [128], 153,0 °C [85] y 156,6 °C [131]. Los valores de T_f durante el proceso de compostaje no presentaron una variación significativa respecto al valor inicial medido tanto en CPLA como en RPLA. Los cambios al ser leves implican que el fenómeno de degradación no fue tan evidente al analizarlo en base a los cambios en la temperatura de fusión a lo largo del tiempo de compostaje.

Por otra parte, al analizar las curvas de calentamiento de CPBAT y RPBAT mostradas en la **Figura 28** y comparándolas con los sistemas de PLA, las diferencias en las temperaturas de transición vítrea y de fusión para PBAT no son visibles. Únicamente la muestra inicial de CPBAT y RPBAT que no ha pasado por el proceso de compostaje refleja una temperatura de fusión en 127,1 °C. Además, de un pico que se observa para CPBAT en el día 28 a ~131,6 °C. Este pico refleja ser una temperatura de fusión, que difiere de algunos valores encontrados en la literatura, 124°C para muestras de PBAT puro [132], además en otro estudio una mezcla de PBAT con PLA alcanzó una T_f de 119 °C luego de la degradación [85]. Este comportamiento es atípico, dado que en ningún otro caso se presentó una

temperatura de fusión que permita caracterizar que este es un comportamiento típico de la mezcla polimérica de PBAT con PLA.

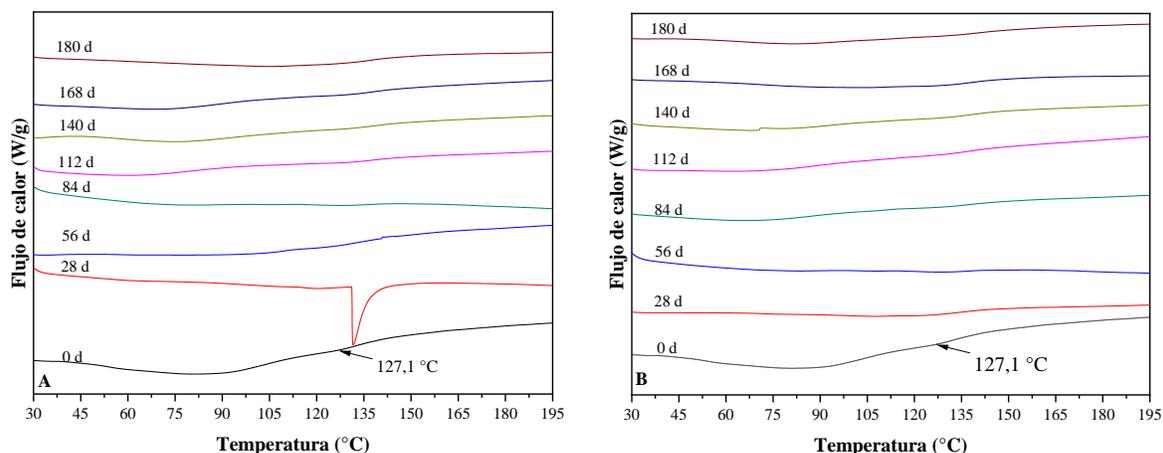


Figura 28. Curvas de calentamiento mediante análisis de DSC para PBAT durante el compostaje. A: CPBAT, B: RPBAT.

5.1.2.3. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Tabla 11. Rangos de longitudes de onda asociados al PLA y PBAT reportados en la literatura.

Material	Grupo	Longitud de onda (cm ⁻¹)	Vibraciones encontradas	Referencia
PLA	C-H	1445 a 1459	Estiramiento	[133]–[135]
	C=O	1746 a 1759	Estiramiento	[128], [136]–[139]
	C-O	1185 a 1189	Estiramiento	[122], [139], [140]
PBAT	C-H	2855/2958	Estiramiento relacionado al carbonilo	[132], [141]
	C=O	1704 a 1717	Estiramiento en enlace éster	[123], [132], [141]–[143]
	C-O	1250 a 1260	Estiramiento, torsión en enlace éster.	[123], [141], [143]

Al realizar los análisis FTIR es importante identificar los picos característicos del material en estudio, de manera tal que se puedan señalar los grupos funcionales asociados. La

los grupos funcionales obtenidos. Se logró identificar que en ambos materiales hay tres grupos funcionales principales, el C=O, C-H y C-O, con la diferencia que en cada material estos se encuentran en una longitud de onda diferente.

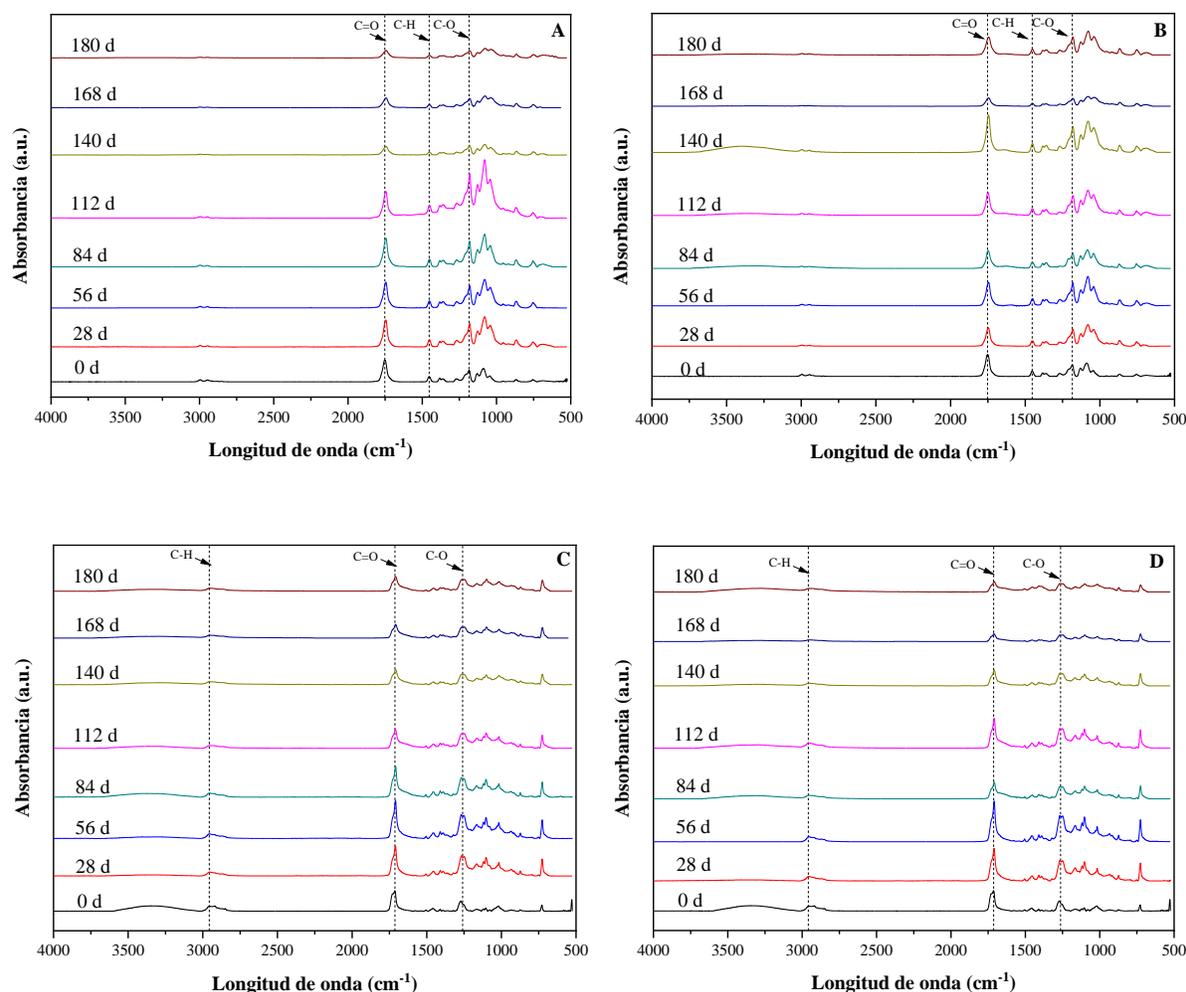


Figura 29. Espectro FTIR de PLA y PBAT durante el proceso de compostaje. A) CPLA B) RPLA C) CPBAT y D) RPBAT.

La **Figura 29** muestra los espectros de absorbancia obtenidos mediante FTIR para los cuatro escenarios de compostaje que se realizaron en este estudio. Además, la **Tabla 12** muestra las longitudes de onda y absorbancias asociadas al día inicial del proceso (0 d), intermedio (84 d) y último día de medición (180 d). Esto con la finalidad de observar las variaciones en los espectros a lo largo del proceso de compostaje.

La tendencia que se puede observar en los espectros de la **Figura 29** y los resultados de la **Tabla 12** en cuanto a la longitud de onda es que conforme avanza el tiempo de compostaje hay un desplazamiento de los picos. Estos cambios son leves y hay casos donde no se aprecia una variación. Los grupos funcionales C=O, C-H y C-O presentaron un desplazamiento menor a 8 cm^{-1} tanto para PLA como para PBAT, excepto el grupo C-O de CPBAT que presentó una disminución de 24 cm^{-1} . Estos desplazamientos son un indicativo del proceso de degradación en el PLA y la mezcla polimérica de PLA-PBAT [144].

Tabla 12. Longitud de onda y absorbancia para PLA y PBAT en los dos sistemas de compostaje, en los días 0, 84 y 180.

Sistema	Parámetro Día	Longitud de onda (cm^{-1})			Absorbancia (%)		
		0	84	180	0	84	180
CPLA	C=O	1752	1745	1744	35,3	46,7	12,1
	C=H	1455	1452	1452	8,4	12,3	4,2
	C-O	1185	1181	1180	18,9	42	12,1
RPLA	C=O	1752	1747	1745	35,3	28,7	28,9
	C=H	1455	1453	1452	8,4	9,9	9,2
	C-O	1185	1182	1181	18,9	24,9	29,2
CPBAT	C=H	2956	2954	2954	7,9	6,6	4,9
	C=O	1714	1709	1708	33,1	50,2	23,8
	C=H	1459	1456	1454	0,1	2,0	5,3
	C-O	1272	1269	1248	16,2	31,5	19
RPBAT	C=H	2956	2953	2954	7,9	5,8	5,8
	C=O	1714	1710	1708	33,1	27,4	16,7
	C=H	1459	1453	1453	0,1	2,0	5,3
	C-O	1272	1268	1267	16,2	20,1	13,7

En cuanto a los resultados de la absorbancia mostrados en la **Tabla 12**, cercano a la mitad del proceso de compostaje (día 84) hay un incremento en la absorbancia para todos los grupos funcionales de CPLA y RPLA con respecto al inicio (día 0). La absorbancia presentó una tendencia a disminuir para el día 180 con respecto al día 0. Estos cambios implican que la estructura del PLA cambió a lo largo del proceso de compostaje, que es un indicativo de una posible degradación del material.

Tabla 13. Índice carbonilo para PLA en los dos sistemas de compostaje.

Sistema Grupo Día	CPLA			RPLA		
	C=O	C-H	Ico	C=O	C-H	Ico
	(1752 cm ⁻¹)	(1455 cm ⁻¹)		(1752 cm ⁻¹)	(1455 cm ⁻¹)	
0	14,89	1,91	7,82	14,89	1,91	7,82
28	17,86	2,81	6,35	12,44	2,09	5,95
56	17,90	2,91	6,15	15,83	3,11	5,10
84	20,27	3,03	6,69	12,35	2,98	4,15
112	-	-	-	14,82	2,91	5,10
140	7,81	1,40	5,57	-	-	-
168	8,36	1,28	6,55	6,25	1,16	5,40
180	6,60	1,10	6,02	13,33	2,27	5,87

Las gráficas de FTIR permiten hacer una estimación del índice carbonilo (Ico). Este índice refleja la cantidad de grupos carbonilos presentes en una muestra respecto a una banda de referencia que para esta investigación se utilizó la que se ubica cerca de 1450 cm⁻¹ para ambos bioplásticos. La **Tabla 13** y **Tabla 14** muestran los índices carbonilo para PLA y PBAT, respectivamente. De los resultados de PLA se puede apreciar que hay una reducción del índice luego de 180 días de compostaje para CPLA y RPLA, de igual forma sucedió para CPBAT y RPBAT. Según la teoría, una disminución en el Ico se debe a que el grupo carbonilo presenta una fractura por hidrólisis en la cadena molecular del PLA, que también propicia un cambio en su estructura química [145]. Esto se puede relacionar con una posible biodegradación en los bioplásticos estudiados.

Tabla 14. Índice carbonilo para PBAT en los dos sistemas de compostaje.

Sistema Grupo Día	CPBAT			RPBAT		
	C=O	C-H	Ico	C=O	C-H	Ico
	(1714 cm ⁻¹)	(1459 cm ⁻¹)		(1714 cm ⁻¹)	(1459 cm ⁻¹)	
0	14,67	1,22	12,02	14,67	1,22	12,02
28	19,97	2,38	8,38	23,08	2,40	9,61
56	25,74	2,90	8,89	26,88	2,87	9,37
84	26,51	2,64	10,06	18,79	2,05	9,17
112	19,87	2,34	8,49	26,13	2,51	10,41
140	14,92	1,37	10,87	14,26	1,56	9,15
168	14,66	1,42	10,35	8,09	0,72	11,27
180	15,45	1,56	9,89	-	-	-

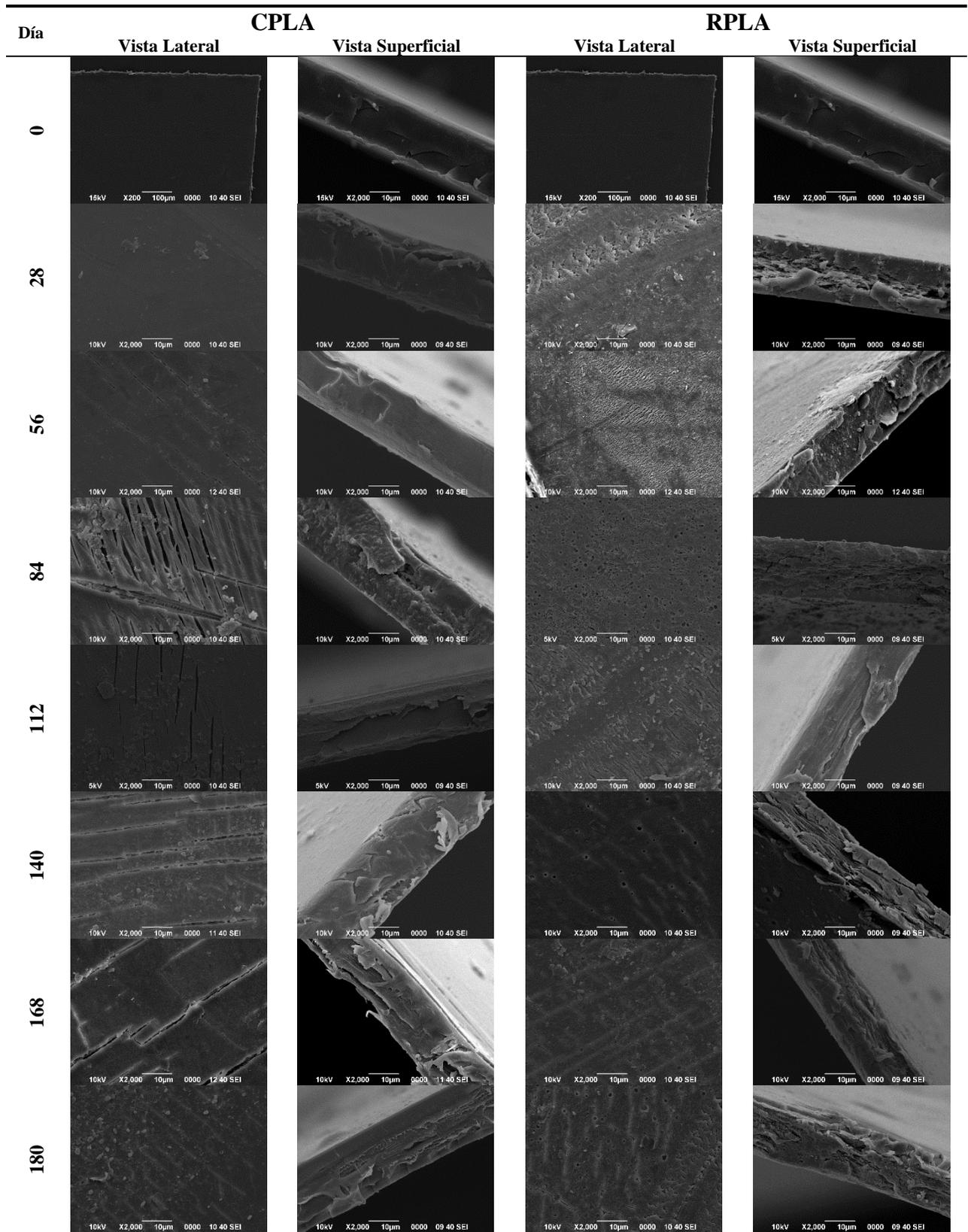
5.1.2.4. *Microscopía electrónica de barrido (SEM)*

La técnica SEM permitió generar imágenes precisas de la superficie de los bioplásticos estudiados en esta investigación. Los resultados obtenidos permiten observar la estructura y morfología de los materiales, como los cambios en la textura y aparición de agujeros y grietas durante el proceso de compostaje. La **Tabla 15** muestra las micrografías, a diferentes magnificaciones, correspondientes a los tratamientos de CPLA y RPLA, mientras que la **Tabla 16** los resultados de CPBAT y RPBAT.

Durante los 180 días de duración del proceso de compostaje de los bioplásticos se realizó el análisis de los perfiles transversales que permitió determinar el espesor de ambos. De acuerdo con las micrografías obtenidas, el espesor de ambos materiales es cercano a 20,0 μm , lo cual concuerda con la información brindada por la empresa DosMil50. Se determinó que el espesor para ambos bioplásticos en cajas (RC) se mantuvo constante versus el tiempo de compostaje, lo que indica que el compostaje en cajas no favoreció la disminución del espesor.

Para el RPLA se aprecia un cambio mayor, entre el primer y último día de medición, ya que hubo una reducción de 4,6 μm , que equivale a una reducción de 21,7% del espesor. Para este estudio, la variable espesor de los bioplásticos no es concluyente de una biodegradación considerable, sin embargo, hay otros aspectos que se aprecian mejor en la superficie como grietas y agujeros que indican la modificación de la morfología de los materiales estudiados.

Tabla 15. Micrografías SEM obtenidas del PLA durante un proceso de compostaje de 180 días.



Respecto a las micrografías para el CPLA (**Tabla 15**), se puede observar la aparición de grietas en la superficie a lo largo del proceso de compostaje. Esta aparición se hace visible a los 56 días de compostaje y continua hasta el último día de medición. Las grietas del día 84 son las más evidentes, estas pueden alcanzar un tamaño de hasta 1,5 μm , al igual que las que se muestran en el día 168. En la investigación de Weng et al, se evidenció la presencia de grietas y por ende la biodegradación del PLA luego de 4 meses enterrado en el suelo a una profundidad de 40 cm [85]. Estos resultados son similares a los obtenidos en este trabajo para CPLA. Dichas grietas se pueden atribuir a la acción de los microorganismos sobre el bioplástico y al volteo de los materiales durante el compostaje, sin embargo, este supuesto no es parte del alcance de esta investigación.

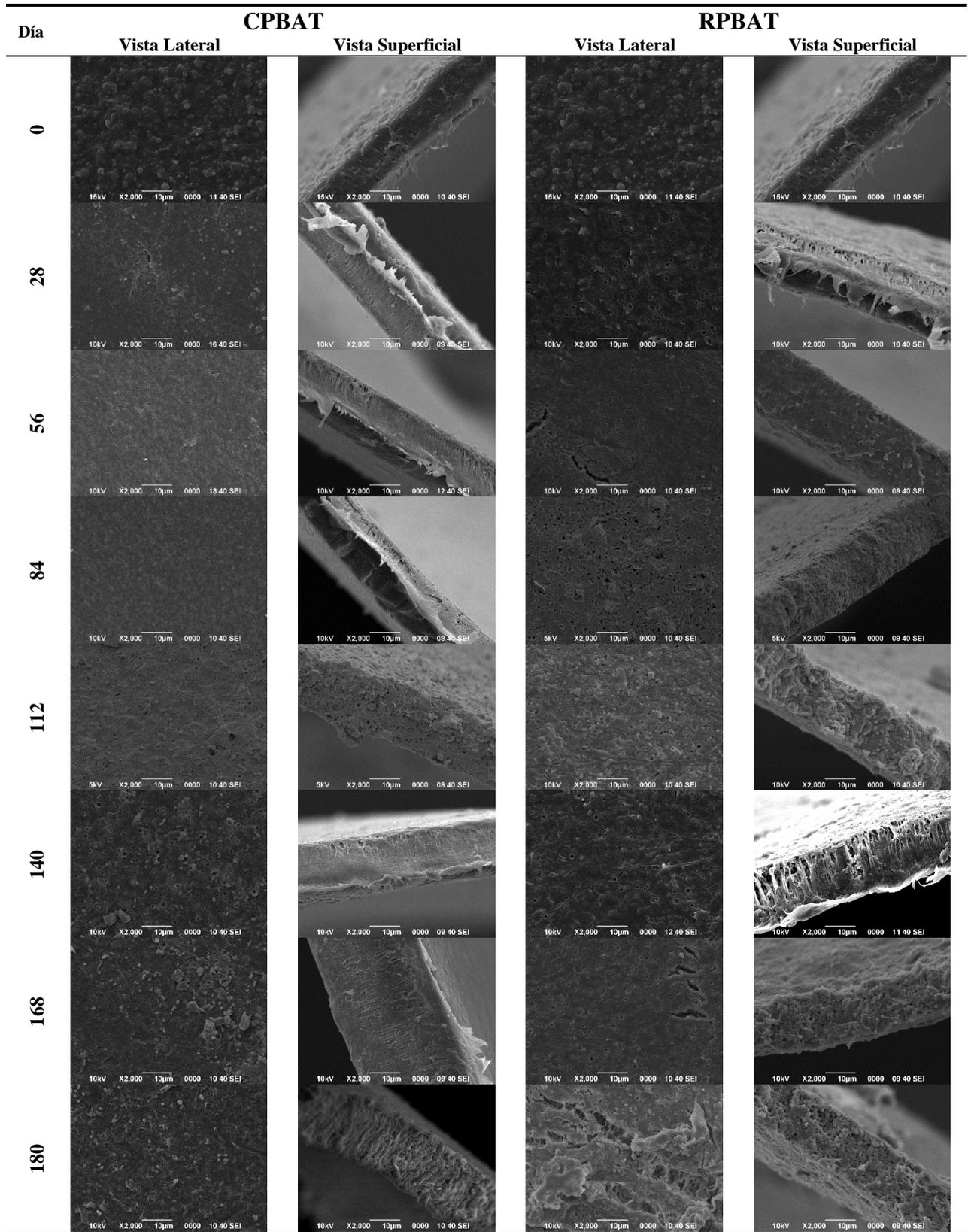
En el caso del RPLA en el día 28 del proceso de compostaje se observa la aparición de grietas. La aparición de grietas fue más acelerada en el caso del RPLA en comparación con el CPLA (56 días). Lo anterior indica que el sistema de composteras rotatorias influyó sobre la aparición de grietas. Arrieta et al, determinó, mediante SEM, que a los 7 días de compostaje a 58 °C la muestra pura de PLA presentaba grietas [122]. Estas diferencias entre el RPLA y el CPLA podrían deberse a las diferencias en las temperaturas entre ambos sistemas. En el caso de RPLA la temperatura del compost alcanzó un máximo de 55,3 °C en las primeras dos semanas del proceso, posteriormente la temperatura disminuyó a 25 °C. Lo cual podría indicar que estas altas temperaturas en los primeros días favorecieron la desintegración del material.

Una característica importante encontrada en las micrografías de RPLA es que hay agujeros además de las grietas. La presencia de ambas características confirma la biodegradación de las muestras, además de ser un indicativo de la disminución de la porción amorfa [140]. Estos cambios se hacen más evidentes a partir del día 140 de medición y hasta el día 180. Es interesante apreciar que en estos días mencionados los agujeros están localizados a lo largo de las grietas. Además, la presencia de ambos en la morfología del PLA facilita la pérdida de masa de este, lo que es acorde con el alto porcentaje de desintegración del RPLA.

La **Tabla 16** muestra las micrografías de PBAT en ambos sistemas. En el día 0 se observó la aparición de rugosidades en el material, contrario al PLA que mostró una apariencia lisa. Las rugosidades podrían facilitar la formación de microorganismos que pueden favorecer la degradación del material. Oliveira et al, encontraron en una muestra de PBAT sometida a biodegradación que existían comunidades de microorganismos. Estos una vez adheridos a la matriz del polímero excretaron enzimas que iniciaron la hidrólisis del polímero [123]. Tanto para CPBAT y RPBAT desde el día 28 se puede apreciar la presencia de algunas comunidades bacterianas, lo cual podría favorecer en la mezcla polimérica de PBAT el proceso de biodegradación.

A partir del día 28 se puede apreciar en la morfología de CPBAT y RPBAT que aparecen agujeros en la superficie del material. Por su parte las grietas se caracterizan por una reducción en comparación con los sistemas de PLA. De las micrografías se determina que las grietas no son características de este material en específico, como si sucede en el PLA. Por lo tanto, la biodegradación del PBAT se llevó a cabo principalmente mediante la formación de agujeros en su superficie y no de grietas.

Tabla 16. Micrografías SEM obtenidas del PBAT durante un proceso de compostaje de 180 días.



5.2. *Análisis del compost resultante con y sin bioplásticos de los sistemas de compostaje*

5.2.1. **Análisis de las variables críticas durante el proceso de compostaje con bioplásticos**

El análisis del proceso de compostaje incluyó un control del comportamiento de las variables presentes, como el cambio de masa del compost en los reactores tipo caja (RC), la variación de la humedad en los reactores rotatorios (RR), la disminución en el contenido de sólidos volátiles (R), y la temperatura del compost en ambos sistemas. El conocimiento de estas variables es de suma importancia para establecer la calidad del compost, determinar puntos críticos que puedan ser corregidos o bien optimizados en el desarrollo de futuras investigaciones.

5.2.1.1. *Temperatura*

Tabla 17. Temperaturas promedio, máximas y mínimas recopiladas de los reactores de compostaje tipo caja (RC) y tipo rotatorias (RR) durante los 180 días del proceso de compostaje.

Sistema	Temperatura de cajas RC				Temperatura en Rotatorias			
	Ambiente RC	CPLA	CPBAT	CCON	Ambiente RR	RPLA	RPBAT	RCON
Promedio	28,0 ± 3,0	23,6 ±1,9	23,7±1,9	23,6±1,9	27,8±3,1	28,9±10,3	28,8±10,5	28,6±10,1
Máxima	34,3	26,3	27,8	27,3	34,3	55,3	56,7	56,0
Mínima	21,6	18,3	18,7	19,0	21,6	20,0	20,0	20,0

La temperatura es una de las variables determinantes en el proceso de compostaje. Esta tiene un rol fundamental en la producción del compost final. Durante el proceso se busca alcanzar temperaturas óptimas que favorecen las etapas de la producción del compost, entre estas la fase mesofílica (menor a 45 °C) y termofílica (mayor a 45 °C). En la primera aumenta la actividad microbiana, generando calor por medio de los microorganismos que utilizan las fuentes sencillas de carbono y nitrógeno. En la termófila se facilita la descomposición de fuentes complejas de carbono mediante las bacterias termófilas, además de ser una etapa de higienización del compost [71]. La **Tabla 17** muestra un resumen de

los eventos principales de temperatura que se determinaron en los dos sistemas de compostaje empleados.

5.2.1.1.1. Reactores tipo caja (RC)

Las temperaturas internas del compost para los tres sistemas en cajas (CPLA, CPBAT y Control o CCON) presentaron valores cercanos durante el proceso de compostaje. De acuerdo con la **Tabla 17** la temperatura interna promedio de CPBAT fue de 23,7 °C, mientras que CPLA y CCON presentaron ambos una temperatura promedio de 23,6 °C. Los tres sistemas reportaron una desviación estándar de $\pm 1,9$ °C. Las temperaturas internas máximas registradas durante todo el proceso de compostaje para CPLA, CPBAT y CCON corresponden a 26,3, 27,8 y 27,3 °C, respectivamente. Mientras que las temperaturas mínimas corresponden a 18,3, 18,7 y 19,0 °C, respectivamente. A excepción de estas últimas, las temperaturas internas máximas y el promedio se mantuvieron en el rango que especifica la norma **AS-5810:2010** de 25 ± 5 °C. La temperatura mínima de compostaje según la norma debe ser 20 °C, si bien no se cumple con esta condición, la temperatura promedio si se mantiene dentro del rango, la diferencia obtenida es de 2°C por debajo de la temperatura indicada por la norma.

Teóricamente la fase mesófila del proceso de compostaje debe ser menor a los 45 °C para posteriormente iniciar la fase termófila, donde se produce la degradación de fuentes más complejas de carbono como celulosa y lignina [71]. Sin embargo, las temperaturas internas reportadas para los tres tratamientos en las cajas no se acercan a 45 °C. Por las condiciones en las que se estableció el experimento no se alcanzaron temperaturas elevadas que favorecieran el proceso de compostaje.

Otro aspecto importante de mencionar es la variación entre la temperatura ambiente y temperatura interna de cada sistema de compostaje. Los datos obtenidos destacan que para la mayoría de los días de medición, la temperatura ambiente fue superior a la registrada dentro de los sistemas de compostaje. La temperatura ambiente promedio fue de $28,0 \pm 3,0$ °C, y se mantuvo en un rango de temperatura entre 21,6 a 34,3 °C.

Un detalle importante es que el sensor de temperatura del cual se extrajeron estos datos adicionalmente recopiló la temperatura durante 24 horas para todo el periodo de medición. La temperatura promedio corresponde a $19,3 \pm 1,0$ °C durante la noche y la madrugada (6:00 p.m. a 5:00 a.m.). Según el comportamiento de los datos anteriores, donde la temperatura interna de cada reactor se mantuvo por debajo del ambiente (28 °C) durante el día es muy probable que la temperatura interna de los reactores se mantuvo inferior a 19,3 °C durante el periodo nocturno. Si bien, este supuesto incumple con el rango de 20 a 30 °C que indica la norma, la presente investigación busca mantener condiciones de compostaje lo más reales posibles y monitorearlas constantemente.

El análisis estadístico determinó que, entre los tres sistemas evaluados, el 85,2% de los casos no presentaron diferencias significativas, considerando los días de medición por separado. El 14,8% de los casos si presentaron diferencias en las temperaturas. Estos resultados indican que la incorporación del bioplástico en el reactor no afectó directamente la temperatura de compostaje.

5.2.1.1.2. Reactores rotatorios (RR)

Los reactores de compostaje rotatorios, RPLA, RPBAT y el control (RCON) presentaron temperaturas internas de compostaje mayores a los sistemas RC. Además, entre los tres sistemas se encontró que para cada día de medición en el 98,4 % de los casos no presenta diferencias significativas. El 1,6 % presentaron diferencias en las temperaturas para cada día de medición.

Los tres sistemas de compostaje presentaron temperaturas mayores a 37 °C durante los primeros 16 días del proceso (**Figura 30**). La temperatura máxima alcanzada para RPLA, RPBAT y RCON fue de 55,3, 56,7 y 56,0 °C, respectivamente (**Tabla 17**). Estas temperaturas elevadas, son idóneas para el proceso de compostaje. La fase mesófila I es la primera del proceso, esta se da de 2 a 5 días después de iniciado el proceso de compostaje, y puede alcanzar una temperatura de 45 °C en horas, que se debe a la descomposición sencilla de fuentes de carbono y nitrógeno [71]. Las temperaturas mayores a 45 °C implican que se alcanzó la fase termófila, En esta fase se descomponen las fuentes de carbono por

medio de bacterias termófilas y se da de 1-3 semanas después de iniciado el proceso de compostaje [71]. En el caso de los resultados mostrados, se puede determinar que esta fase termófila va desde los 2 hasta ~16 días, lo cual se mantiene dentro del rango antes mencionado de 1 a 3 semanas. Una vez transcurridos 16 días es probable que la materia orgánica disponible para los microorganismos se agotará fácilmente y por ende se dio un descenso en las temperaturas [146].

Las temperaturas altas durante la fase termófila hicieron que el bioplástico de PLA presentara una desintegración mayor, ya que se observó la fragmentación en trozos más pequeños. El RPBAT si bien no tuvo el mismo comportamiento que el PLA, presentó un cambio en la opacidad del material. El material fue disminuyendo su brillo, lo que es un indicativo que el pigmento que recubre el material no tolera estas temperaturas. Para compostaje en general se ha establecido que es ideal mantener temperaturas entre 54 y 60 °C [147], que son temperaturas que se alcanzaron durante el periodo termófilo.

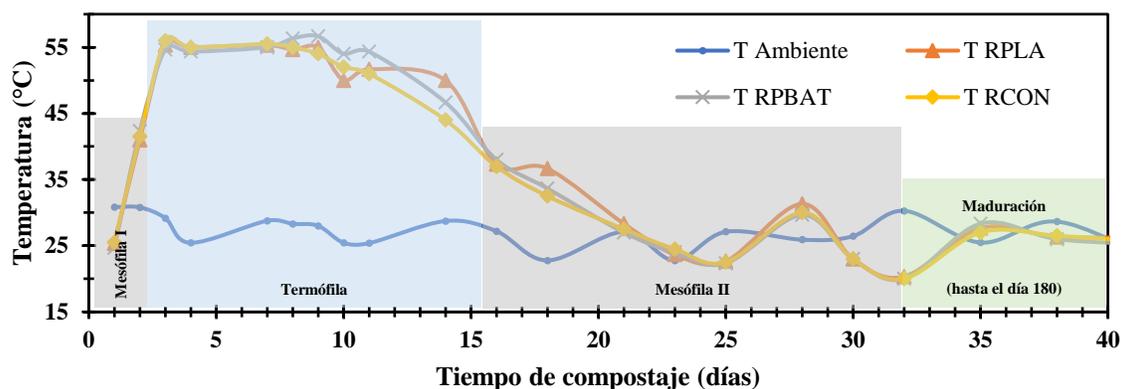


Figura 30. Temperatura interna (°C) de los sistemas de compostaje RPLA, RPBAT y RCON, señalando las fases principales del proceso de compostaje.

La siguiente fase de enfriamiento o mesófila II debería de estar en un rango de 2 a 5 semanas [71]. En este caso, se puede observar que es de ~17 días, ya que las temperaturas descienden por debajo de los 40 °C. Debajo de esta temperatura el pH disminuye y la actividad de los organismos mesófilos se reactiva [71]. Seguido de esta fase, inicia la fase de maduración del compost, ya que luego de las altas temperaturas, las temperaturas

internas en los tres sistemas disminuyeron considerablemente y se mantuvieron a ~ 25 °C. Este comportamiento provocó que el proceso de desintegración y biodegradación de los bioplásticos se detuviera. Sin embargo, al finalizar el proceso se obtuvo evidencia de que el material se desintegró mediante el compostaje en las composteras rotatorias.

5.2.1.2. Control de masa y contenido de humedad

El control de masa se llevó en los reactores tipo caja, siguiendo los procedimientos de adición de agua que dicta la norma **UNE-EN ISO 20200:2015**. Por su parte, para las composteras rotatorias no se llevó el control de masas según la norma, debido a la cantidad de residuo sintético presente en cada una de las repeticiones. Pero se realizó el registró de la masa cuantificando la diferencia entre el valor inicial y el valor de esta al final del proceso de compostaje. Sin embargo, en las composteras rotatorias se llevó un control semanal del contenido de humedad del compost, este sirvió como un indicativo para comprobar que el contenido de humedad se aproximó a $\sim 55,0$ %.

5.2.1.2.1. Reactores tipo caja (RC)

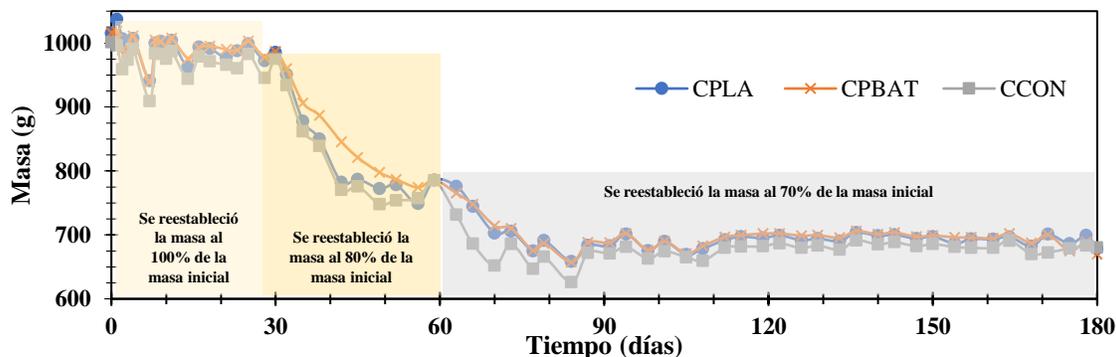


Figura 31. La masa (g) del residuo sintético en reactores tipo caja durante 180 días de duración del proceso de compostaje.

El comportamiento de la masa de residuo sintético (RS) se muestra en la **Figura 31**. Se muestra la variación de masa para CPLA, CPBAT y CCON. Los valores reportados de cada sistema corresponden al promedio de las repeticiones de cada uno. El valor inicial de la masa se reestableció con agua hasta obtener un 100% durante 28 días, a un 80 % de 30 a 60 días y finalmente un 70% luego de 60 días de compostaje.

La gráfica de la **Figura 31** tiene un comportamiento descendente. Este se puede atribuir a la pérdida de humedad del RS durante el compostaje. Las 3 gráficas presentan un comportamiento similar y consistente versus el tiempo. No existió una pérdida de agua significativa entre los días de medición, por lo que la disminución de un día a otro es producto de la evaporación por las condiciones ambientales.

5.2.1.2.2. Reactores tipo rotatorios (RR)

El contenido de humedad (%) para los tres tratamientos se mantuvo en el rango de 45 a 65 % como lo muestra la **Figura 32**. Se puede observar cómo los datos oscilan entre los valores extremos durante los 180 días de compostaje. Hay que tener en cuenta que las mediciones no se realizaron a diario, esto puede explicar las oscilaciones en el porcentaje de humedad entre los días de medición.

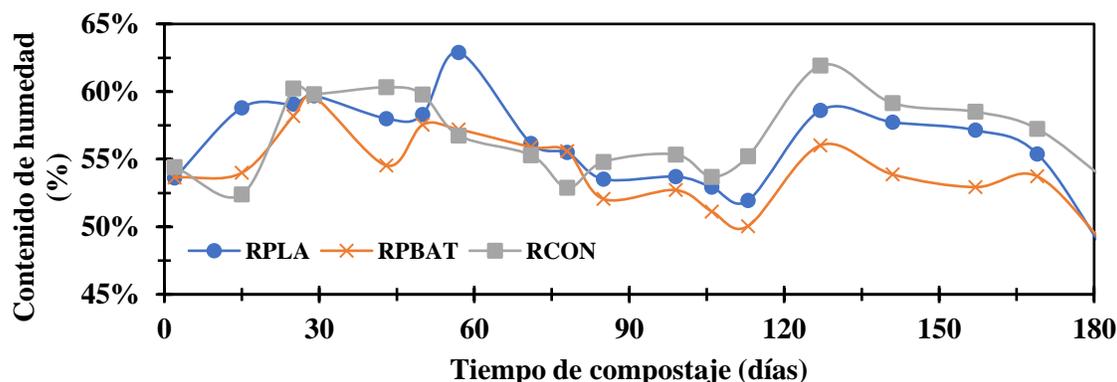


Figura 32. Contenido de humedad (%) del residuo sintético en reactores rotatorios durante 180 días de duración del proceso de compostaje.

Los RR presentaron una pérdida de masa considerable al final del proceso de compostaje respecto a la masa inicial total que corresponde a 18,3 kg colocada en el interior de la compostera. La masa de los reactores con RPLA disminuyó $70,5 \pm 8,5$ %, mientras que la masa de los RPBAT disminuyó $60,8 \pm 1,4$ %. La masa de los RCON se redujo $73,7 \pm 4,4$ %. La reducción en la masa al finalizar el proceso se da por pérdida de humedad del RS. Además, es importante señalar que mientras se llevaba a cabo el proceso de volteo de las composteras rotatorias se perdía algún porcentaje de material que en apariencia se notaba

más seco que el resto del material. Esta pérdida de material es debida a los orificios de aireación que contenían las composteras rotatorias.

5.2.1.3. Sólidos volátiles

El contenido de sólidos volátiles o específicamente la disminución en el contenido de sólidos volátiles (R) fue analizada y los resultados se muestran en la **Figura 33**. Los valores mostrados son el promedio de las repeticiones de cada tratamiento. El principal punto que se debe cumplir es que el valor de R que depende del RS inicial y el compost al finalizar el proceso de compostaje sea superior al 30 % [66]. En todos los casos se cumplió superar este valor, siendo los tratamientos de RR los que tienen un mayor aumento del valor de R, superiores al 70 %. Mientras que los valores de los tratamientos en RC se encuentran cercanos a 43 %. Si bien un sistema de compostaje es superior al otro, ambos cumplieron con la condición mínima que pide la norma **UNE-EN ISO 20200:2015**, para la validación del ensayo de compostaje.

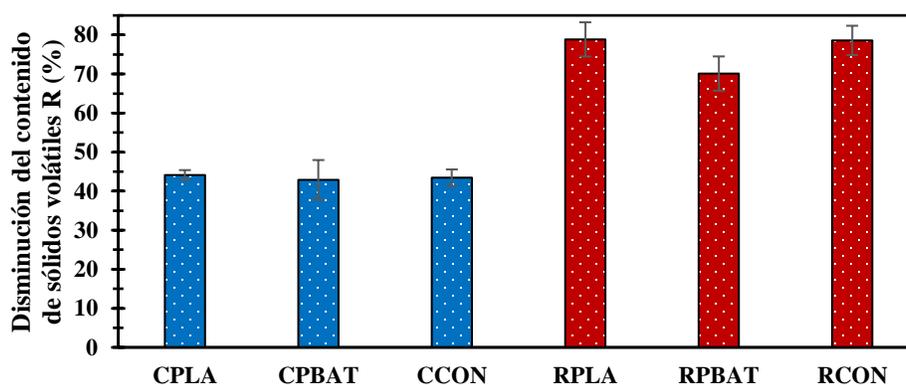


Figura 33. Disminución (R) del contenido de sólidos volátiles para los tratamientos de compostaje en RC y RR con y sin adición de bioplásticos.

Esta disminución implica un menor contenido de sólidos volátiles al finalizar el proceso de compostaje. Esta pérdida implica cuánta materia orgánica se ha convertido durante el compostaje y que se puede tomar como un parámetro para medir la estabilidad del compost [148]. Lo que quiere decir es que el proceso de descomposición de la materia orgánica presente en la muestra está avanzado. Entonces el sistema de compostaje en RR presenta mayor disminución de R y por ende la mayor parte de la materia orgánica se descompuso.

Se podría afirmar que en ambos casos se dio la transformación esperada durante el proceso y que las RR favorecen la descomposición de la materia orgánica tanto en términos de la masa transformada como en el tiempo que ocurren los cambios.

5.2.2. Análisis químico completo del residuo sintético utilizado para el compostaje de bioplásticos

El análisis químico del residuo sintético o compost generado es importante conocerlo para determinar cómo está formado el compost y la concentración de los elementos presentes. Este resultado brinda la información para conocer la capacidad del uso del suelo y brindar los nutrientes adecuados para el desarrollo de las plantas. Además, realizar este tipo de análisis químico permite identificar si alguno de los parámetros determinados es un contaminante que disminuye la calidad final del compost. La **Tabla 18** muestra el análisis químico completo. Esta tabla también muestra las comparaciones estadísticas realizadas por separado para el RS obtenido de los reactores en la caja y el RS de los reactores en composteras rotatorias.

5.2.2.1. Residuo sintético en RC

Los resultados obtenidos del análisis estadístico revelan que cada parámetro del residuo sintético en cajas no presenta diferencias significativas entre CPLA, CPBAT y CCON. Esto es un indicativo de que la adición de bioplásticos en los RC no tuvo un efecto importante en los parámetros finales del compost. Como se había analizado anteriormente, la desintegración obtenida fue baja en el compostaje tipo caja. Por lo tanto, los componentes de los bioplásticos integrados al compost no son suficientes como para cambiar los parámetros que caracterizaron el compost al inicio del experimento. Lo que quiere decir es que hay una incorporación muy baja de los bioplásticos con el RS que modifique los parámetros químicos de CPLA y CPBAT respecto a CCON.

Además, es importante analizar como variaron estos tres tratamientos en cajas respecto a las muestras analizadas químicamente antes de iniciar el proceso de compostaje. Este dato inicial no contenía la adición de ningún bioplástico y es considerado como la muestra pura de RS. Un parámetro que al inicio fue necesario cumplir para iniciar el ensayo es la

relación C/N, se observa que en CPLA, CPBAT y CCON este valor se mantuvo similar a la inicial de 20,4. Según el Manual de compostaje del Agricultor desarrollado por la FAO se indica que para un compost maduro (3 a 6 meses) esta relación C/N debe ser entre 10:1 y 15:1 [71]. Las fases mesofílica y termófila del compostaje en cajas no mostraron el comportamiento ideal. Este resultado podría tener como consecuencia que los compost no alcanzaran la relación C/N según la literatura consultada.

Los parámetros del pH, el porcentaje de carbono, la materia orgánica (MO) y el nitrógeno presentaron una disminución. En cuanto al pH, lo ideal es que se mantenga en un rango entre 6,5 y 8,5 al finalizar los 6 meses [71]. Sin embargo, los valores para los tres tratamientos se aproximan a 4,7. En cuanto a la reducción de MO y el nitrógeno respecto a la muestra inicial, estos deberían ser mayores a 20 % y menores a 1%, respectivamente después de 6 meses. La MO está por encima del 50 % en los tres tratamientos en cajas, por lo cual cumple con el mínimo de 20 %. El nitrógeno en los tres tratamientos en cajas es ~2% y presenta una disminución de ~0,2% respecto al valor inicial.

El resto de los parámetros en CPLA, CPBAT y CCON presentaron un aumento luego del proceso de compostaje, siendo en todos los casos más del doble de los valores que contenía la muestra pura al iniciar el proceso. Los elementos que aumentaron respecto a su concentración inicial son el fósforo, magnesio (Mg), potasio, azufre (S), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), conductividad eléctrica, calcio (Ca) y hierro (Fe).

5.2.2.2. *Residuo sintético en RR*

El análisis estadístico obtenido para el residuo sintético en RR muestra que la mayoría de los parámetros analizados no presentan diferencias significativas entre RPLA, RPBAT y RCON (**Tabla 18**). Sin embargo, cuatro parámetros sí presentan una diferencia entre los tratamientos, estos son el P, B, Ca y la conductividad eléctrica (CE). La concentración de P presenta una diferencia entre el RPLA y RPBAT. Estos dos tratamientos no presentan diferencias respecto a RCON. Los parámetros B, Ca y CE presentan diferencias entre RPBAT y RCON, sin embargo, no se determinaron diferencias entre RPLA y RCON.

Además, las concentraciones de B y Ca son diferentes entre los dos bioplásticos (RPLA y RPBAT).

Los resultados de la **Tabla 18** muestran que los parámetros analizados luego del proceso de compostaje en RR presentaron diferencias respecto a la muestra analizada antes de iniciar el proceso. Se determinó que el carbono y la materia orgánica disminuyeron. Estos resultados coinciden con los resultados observados para el caso de los RC. Además, la relación C/N disminuyó a ~18:1, siendo más cercano al rango recomendado por la FAO de 10:1 a 15:1 a los 6 meses de compostaje [71]. Lo cual sugiere que en los RR la presencia de la fases mesófilas y termófilas implica la reducción de esta relación. Además, se determinó que el pH aumentó a 7,0 para RPLA y RPBAT, con lo cual se ajusta al rango según la FAO de 6,5 a 8,5. Para RCON, el pH se mantuvo en 6,4 igual al valor de la muestra pura, este valor se acerca al rango óptimo.

Por otra parte, se determinó que los elementos P, Mg, K, S, Cu, Zn, Mn, B, Ca y Fe aumentaron en los tratamientos RPLA, RPBAT y RCON, al finalizar el proceso de compostaje, con respecto al análisis realizado antes de iniciar el proceso. Mientras que el nitrógeno se mantuvo igual para los RR, presentando ~2% en los tres tratamientos, la FAO sugiere un rango de 0,3 a 1,5 % [71]. Estos valores superan el valor máximo (1,5 %) en 0,5%.

5.2.2.3. *Comparación de los resultados del análisis químico de RS por bioplástico*

El análisis estadístico que se realizó con los datos de la **Tabla 18** también incluyó una comparación por tipo de bioplástico. Este análisis consideró dos comparaciones, agrupando los datos de RC con los de RR según el tipo de bioplástico. Esto quiere decir que los datos de RS del CPLA se compararon con los de RPLA y los datos de CPBAT se compararon con los de RPBAT. Para efectos del presente estudio es importante conocer si el tipo de sistema de compostaje tiene influencia sobre las propiedades finales del RS producido con cada tipo de bioplástico.

Tabla 18. Análisis químico completo del residuo sintético en RC y RR.

Parámetro	Unidades	Antes de compostar	Residuo sintético en RC ²			Residuo sintético en RR ²		
			CPLA	CPBAT	CCON	RPLA	RPBAT	RCON
CH	%	55,1±0,1	64,6±0,6 ^a	60±2,1 ^a	61,5±2,1 ^a	56,8±2,6 ^a	56,6±5,5 ^a	57,9±2,5 ^a
pH	H ₂ O	6,4±0,1	4,8±0,1 ^a	4,6±0,1 ^a	4,6±0,2 ^a	7,0±0,3 ^a	7,7±0,1 ^a	6,4±0,5 ^a
C	%	43,6±0,2	38,9±0,5 ^a	37,0±0,8 ^a	38,9±0,4 ^a	40±1,1 ^a	38,9±0,9 ^a	39,1±0,2 ^a
MO	%	62,3±0,2	55,7±0,7 ^a	52,9±1,2 ^a	55,6±0,6 ^a	57,3±1,6 ^a	55,7±1,3 ^a	55,9±0,3 ^a
C/N	-	20,4±0,4	20,5±0,5 ^a	19,4±0,5 ^a	20,1±0,6 ^a	18,5±0,5 ^a	17,5±1,1 ^a	18,8±0,1 ^a
P	% masa	0,3±0,0	0,4±0 ^a	0,4±0,0 ^a	0,4±0,0 ^a	0,4±0,0 ^a	0,5±0,0 ^b	0,4±0 ^{a, b}
Mg	% masa	0,1±0,0	0,2±0 ^a	0,2±0,0 ^a	0,2±0,0 ^a	0,3±0,0 ^a	0,3±0,0 ^a	0,3±0 ^a
K	% masa	0,4±0,0	0,9±0 ^a	0,9±0,0 ^a	0,9±0,0 ^a	1,0±0,1 ^a	1,2±0,1 ^a	1,1±0 ^a
S	% masa	0,1±0,0	0,2±0 ^a	0,2±0,0 ^a	0,2±0,0 ^a	0,2±0,0 ^a	0,3±0,0 ^a	0,3±0 ^a
Cu	mg/kg	23,5±0,7	51,7±2,1 ^a	54,0±1,0 ^a	54,3±0,6 ^a	72,7±8,1 ^a	82,0±18,3 ^a	61,5±0,7 ^a
Zn	mg/kg	89,0±4,2	187,7±5,5 ^a	199,3±9,2 ^a	217,0±40,7 ^a	230,7±8,1 ^a	228,7±6,4 ^a	260±14,1 ^a
Mn	mg/kg	125,5±16,3	306±73,4 ^a	274,7±4,2 ^a	276,0±8,7 ^a	300,0±10,4 ^a	334,0±8,7 ^a	323,5±10,6 ^a
B	mg/kg	7,5±0,7	17,3±1,2 ^a	18,0±0,0 ^a	17,3±1,2 ^a	18,0±0,0 ^a	21,7±1,5 ^b	18±0 ^a
CE ¹	mS/cm	3,4±0,1	9,7±0,5 ^a	10,2±0,4 ^a	10,4±0,2 ^a	3,5±1,3 ^{a, b}	2,4±0,3 ^a	5,2±1,4 ^b
N ¹	% masa	2,1±0,1	1,9±0 ^a	1,9±0,1 ^a	1,9±0,0 ^a	2,2±0,0 ^a	2,2±0,1 ^a	2,1±0 ^a
Ca ¹	% masa	0,4±0,0	1±0,1 ^a	1,0±0,0 ^a	1,0±0,0 ^a	1,2±0,1 ^a	1,4±0,1 ^b	1,2±0 ^a
Fe ¹	mg/kg	3887±301	10668±595 ^a	11374±475 ^a	11483±544 ^a	10979±703 ^a	12031±292 ^a	11706±1060,7 ^a

¹ Se aplicó análisis estadístico ANOVA por ser datos que presentaron normalidad. Parámetros sin subíndice se realizó el análisis por medio de prueba de Kruskal Wallis para datos no paramétricos.

² Letras iguales en la misma fila (cada parámetro) y por tipo de reactor de compostaje (RC y RR) indican que no existen diferencias significativas entre los datos.

El análisis estadístico correspondiente a esta sección no se muestra en la **Tabla 18**. Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos se podría afirmar que los datos de PLA reflejaron que existían diferencias significativas entre los datos de CPLA y RPLA en siete de los 17 parámetros analizados. Por su parte, los resultados de PBAT en RC y RR presentaron diferencias significativas en 11 de los 17 parámetros analizados.

Los macronutrientes N y K presentaron diferencias significativas tanto para PLA y PBAT en los dos sistemas de compostaje. La concentración de N es de 1,90 % en CPLA y de 2,16 % en RPLA. Por su parte, la concentración de K es de 0,90 % en CPLA y de 0,98 % en RPLA. En el caso de los sistemas con PBAT se reporta un contenido de N de 1,9 % para CPBAT y de 2,2 % para RPBAT, mientras que, en el caso del K, se reportan valores de 0,9 % en CPBAT y de 1,2 % en RPBAT. El fósforo únicamente presentó diferencias significativas para los sistemas que contenían residuos de PBAT; siendo de 0,41 % en CPBAT y de 0,47 % en RPBAT.

La FAO recomienda los rangos según cada elemento, N (0,3 – 1,5 %), P (0,1 – 1,0%) y K (0,3 – 1,0 %) [71]. De las comparaciones realizadas se puede observar que los tratamientos con PLA tanto en RC como en RR se supera el máximo permitido de N. Mientras que P tanto para la comparación de CPLA con RPLA y CPBAT con RPBAT están dentro del rango dado, ya que son menores a 1,0 %. Lo mismo sucede con K, donde, CPLA, RPLA y CPBAT cumplen y están muy cercanos al límite máximo de 1,0 %. Únicamente el RPBAT excede el valor máximo de K, ya que es 0,2 % superior al máximo.

En cuanto a los elementos menores Ca, Cu y Mg, el análisis estadístico demostró que hay diferencias significativas entre ambos sistemas de compostaje. Por su parte, S y B solo presentaron diferencias significativas entre CPBAT y RPBAT. Los otros elementos menores, Fe, Mn y Zn no presentaron diferencias significativas entre CPLA con RPLA ni entre CPBAT con RPBAT.

Los parámetros de la conductividad eléctrica y la relación C/N presentaron diferencias significativas según el material de empaque. La relación C/N en compost producido en RPLA bajó a 18,5; mientras que en CPLA el valor fue de 20,5. En el caso de los sistemas

con PBAT, el CPBAT tiene una relación C/N de 19,4 mientras que en el RPBAT la relación es de 17,5.

Finalmente, para el pH del PBAT y PLA en RC y RR se encontraron diferencias significativas. El tratamiento de CPBAT tuvo valor promedio de 4,6 que implica mayor acidez en el RS final; mientras que el valor final en RPBAT es de 7,7, cercano a un valor neutro. El pH reportado en el sistema de CPLA fue de 4,8; mientras que el sistema RPLA reportó en promedio un valor neutro de 7,0.

5.2.2.4. Clasificación final del compost obtenido de los sistemas de compostaje.

Luego del análisis químico completo del compost obtenido de los dos polímeros en estudio, se puede realizar una clasificación final del mismo. Para esto se tomaron los parámetros señalados en el **RTCR 485:2016**. “*Sustancias químicas. fertilizantes y enmiendas para uso agrícola. Tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos y contaminantes.*” [149]. Además, se consultó la clasificación sugerida por la norma chilena **NCh2880** “*Compost – Clasificación y requisitos*” [68] para algunos de los parámetros analizados.

La clasificación se debe hacer de acuerdo con el **RTCR 485:2016** que incluye el compost entre las enmiendas orgánicas. La clasificación se muestra en la **Tabla 19** y en esta se pueden apreciar los valores que se deben reportar de los macronutrientes (N, P y K) y de los micronutrientes (Ca, Mg, S). La clasificación es la misma para RC según la Tabla 2. En caso de que este compost se comercializara, su clasificación es la misma para ambos residuos de materiales de empaque (PLA o PBAT) y comercialmente se podría vender igual.

Tabla 19. Clasificación final del compost obtenido de los dos sistemas de compostaje según el RTCR 485:2016.

Sistema	Elemento					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Cajas (CPLA, CPBAT, CCON)	8%	1,5%	4%	4%	0,5%	0,5%
Rotatorias (RPLA y RCON)	10%	1,5%	4%	5%	0,5%	0,5%
Rotatorias (RPBAT)	10%	1,5%	6%	6%	0,5%	0,5%

Los componentes P, Mg y S reportan los mismos resultados en el compost obtenido con PLA, PBAT y el control. La diferencia radica en la concentración final con la que hay que reportar el contenido de N, K y Ca. Esta diferencia es 2% en N y K y 1 % en Ca, por lo que se puede interpretar que las concentraciones se reportan de la misma manera según el mismo análisis en base al reglamento tomado como referencia.

La norma chilena categoriza un compost de acuerdo con la concentración de ciertos elementos en *Clase A* o *Clase B* [68]. El primero (*Clase A*) es un producto de alto nivel que cumple las exigencias de la norma, mientras que el segundo (*Clase B*) es un producto de nivel intermedio [68]. Los parámetros que se pueden determinar mediante esta clasificación son la relación C/N, la cantidad de Cu y Zn (mg/kg) y la conductividad eléctrica.

En cuanto a la relación C/N y el contenido de cobre, todos los tratamientos tanto de RC como de RR se clasifican como *Clase A*. Esto porque no sobrepasan el máximo permitido, en el caso de C/N es 25:1 y del Cu es de 100 mg/kg máximo. Todos los tratamientos cumplieron con estos parámetros.

La clasificación para el contenido de Zn varió en los sistemas estudiados. Los sistemas CPLA y CPBAT son *Clase A* ya que la concentración es menor a 200 mg/kg. Los sistemas de RR y CCON se clasificaron como *clase B* por ser mayores a 200 mg/kg y estar por debajo del máximo tolerado de 2000 mg/kg.

Otra clasificación que se puede obtener es según la conductividad eléctrica del compost. Los tratamientos de RC se clasifican como *Clase B* por estar en un rango entre 3 y 8 mS/cm. El compost obtenido de los RR también se clasificó como *Clase B* para RPLA y RCON. Únicamente el compost resultante de RPBAT reporta una CE de 2,4 mS/cm que está por debajo del límite permitido de 3 mS/cm.

De la misma norma también se extrajo que el compostaje en RR cumple con el rango de pH permitido [5 – 8,5]. Mientras que en el compostaje de RC es inferior a 5. Finalmente, todos los tratamientos (RC y RR) cumplen con el contenido mínimo de 20 % de materia orgánica. Este mismo resultado se había confirmado previamente con la información extraída de la FAO [71].

5.3. Análisis de la ecotoxicidad del compost resultante con la adición de bioplásticos

Finalizado el proceso de compostaje se analizó si la adición de bioplásticos al inicio del proceso de compostaje tiene efecto en el crecimiento de las plantas de lechuga y cebolla cultivadas en el compost resultante. Este apartado incluye información sobre las condiciones de temperatura y humedad a las cuales se desarrollaron las plantas con el compost resultante de la degradación de los bioplásticos. Además, se analiza la germinación, el crecimiento de las plántulas y la biomasa obtenida. La recolección de datos para este análisis tuvo una duración de 21 días luego de germinado el 50 % de los controles que fueron cultivados en tierra comercial (TC), de acuerdo con el **OECD 208** [120].

5.3.1. Variación de temperatura y humedad relativa

Se realizaron dos ensayos, el primero EE-RC evaluó el CF obtenido de los reactores tipo caja con PLA, PBAT y el control, este último sin la adición de los bioplásticos. Posteriormente, se efectuó el ensayo EE-RR con el CF de los reactores rotatorios, con una duración total de 31 y 33 días, respectivamente. Se llevó un registro de la temperatura y humedad relativa (HR) dentro del invernadero donde se ubicaron las plántulas de lechuga y cebolla.

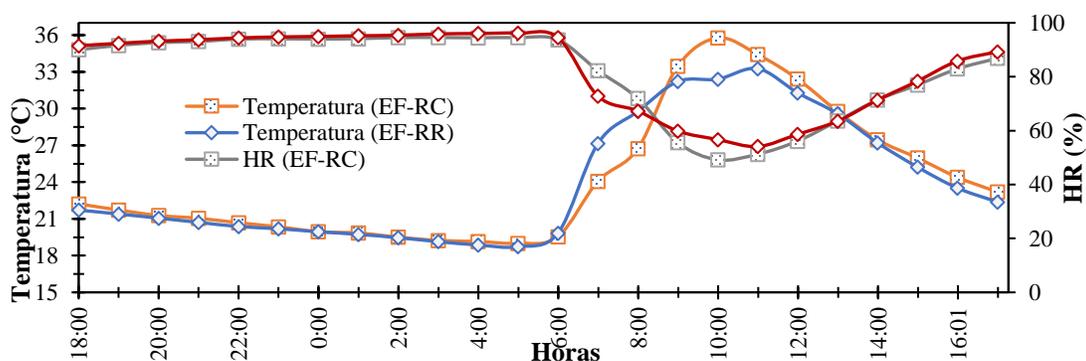


Figura 34. Temperatura y HR promedio en el invernadero registradas durante los ensayos de germinación y el desarrollo de las plántulas de lechuga y cebolla.

El promedio de la temperatura y humedad relativa se calculó para cada hora del día en ambos ensayos. Los promedios obtenidos se muestran en la **Figura 34**, donde se puede observar la variación de temperatura y HR durante 24 h. El promedio del comportamiento de ambas variables permite comprender las condiciones ambientales a las que se desarrollaron los ensayos de germinación y crecimiento de ambas plantas durante ambos experimentos.

5.3.1.1. Temperatura

El **OECD 208** establece las condiciones adecuadas para el crecimiento de varias plantas, entre estas se mencionan la lechuga y cebolla. Indica que la temperatura ideal de crecimiento debe estar en un rango entre 22 y 28 °C durante el día [120]. Al analizar el comportamiento de los datos de temperatura diurna (6:00 a 18:00) registrados por el sensor, para EE-RC un 38,2 % se encuentran dentro de este rango, mientras que para EE-RR un 38,7 %. El rango real en el que oscilaron los valores de EE-RC es de 17,8 a 47,7 °C, mientras que EE-RR entre 18,3 y 42,7 °C. Los valores de temperatura más elevados se deben a la incidencia directa de la radiación solar. Si bien el invernadero debería de reducir esta incidencia, este propicia un ambiente interno con una temperatura superior a la del exterior.

El 46,2 % de la temperatura interna reportada para EE-RC corresponde a datos superiores a 28 °C, valor máximo indicado en la norma. En el caso de EE-RR este valor es de 44,2 %. Lo que implica que en ambos casos aproximadamente la mitad de los datos de temperatura diurna registrados supera el valor máximo establecido. Estas temperaturas pueden tener un efecto negativo sobre el desarrollo de las plantas de lechuga y cebolla. Además, la ubicación del invernadero permitió que el material plástico del invernadero absorbiera la radiación solar, lo anterior pudo haber incidido sobre el aumento de la temperatura interna del invernadero.

En cuanto a las temperaturas nocturnas (18:00 a 6:00) el **OECD 208** indica que debería mantenerse en un rango de 17 a 23 °C [120]. Para este caso, un 95,7 % de los datos reportados en el ensayo FITO-RC se encontraron en el rango establecido. Un

comportamiento similar presentó los datos recolectados en el EE-RR, el 98,8 % de las temperaturas nocturnas cumplen con lo establecido.

5.3.1.2. *Humedad relativa*

La HR es una variable fundamental que se cuantificó. La **Figura 34** muestra los valores promedio de HR registrados a la misma hora durante el periodo de ejecución de cada ensayo. Los valores mostrados corresponden a datos promedio que reflejan el comportamiento general diario de la HR.

En cuanto a la HR el **OECD 208** establece un rango ideal de 65 a 75 % durante periodos diurnos [120]. El ensayo EE-RC reportó que un 16,5% de los datos se mantienen en este rango. Los restantes datos (40,5 %) se mantienen inferiores a 65 % de HR mientras que el 43,0 % están sobre el 75 % de HR. En cuanto a EE-RR, el 17,2 % de los datos se mantienen en el rango diurno recomendado. Al contrario, un 39,0 % son inferiores a un valor de 65 % de HR y un 43,9 % son superiores al máximo establecido de 75 %. Estos resultados sugieren que para ambos ensayos los valores obtenidos en su mayoría se encuentran fuera del rango recomendado de 70 ± 5 %. Estos resultados de humedad relativa interna del invernadero pueden presentar efectos negativos en la germinación y el crecimiento de las plantas de lechuga y cebolla.

La HR ideal para el desarrollo de las plantas en periodos nocturnos es de 85 a 95 % [120]. Un 39,5 % de los datos de HR de EE-RC se encuentran dentro de este rango, mientras que un 52,2 % son superiores a un 95 % de HR. En cuanto al ensayo EE-RR, el 46,6 % de los datos de la HR reportados están en el rango establecido de 90 ± 5 %; mientras que el 51,7 % son superiores a 95 %. Los resultados de HR en periodos nocturnos reflejan que en su mayoría son superiores a 85 %.

5.3.2. Porcentaje de germinación de las semillas previo a realizar el análisis de ecotoxicidad

Se utilizaron semillas de lechuga y cebolla americanas de la marca *Vigrow Seeds®*, ambas con un 87,0 % de germinación. La prueba de germinación fue realizada en condiciones

controladas y previo al ensayo de ecotoxicidad, se realizaron 4 repeticiones con 105 semillas cada uno, utilizando como sustrato papel toalla. La lechuga americana presentó una germinación de un 88,2 % mientras que la cebolla americana un 81,3 %. Ambos valores son cercanos al porcentaje de germinación indicado por el comerciante.

5.3.3. Análisis de ecotoxicidad en plantas de lechuga cultivadas en tierra comercial y compost de sistemas de compostaje RC y RR

La **Tabla 20** muestra los valores promedio de germinación máxima, longitud de la planta y biomasa producida de la siembra lechuga en un sustrato 100 % tierra comercial (TC).

Tabla 20. Valores promedio de las variables medidas para los tratamientos con siembra de lechuga en 100 % tierra comercial (TC).

Valores promedio de TC	Promedio
Germinación máxima (%)	53,6 ± 9,1
Longitud (cm)	7,8 ± 1,4
Biomasa producida (mg)	133,9 ± 7,2

5.3.3.1. Germinación máxima de lechuga

Los ensayos de ecotoxicidad, EE-RC y EE-RR se llevaron a cabo en dos periodos diferentes. En total se contó con cuatro replicas sembradas de lechuga en 100 % TC, se realizaron dos replicas por ensayo. En total se sembraron 105 semillas por cada replica. El ensayo EE-RC presentó una germinación máxima (GM) de 61,9 y 61,0 % en cada repetición, mientras que los de EE-RR presentaron una GM de 45,7 y 45,7 % en cada repetición. De las cuatro repeticiones se obtuvo una germinación promedio de 53,6 ± 9,1 % que equivalen a 56 ± 10 semillas. Este dato se utilizó como referencia para comparar el rendimiento de la germinación de los restantes tratamientos que consistieron en mezclas de TC y compost sintético.

Al contar con 105 semillas por tratamiento se esperaba que la germinación fuera superior a 88,2 % determinado mediante la prueba previa de germinación. Sin embargo, es probable que las temperaturas discutidas previamente afectaron la germinación. En el caso de la

germinación de la lechuga, esta debe suceder entre 18 a 20 °C [150], [151]. Los valores de temperatura reportados estaban por encima de estos rangos durante los periodos diurnos, lo cual podría haber afectado la germinación.

Otro factor que pudo afectar esta variable es la humedad relativa del ambiente, ya que lo ideal es que la lechuga se mantenga en un rango de 60 a 80 % [150]. En ambos ensayos, los periodos diurnos reportaron una HR cercana a estos valores (**Figura 34**). Sin embargo, la HR durante los periodos nocturnos asciende a ~100 %, lo cual pudo haber incidido sobre la germinación.

Los valores reportados anteriormente de GM no corresponden al último día de medición. Es importante señalar que, en ambos ensayos, todos los tratamientos tuvieron pérdida de plantas por marchitamiento, al finalizar los ensayos. De acuerdo con el **OECD 208**, se debe obtener de 90 a 100 % de germinación en la TC al finalizar el ensayo, sin embargo, al finalizar ambos experimentos se obtuvo en promedio un 37,1 %.

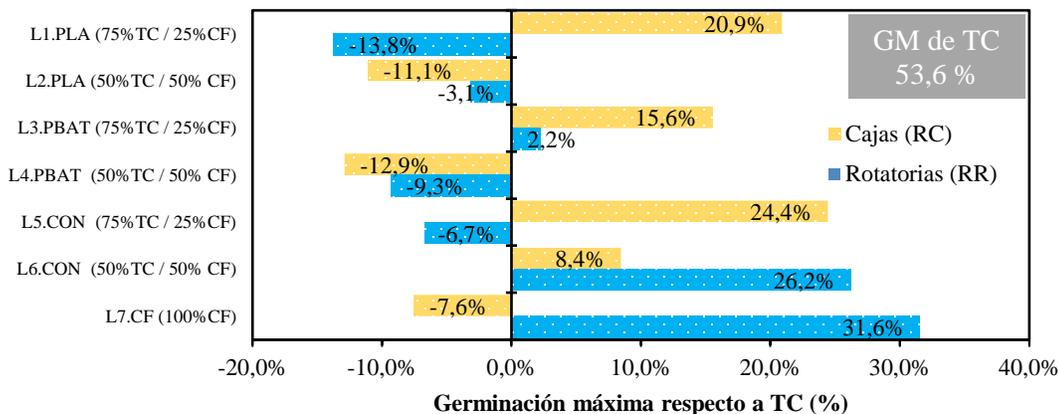


Figura 35. Germinación máxima de las semillas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

Por otra parte, los resultados de los ensayos de ecotoxicidad obtenidos de este estudio se compararon con el valor máximo de semillas germinadas (GM) con respecto al 53,6 % de germinación en el tratamiento 100 % TC. Los resultados se muestran en la **Figura 35**

donde se puede apreciar el aumento o disminución porcentual de la GM de cada tratamiento con el compost final de los sistemas de compostaje RC y RR.

En el sistema de compostaje RC y con la adición de polímeros se determinó que el aumento de compost con bioplásticos (50 % CF) afectan la germinación, ya que en ambos casos disminuyó respecto a TC (11,1 y 12,9%). Los que contienen 25 % de CF presentaron por su parte un aumento en la germinación respecto a TC. Sucedió lo mismo en los controles sin bioplásticos, donde se dio un aumento de la germinación. El tratamiento con 100 % CF presenta una disminución, probablemente porque los nutrientes están en proporciones que perjudican la germinación de lechuga.

Por otra parte, en el sistema de compostaje RR y con la presencia de residuos de bioplásticos los tratamientos presentaron una disminución de la germinación respecto a TC. De estos tratamientos solamente el que contenía CF con PBAT a un 25 % presentó un aumento de 2,2 % sobre TC. Este resultado es similar al obtenido por Torrez quien realizó ensayos de ecotoxicidad en lechuga de un compost producido a escala laboratorio, donde se presentaron disminuciones en las germinaciones máximas de los tratamientos con residuos de BP respecto a 100 % TC [23]. Los tratamientos controles sin bioplásticos presentaron un aumento de la germinación, tanto el que contenía 50 % de CF, como el que contenía 100 % CF. Para este último caso, a diferencia del resultado negativo obtenido para RC se puede afirmar que en RR el uso del CF sin bioplásticos al 100 % favorece las condiciones de germinación. Probablemente, los nutrientes estaban en proporciones que favorecían el proceso.

5.3.3.2. *Longitud de plantas*

Un aspecto para tomar en cuenta es la longitud de las plantas de lechuga al final de los ensayos de ecotoxicidad. Para esto se midió la longitud total de cada planta considerando el largo de la raíz hasta la longitud máxima alcanzada por las hojas. Los resultados se muestran en la **Figura 36**, donde se puede apreciar la longitud de plantas (LP) de lechuga tanto del ensayo realizado con el CF obtenido de las composteras tipo caja y de las rotatorias.

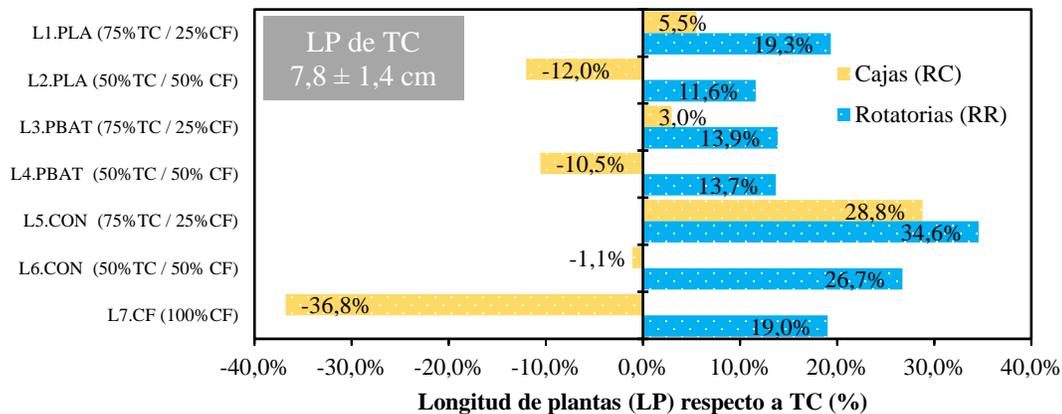


Figura 36. Longitud de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

Todos los tratamientos se compararon con respecto al promedio de las cuatro repeticiones usando TC en los ensayos EE-RC y EE-RR. Se obtuvo de las réplicas con 100 % TC, longitudes de 8,9, 9,1, 6,8 y 6,5 cm. La longitud promedio de los cuatro valores es de $7,8 \pm 1,4$ cm.

La **Figura 36** muestra como los tratamientos que emplearon CF de RC presentan variabilidad y principalmente disminuyeron con respecto a la longitud de 7,8 cm del valor de referencia. Los tratamientos que presentaron un aumento con CF de RC son menores en comparación con los resultados de los ensayos con CF de RR. El tratamiento con 100 % CF sin bioplásticos demuestra que la longitud de plantas de lechugas disminuye respecto al valor de referencia. Esto sugiere que el empleo de sustrato sin BP no asegura un aumento en el crecimiento de las plantas respecto a TC. Esto podría ser una consecuencia de la temperatura, humedad relativa e incidencia de la luz solar que afectaron este crecimiento. En cuanto a los tratamientos de CF con bioplásticos, se observa que los bioplásticos desintegrados tuvieron un efecto negativo mayor que afectó aquellas mezclas con un 50 % de CF (12,0 y 10,5 %).

Los resultados demuestran que los tratamientos que utilizaron CF de RR con o sin BP presentaron un aumento en la longitud de plantas. Esto sugiere que el CF de RR favorece el

crecimiento de las plantas. Además, se puede establecer que en el CF sin BP favorece mayoritariamente el crecimiento de las plantas de lechuga (34,6 y 26,7 %) respecto a TC. En los tratamientos con CF con bioplásticos, el aumento porcentual respecto a TC se da en menor escala. Por lo que el uso de CF de RR con un mayor contenido de bioplásticos desintegrados favorece el crecimiento de las plantas.

5.3.3.3. Biomasa producida

Al finalizar el ensayo de ecotoxicidad es importante conocer cuanta biomasa se produjo de todos los tratamientos estudiados. Se midió el peso fresco, que es la biomasa total (BT) y la biomasa seca (BS). Los resultados de la **Figura 37** muestran únicamente la BS de lechuga obtenida para los diferentes tratamientos. El contenido de humedad en lechugas, obtenido de la diferencia de BT y BS, en su mayoría es superior al 90 % para todos los tratamientos. Esta estimación se aproxima a los valores previamente publicados ya que se ha establecido que la lechuga puede contener un 95,3 % de agua por cada 100 g de porción comestible [152], o bien entre un 90 a 95 % de agua [153].

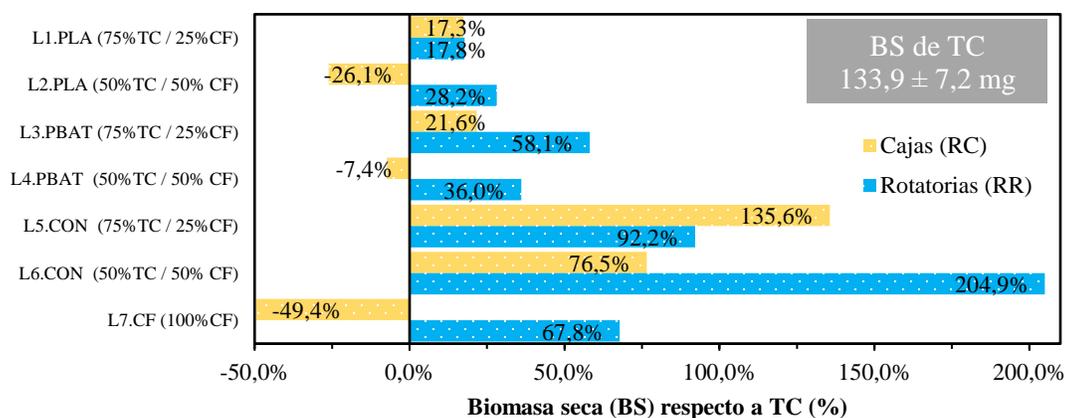


Figura 37. Biomasa seca de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

El punto de referencia se definió como el promedio de la biomasa seca de lechuga obtenida de las cuatro repeticiones con 100 % de TC. Estos valores corresponden a 134,0, 133,4, 142,9 y 125,3 mg. El valor promedio de BS calculado es de 133,9 ±7,2 mg. Este es el

resultado de las semillas plantadas en 100 % TC y contra este se comparan todos los resultados de BS.

La **Figura 37** muestra que los tratamientos que utilizaron CF de RR en sus mezclas presentaron un aumento de la biomasa, independientemente de si contenían bioplásticos. Los tratamientos con BP, a pesar de presentar un aumento de su biomasa, este aumento es menor. Ya que los tratamientos sin bioplásticos presentan los porcentajes más altos de BS, siendo el que contenía 50 % CF sin BP el que mayor aumento presentó, con un 204,9 % más que lo obtenido en TC de 133,9 mg. Esto puede ser un indicativo de que los tratamientos con residuos de bioplásticos afectaron la cantidad de biomasa y por ende se obtienen valores menores.



Figura 38. Biomasa seca de la lechuga obtenida a) 100 % tierra comercial (TC) y b) 100 % CF de RC obtenido sin bioplásticos.

Los tratamientos que utilizaron CF de RC no presentan en su totalidad un aumento respecto a TC. La información generada permite establecer que el aumento de la biomasa de lechuga presenta los mejores resultados en aquellas mezclas que no contenían BP, a excepción del tratamiento que contiene 100 % CF sin BP, que presentó una disminución 49,4 % respecto a TC. Este resultado se puede relacionar con la longitud de planta ya que el mismo tratamiento presentó la menor LP. Lo que implica que la BS producida sea poca. Esta biomasa seca para una de las repeticiones realizadas se observa en la **Figura 38** comparada contra una de las repeticiones con 100 % TC.

Los resultados analizados de germinación máxima, longitud de plantas y biomasa muestran que existe una tendencia entre ellas a aumentar respecto al tratamiento con tierra comercial. Por ejemplo, L3.PBAT en ambos sistemas de compostaje todas las variables aumentaron respecto a TC. Además, L7.C7 con CF de RR también tuvo un aumento para las tres variables estudiadas. A pesar de estos resultados no sería correcto afirmar cual CF de los sistemas de compostaje presenta un mayor rendimiento. Factores externos como la temperatura, humedad relativa e incidencia directa de luz del sol también influyeron sobre el desarrollo del cultivo.

5.3.4. Análisis de ecotoxicidad en plantas de cebolla cultivadas en tierra comercial y compost de sistemas de compostaje RC y RR.

El mismo análisis que se realizó para lechuga, se realizó para el cultivo de cebolla. La **Tabla 21** muestra los valores promedio de germinación máxima, longitud de la planta y biomasa producida para las repeticiones donde se sembró cebolla en un sustrato 100 % tierra comercial (TC).

Tabla 21. Valores promedio de las variables medidas para los tratamientos sembrados con cebolla en 100 % tierra comercial.

Valores promedio de TC	Promedio
Germinación máxima (%)	46,2 ± 9,5
Longitud (cm)	12,5 ± 1,0
Biomasa producida (mg)	104,6 ± 34,4

5.3.4.1. Germinación máxima de cebolla

De ambos ensayos EE-RC y EE-RR se contaba con un total de cuatro replicas sembradas de cebolla en 100 % TC, para cada replica se sembraron 105 semillas. El ensayo EE-RC presentó una germinación máxima (GM) de 47,6 y 59,0 %, mientras que los de EE-RR presentaron una GM de 38,1 y 40,0 %. De las cuatro repeticiones se obtuvo una germinación promedio de 46,2 ± 9,5 % que equivalen a 49 ± 10 semillas. Este dato se utilizó como referencia para comparar el rendimiento de la germinación de los restantes tratamientos.

Una GM de 49 semillas se podría considerar baja ya que es menor al 50 % del total de 105 semillas colocadas en cada tratamiento. Sin embargo, este valor se puede deber a distintas condiciones, por ejemplo, la cebolla se desarrolla adecuadamente en condiciones de baja humedad relativa [154] y para este ensayo durante los periodos nocturnos se reportaron HR de ~100 %. Además, la cebolla puede germinar entre 4 a 35 °C y el crecimiento se da bien entre 14 y 32 °C [155]. De acuerdo con la información del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) el desarrollo del cultivo óptimo se da alrededor de 13 a 14 °C hasta máximas de 30 °C [154]. Las bajas temperaturas no se llegaron a registrar en los sensores, por lo cual es de esperar que la germinación no alcanzara valores elevados. La investigación realizada por Torrez realizó un ensayo de ecotoxicidad en condiciones muy similares a las descritas anteriormente. Torrez, presentó en cebolla una germinación máxima de 49,5 % (52 semillas germinadas) [23], que es muy cercano al valor de 46,2 % obtenido en esta investigación, por lo que las condiciones de humedad relativa, temperatura, entre otras, pudieron afectar la germinación de las semillas de cebolla.

La **Figura 39** muestra los resultados de germinación obtenidos del cultivo de cebolla utilizando el CF de RC y RR. La tendencia es clara, indistintamente del CF que se utilice la germinación de cebolla disminuye respecto a 100 % TC. Analizando por separado, los tratamientos con CF de RC con o sin adición de bioplásticos disminuyeron en su mayoría. Esto puede indicar que el CF obtenido afecta la germinación de semillas en los porcentajes de mezcla utilizados. Además, los tratamientos sin BP presentan la mayor disminución de la germinación respecto al valor de referencia. Sin embargo, no se podría afirmar que los bioplásticos tengan alguna influencia sobre la germinación ya que los resultados de desintegración de los bioplásticos el CF de RC mostraron que no contiene un alto contenido de bioplásticos desintegrados.

Por su parte, el CF de RR también presenta disminución de la germinación en la mayoría de los tratamientos, respecto al valor de referencia. Todos los tratamientos con algún residuo de BP presentan disminución, al igual que el tratamiento con 100 % CF sin BP. Los tratamientos sin BP (C5 y C6) presentan un aumento de la germinación respecto a TC. La

germinación de las plantas de cebolla se pudo ver afectada debido a que el CF de RR tenía mayor presencia de bioplásticos producto de la desintegración del proceso de compostaje.

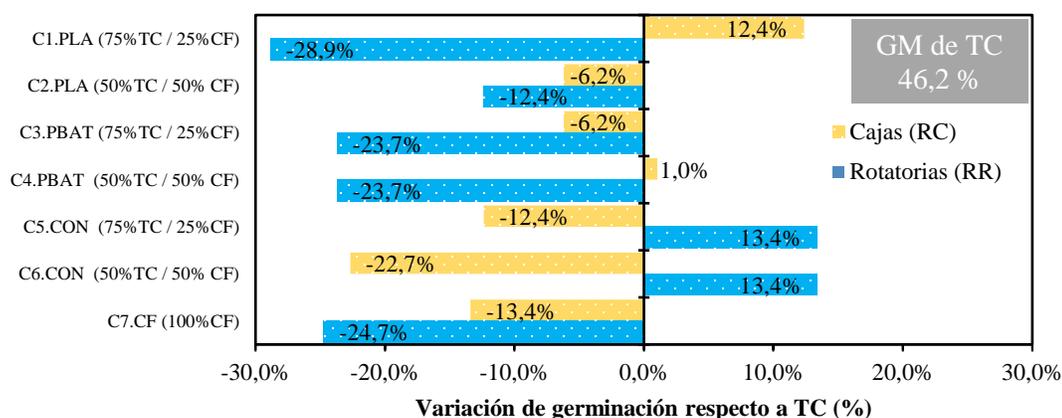


Figura 39. Germinación máxima de las semillas de cebolla resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

5.3.4.2. Longitud de plantas

A partir de las repeticiones de los tratamientos control se obtuvo una longitud de planta (LP) promedio de $12,5 \pm 1,0$ cm. Este valor se utilizó como referencia para hacer una comparación con respecto a las diferentes mezclas (CF y TC) usadas para los tratamientos de siembra de las semillas. La **Figura 40** muestra la diferencia (%) en LP con respecto al valor de referencia. Se puede observar que a excepción de un tratamiento (C3.PBAT), los restantes tratamientos presentaron una disminución en el LP respecto al valor de referencia.

Todos los tratamientos provenientes del uso de CF de RC presentaron un valor menor en un 20 % con respecto a la referencia. No se puede generalizar que para estos tratamientos la disminución en LP se deba a la presencia de bioplásticos, porque tanto los tratamientos con BP como los controles con CF sin BP presentan valores menores en la LP. Además, el CF de RC presenta valores bajos de desintegración, por lo que no se esperaría una cantidad relevante de bioplásticos presentes que pudieran afectar la LP.

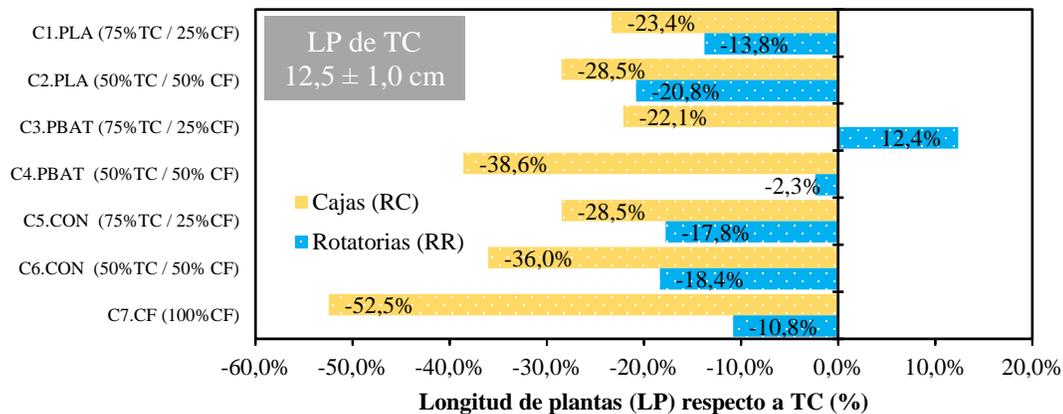


Figura 40. Longitud de plantas de cebolla resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

En cuanto a los tratamientos con CF de RR también se obtiene una disminución respecto a la LP de referencia. Los resultados de desintegración obtenidos previamente establecieron una mayor cantidad de bioplásticos presentes en el CF de RR. Lo cual puede ser un indicativo de la disminución en la LP. Sin embargo, también los tratamientos con CF sin BP mostraron una disminución respecto al valor de referencia, por lo que no es correcto asegurar que la disminución en la LP se deba únicamente a la presencia de bioplásticos.

5.3.4.3. *Biomasa producida*

Se tomó como punto de referencia el valor promedio de las repeticiones realizadas del cultivo de cebolla con 100 % TC obteniendo un valor de $104,6 \pm 34,4$. Los valores de biomasa seca (BS) fueron los seleccionados para realizar esta comparación. La cebolla al igual que la lechuga presentó un contenido de humedad superior al 90 % en todos los tratamientos. Este resultado es acorde con la literatura, ya que se ha encontrado que la cebolla tiene hasta un 93,9 % de agua por cada 100 g de porción comestible [156]. Las comparaciones respecto al valor promedio se muestran en la **Figura 41** tanto para la BS de cebolla obtenida utilizando CF de RC y de RR. La BS obtenida fue menor en la mayoría de los tratamientos con respecto al valor de referencia.

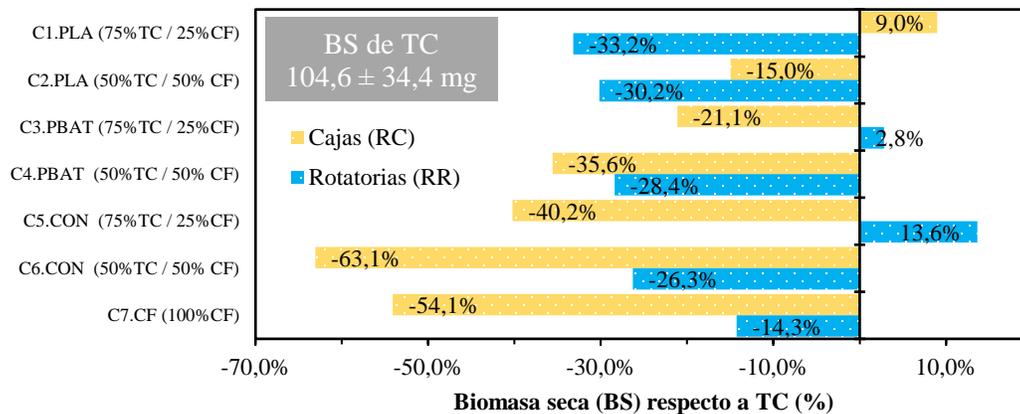


Figura 41. Biomasa seca de plantas de lechuga resultante de los ensayos de ecotoxicidad (RC y RR) con respecto al promedio de la germinación obtenida con 100% de tierra comercial (TC).

Los resultados que utilizan el CF de RC demuestran que en general utilizando CF con o sin bioplásticos, en diferentes porcentajes de mezcla, la BS tiende a disminuir con respecto al valor de referencia. Los tratamientos sin BP presentaron una disminución mayor que los que contenían BP. Sin embargo, nuevamente no se puede afirmar que realmente el CF de RC con bioplásticos tenga un efecto significativo sobre las propiedades de las plantas de cebolla. Ya que la cantidad de bioplásticos presentes es poca debido a la poca desintegración que se dio en ambos.

Por otra parte, los tratamientos con CF de RR también presentaron una disminución, a excepción del CF con PBAT (2,8 %) y de uno de los tratamientos con CF sin BP (13,6 %). De los resultados que presentan disminución, hay una tendencia que implica que aquellos tratamientos que contienen bioplásticos presentan una disminución mayor de BS respecto a los tratamientos sin bioplásticos. Por lo que para el caso de CF de RR la mayor cantidad de bioplásticos presentes en el CF si tuvo efecto sobre la BS obtenida de la cebolla.

Las variables analizadas, germinación máxima, longitud de plantas y biomasa seca producida para cebolla reflejan una tendencia a disminuir con respecto al tratamiento con tierra comercial. Por ejemplo C2.PLA y C7.CF en los tres parámetros estudiados y en

ambos sistemas de compostaje muestran esta disminución respecto a TC. En otros tratamientos el comportamiento es similar, solo pocos casos difieren.

El aporte de los ensayos de ecotoxicidad con lechuga y cebolla, utilizando compost de RC y RR, determina que los resultados de germinación, longitud y biomasa no dependen exclusivamente de los sustratos y bioplásticos. Otras condiciones como las que se muestran en la **Tabla 22**. Principales condiciones que afectaron de manera adicional los ensayos de ecotoxicidad., influyen en este complejo sistema con múltiples variables interactuando.

Tabla 22. Principales condiciones que afectaron de manera adicional los ensayos de ecotoxicidad.

Variable que influyó	Observaciones
Temperatura	Se registraron temperaturas diurnas dentro del invernadero altas en comparación con los rangos recomendados por el OECD en el Anexo 4 [120].
Humedad relativa	Se presentaron HR dentro del invernadero no acordes con los rangos recomendados por el OECD en el Anexo 4 [120]. Principalmente en los periodos diurnos.
Fotoperiodo (cantidad de luz)	El OECD en el Anexo 4 indicaba 16 horas de luz y 8 de oscuridad [120], que por las condiciones climáticas del país es imposible de lograr. Únicamente en condiciones controladas en un laboratorio se podría cumplir con esta condición.
Ubicación del invernadero	La ubicación del invernadero influyó significativamente sobre los parámetros explicados previamente.

6. CONCLUSIONES

1. Se concluye que el compost obtenido de las composteras rotatorias y las altas temperaturas superiores a 50 °C durante las primeras semanas favorecieron la desintegración del PLA de 20 µm utilizado en este estudio (97,54 %) y del PBAT del mismo espesor (46,34 %) en comparación con el PLA de 20 µm (6,07 %) y PBAT de 20 µm (20,58 %) producto del compost obtenido en reactores tipo caja, que no alcanzó temperaturas idóneas de una fase termófila característica de un proceso de compostaje.
2. Al estudiar la degradación desde 25 a 600 °C mediante TGA de los bioplásticos extraídos de los sistemas de compostaje tipo caja y composteras rotatorias, se logró establecer que para el día 180 el PLA presentaba a 300 °C una pérdida de masa de apenas un 15,8 % del PLA obtenido de los reactores tipo caja y de un 93,6 % para el obtenido de las composteras rotatorias. Este mismo comportamiento se repitió a 300 y 350 °C, durante las colectas realizadas de PLA cada 28 días de los dos sistemas de compostaje. Demostrando que el compostaje en composteras rotatorias favorece la biodegradación del PLA de 20 µm de espesor utilizado en este estudio.
3. Los análisis de SEM determinaron que el PLA de 20 µm, expuesto a condiciones de compostaje en rotatorias se caracteriza por la presencia de grietas y agujeros, mientras que el PBAT del mismo espesor y obtenido de composteras rotatorias, se caracteriza por la presencia de agujeros, además que para este último al ser un material rugoso se facilitó el crecimiento de comunidades microbianas en la superficie.
4. Las fases mesófilas y termófilas presentes en el compostaje en composteras rotatorias favorecieron la biodegradación y la desintegración de los bioplásticos de PLA y PBAT. Lo contrario se obtuvo en los reactores tipo caja donde las fases mesófilas y termófilas características de un proceso de compostaje no fueron visibles y esto influyó directamente en la poca desintegración observada en estos reactores.
5. La clasificación final realizada al compost mediante el **RTCR 485:2016** en los tratamientos de RC y RR indican que la clasificación final del compost es de P (1,5 %), Mg y S (0,5 %). Mientras que el compost de RC se debe reportar con un 8% de N, mientras que en rotatorias con un 10 %. Además, se reporta con un 4 % de K para

compost obtenido de cajas y rotatorias con PLA y sin adición de bioplásticos. Mientras que el contenido de K se reporta como 6 % para el compost de rotatorias con PBAT.

6. Las variables de temperatura y humedad relativa reportadas son un factor relevante que podría haber afectado la germinación, el crecimiento y el desarrollo de las plantas de lechuga y cebolla en los ensayos de ecotoxicidad en ambos sistemas de compostaje evaluados utilizando compost con residuos de bioplásticos y tierra comercial.
7. La adición del compost final (CF) de los sistemas de compostaje tipo caja y rotatorias, con y sin la adición de BP tuvo un efecto positivo sobre la biomasa seca producida de lechuga.
8. Las mezclas de sustratos utilizados con el CF de RC y RR con y sin la adición de BP afecta la germinación de las semillas de cebolla ya que la tendencia es que disminuyó respecto a 100 % TC.
9. La biomasa de la cebolla producida presentó una disminución en la mayoría de los tratamientos utilizando CF de RC y RR respecto al valor de 104,6 mg obtenido en 100 % TC. Lo que implica que la adición del compost final de los sistemas de compostaje tipo caja y rotatorias, con y sin la adición de BP tuvo un efecto negativo sobre la biomasa seca generada.

7. RECOMENDACIONES

1. Realizar investigaciones que comparen el residuo sintético con otro tipo de compost para evaluar el grado de desintegración de los bioplásticos en condiciones de compostaje casero.
2. Realizar estudios en esta línea de investigación empleando únicamente composteras rotatorias y eliminar el uso de las cajas.
3. Desarrollar un estudio para identificar si el comportamiento de un bioplástico según su espesor influye directamente en un sistema de compostaje casero. Incluir en este estudio la evaluación de otros materiales disponibles comercialmente para el empaque de alimentos (multicapas, celulosa, PHA, otros).
4. Sustituir las bandejas de germinación por macetas en los ensayos de ecotoxicidad para que todas las plantas tengan una distribución homogénea según la composición de cada tratamiento.
5. Realizar análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM) en la raíz de las plantas posterior a los ensayos de ecotoxicidad, con el fin de evaluar si el empleo de compost con residuos de bioplásticos tiene como consecuencia la presencia de microplásticos en su estructura.
6. Hacer un análisis de comunidades microbianas en diferentes etapas del compostaje para estudiar la interacción entre los microorganismos y bioplásticos (fuente de nutrientes) y determinar su efecto en la biodegradación de los bioplásticos y las propiedades del compost.
7. Establecer en un futuro un protocolo general para el compostaje de bioplásticos en condiciones domésticas que incluya diferentes materiales usados para el empaque de alimentos.
8. Establecer un protocolo que se adapte a un compost casero producido a base de residuos generados en el hogar que podría sustituir el uso de un residuo sintético como lo sugiere la norma **UNE-EN ISO 20200:2015**.

8. REFERENCIAS

-
- [1] A. Hughes, «Building and Constructions Plastic Market – An Analysis», *Reinforced Plastics*, vol. 65, n.º 4, pp. 194-198, jul. 2021, doi: 10.1016/J.REPL.2020.10.001.
- [2] Z. O. G. Schyns y M. P. Shaver, «Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review», *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 42, n.º 3. Wiley-VCH Verlag, 1 de febrero de 2021. doi: 10.1002/marc.202000415.
- [3] European Bioplastics, «Bioplastics Market Development Update 2022», 2022.
- [4] Plastics Europe, «Plastics - the Facts 2022», 2022.
- [5] Heinrich Böll Foundation, *Plastic Atlas Facts and figures about the world of synthetic polymers*, n.º 4. Berlin: Heinrich Böll Foundation, 2021.
- [6] OECD, *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. OECD, 2022. doi: 10.1787/aa1edf33-en.
- [7] I. Rossetti, F. Conte, y G. Ramis, «Kinetic Modelling of Biodegradability Data of Commercial Polymers Obtained under Aerobic Composting Conditions», *Eng*, vol. 2, n.º 1, pp. 54-68, 2021, doi: 10.3390/eng2010005.
- [8] S. Nanda, B. R. Patra, R. Patel, J. Bakos, y A. K. Dalai, «Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review», *Environmental Chemistry Letters*. 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01334-4.
- [9] H. Millet, P. Vangheluwe, C. Block, A. Sevenster, L. Garcia, y R. Antonopoulos, «The Nature of Plastics and Their Societal Usage», *Issues in Environmental Science and Technology*, vol. 2019-Janua, n.º 47, pp. 1-20, 2019, doi: 10.1039/9781788013314-00001.
- [10] M. P. Bracciale *et al.*, «Anaerobic biodegradation of disposable PLA-based products: Assessing the correlation with physical, chemical and microstructural properties», *J Hazard Mater*, vol. 452, jun. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131244.
- [11] T. A. Swetha *et al.*, «A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste - Its applications and degradation», *Int J Biol Macromol*, vol. 234, p. 123703, abr. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123703.
- [12] M. A. Chowdhury, Nayem Hossain, M. D. Badrudduza, y M. M. Rana, «Development and characterization of natural sourced bioplastic for food packaging applications», *Heliyon*, vol. 9, n.º 2, feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13538.
- [13] K. Meng, Y. Teng, W. Ren, B. Wang, y V. Geissen, «Degradation of commercial biodegradable plastics and temporal dynamics of associated bacterial communities in soils: A microcosm study», *Science of the Total Environment*, vol. 865, mar. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161207.
- [14] M. Y. Khalid y Z. U. Arif, «Novel biopolymer-based sustainable composites for food packaging applications: A narrative review», *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 33. Elsevier Ltd, 1 de septiembre de 2022. doi: 10.1016/j.fpsl.2022.100892.
- [15] S. S. Ali *et al.*, «Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review», *Environmental Science and Ecotechnology*, p. 100254, jul. 2023, doi: 10.1016/j.ese.2023.100254.

- [16] European Bioplastics, «Bioplastics Facts and Figures», 2022.
- [17] N. Döhler, C. Wellenreuther, y A. Wolf, «Market dynamics of biodegradable bio-based plastics: Projections and linkages to European policies», *EFB Bioeconomy Journal*, vol. 2, p. 100028, nov. 2022, doi: 10.1016/j.bioeco.2022.100028.
- [18] J. Zhou *et al.*, «The long-term uncertainty of biodegradable mulch film residues and associated microplastics pollution on plant-soil health», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 442. Elsevier B.V., 15 de enero de 2023. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.130055.
- [19] M. H. Rahman y P. R. Bhoi, «An overview of non-biodegradable bioplastics», *Journal of Cleaner Production*, vol. 294. Elsevier Ltd, 20 de abril de 2021. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126218.
- [20] Consejo Nacional Ambiental, «I Plan Nacional de Compostaje 2020 -2050», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/05/Plan-Nacional-de-Compostaje-2020-2050.pdf>
- [21] INTECO, «INTE B25:2019/ Enm 1:2020 Etiquetado RCM para materiales renovables y compostables. Productos con contenido de materiales plásticos.», 2019.
- [22] G. Solano, D. Rojas-Gätjens, K. Rojas-Jimenez, M. Chavarría, y R. M. Romero, «Biodegradation of plastics at home composting conditions», *Environmental Challenges*, vol. 7, p. 100500, abr. 2022, doi: 10.1016/J.ENVC.2022.100500.
- [23] Y. Torrez Sequeira, «Caracterización del proceso y calidad del compost obtenido de la degradación de materiales poliméricos biodegradables a través del compostaje, utilizados para el empaque de alimentos (PLA y PBAT)», Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/03/TFG-YeymiTorrez.pdf>
- [24] Helicon, «Polymers», *The Hutchinson Unabridged Encyclopedia with Atlas and Weather Guide*. Helicon, 2018. Accedido: 16 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/entry/heliconhe/polymers/0>
- [25] M. Holloway y C. Nwaoha, «Polymer», *Dictionary of Industrial Terms*. Wiley, 2012. Accedido: 16 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/entry/wileyi/polymer/5>
- [26] J. R. Wagner, E. M. Mount, y H. F. Giles, «Polymer Overview and Definitions», en *Extrusion*, Elsevier, 2014, pp. 209-224. doi: 10.1016/b978-1-4377-3481-2.00018-1.
- [27] A. Porteous, «Plastic», *Dictionary of Environmental Science and Technology*. Wiley, 2008. Accedido: 16 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/entry/wileyenvsci/plastic/0>
- [28] P. Lagasse, «plastic», *The Columbia Encyclopedia*. Columbia University Press, 2018. Accedido: 16 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/title/columency?tab=entry_view&heading=plastic&sequence=0

- [29] M. Šprajcar, P. Horvat, y A. Kržan, «Biopolymers And Bioplastics Plastics Aligned With Nature», 2012.
- [30] G. Soto Calderón, M. Chaves Flores, y A. Quesada Rojas, *El etiquetado de los productos plásticos de origen biológico comercializados en Costa Rica: Guía técnica*. San José, Costa Rica: Fundación MarViva, 2022.
- [31] R. A. V. K. K. A. V. T. M. G. Thomas Sabu, «1.3 Recycling of Thermoplastics is Possible but Not with Thermosets. Why?», *Recycling of Polyurethane Foams*. Elsevier, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011PCSL2/recycling-polyurethane/recycling-thermoplastics>
- [32] T. S. Izdebska Joanna, «2.2.1.2 Thermoplastics and Thermosetting Plastics», *Printing on Polymers - Fundamentals and Applications*. Elsevier, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt010QJCB2/printing-polymers-fundamentals/thermoplastics-thermosetting>
- [33] M. I. R. Morris y A. L. Hicks, «A human-centered review of life cycle assessments of bioplastics», *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, n.º 1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 157-172, 1 de enero de 2022. doi: 10.1007/s11367-021-02001-0.
- [34] K. M. Cantor y P. Watts, *Plastics Materials*. Elsevier, 2011. doi: 10.1016/B978-1-4377-3514-7.10001-7.
- [35] K. Zhang *et al.*, «Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review», *Environmental Pollution*, vol. 274. Elsevier Ltd, 1 de abril de 2021. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [36] R. Coto, «Industria plástica en Costa Rica : Alternativas amigables con el ambiente y de transformación productiva», *PROCOMER*, 2019.
- [37] OECD, *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Paris: OECD Publishing, 2022. doi: 10.1787/de747aef-en.
- [38] European Bioplastics, «Environmental benefits of bioplastics», 2023. <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/environment/> (accedido 29 de diciembre de 2021).
- [39] P. Palmay, R. Jaramillo, y C. Medina, «Estudio cinético de la descomposición térmica del polietileno de alta densidad (HDPE) posconsumo a diferentes tasas de calentamiento», *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 11, n.º 1, pp. 61-68, 2021, doi: 10.29166/revfig.v11i1.3132.
- [40] European Bioplastics, «What are bioplastics? Material types, terminology, and labels – an introduction», 2022. https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf
- [41] S. A. Ashter, «Introduction», en *Introduction to Bioplastics Engineering*, Elsevier, 2016, pp. 1-17. doi: 10.1016/b978-0-323-39396-6.00001-4.
- [42] Sustainable Plastics, «About Bioplastics», 2023. <https://sustainableplastics.org/about-bioplastics/>

- [43] I. S. Sankhla, G. Sharma, y A. Tak, «Fungal degradation of bioplastics: An overview», en *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Recent Advances in Application of Fungi and Fungal Metabolites: Environmental and Industrial Aspects*, Elsevier, 2020, pp. 35-47. doi: 10.1016/B978-0-12-821007-9.00004-8.
- [44] Plastics Europe, «Biodegradable plastics», 2023. <https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/biodegradable-plastics/> (accedido 27 de abril de 2023).
- [45] L. T. Sin y B. S. Tuen, «Thermal Properties of Poly(Lactic Acid)», en *Polylactic Acid*, Elsevier, 2019, pp. 97-133. doi: 10.1016/b978-0-12-814472-5.00003-0.
- [46] G. L. Robertson, *Food Packaging: Principles & Practice*, 2da ed. 2014. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: http://ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/login?url=https%3A%2F%2Fsearch.credoreference.com%2Fcontent%2Fentry%2Festaafs%2Ffood_packaging%2F0%3FinstitutionId%3D7919
- [47] L. T. Sin y B. S. Tuen, «Chemical Properties of Poly(Lactic Acid)», en *Polylactic Acid*, Elsevier, 2019, pp. 135-166. doi: 10.1016/b978-0-12-814472-5.00004-2.
- [48] J. Wolfe, N. Regis, y K. Rogers, *BIOMATERIALS | The Biotechnology Revolution - Credo Reference*. Britannica Digital Learning, 2016. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://search-credoreference-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/entry/ebbr/biomaterials/0>
- [49] I. M. Hutten, «Handbook of Nonwoven Filter Media (2nd Edition)». Elsevier, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHNFME007/handbook-nonwoven-filter/handbook-nonwoven-filter>
- [50] C. J. D. Selke Susan E. M., «4.18.4 Poly(lactic Acid), PLA», *Plastics Packaging - Properties, Processing, Applications, and Regulations (3rd Edition)*. Hanser Publishers, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00CRGA02/plastics-packaging-properties/poly-lactic-acid-pla>
- [51] V. Katiyar, «Polylacticacid forfoodpackaging applications», *Sustainable Polymers for Food Packaging - An Introduction*. De Gruyter, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0132OR72/sustainable-polymers/properties-of-pla>
- [52] S. Ebnesajjad, «3.4 Poly(lactic Acid) for Biomedical Applications», *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics - Properties, Processing and Applications*. Elsevier, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt00C639A2/handbook-biopolymers/poly-lactic-acid-biomedical>
- [53] T. A. Swetha *et al.*, «A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 234. Elsevier B.V., 15 de abril de 2023. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123715.

- [54] S. Panseri *et al.*, «Feasibility of biodegradable based packaging used for red meat storage during shelf-life: A pilot study», *Food Chem*, vol. 249, pp. 22-29, may 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.12.067.
- [55] R. Francis, «4.4 Poly(lactic Acid)», *Recycling of Polymers - Methods, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011HZ091/recycling-polymers-methods/poly-lactic-acid>
- [56] S. S. Ali *et al.*, «Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept», *Bioresource Technology*, vol. 363. Elsevier Ltd, 1 de noviembre de 2022. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127869.
- [57] J. Jian, Z. Xiangbin, y H. Xianbo, «An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT», *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 3, n.º 1. KeAi Communications Co., pp. 19-26, 1 de enero de 2020. doi: 10.1016/j.aiepr.2020.01.001.
- [58] X. Han, J. Liu, S. Tian, F. Tao, y P. Xu, «Microbial cell factories for bio-based biodegradable plastics production», 2022, doi: 10.1016/j.isci.
- [59] N. K. Kalita y M. Hakkarainen, «Integrating biodegradable polyesters in a circular economy», *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 40. Elsevier B.V., 1 de abril de 2023. doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100751.
- [60] R. Kumar, K. Sadeghi, J. Jang, y J. Seo, «Mechanical, chemical, and bio-recycling of biodegradable plastics: A review», *Science of the Total Environment*, vol. 882. Elsevier B.V., 15 de julio de 2023. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163446.
- [61] G. Kale, T. Kijchavengkul, R. Auras, M. Rubino, S. E. Selke, y S. P. Singh, «Compostability of bioplastic packaging materials: An overview», *Macromol Biosci*, vol. 7, n.º 3, pp. 255-277, 2007, doi: 10.1002/mabi.200600168.
- [62] L. G. Hong, N. Y. Yuhana, y E. Z. Engku Zawawi, «Review of bioplastics as food packaging materials», *AIMS Mater Sci*, vol. 8, n.º 2, pp. 166-184, 2021, doi: 10.3934/matser.2021012.
- [63] A. Nandakumar, J. A. Chuah, y K. Sudesh, «Bioplastics: A boon or bane?», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, n.º April, p. 111237, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111237.
- [64] Standards Australia, «AS 5810-2010 Biodegradable plastics-Biodegradable plastics suitable for home composting». 2010.
- [65] A. Porteous, «Composting», *Dictionary of Environmental Science and Technology*. Credo Reference, 2008. Accedido: 25 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/login?url=https%3A%2F%2Fsearch.credoreference.com%2Fcontent%2Fentry%2Fwileyenvsci%2Fcomposting%2F0%3FinstitutionId%3D7919>
- [66] Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN ISO 20200 Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio». Madrid, 2016.

- [67] S. Butler, «compost», *The Macquarie Dictionary*. Credo Reference, 2017. Accedido: 25 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr:2048/login?url=https%3A%2F%2Fsearch.credoreference.com%2Fcontent%2Fentry%2Fmacqdict%2Fcompost%2F0%3FinstitutionId%3D7919>
- [68] Instituto Nacional de Normalización, «NCh 2880 Compost - Clasificación y requisitos», 2004.
- [69] WEF, «10.1 Introduction», *Wastewater Treatment Fundamentals III - Advanced Treatment*. Water Environment Federation (WEF), 2022. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0131W271/wastewater-treatment/additional-introduction>
- [70] A. I. Roca Fernández, «Uso de compost procedente de residuos sólidos urbanos como enmienda agrícola en suelos del área metropolitana de A Coruña», Universidad de Coruña, A Coruña, 2005.
- [71] Pilar. Roman, M. M. Martínez, y Alberto. Pantoja, *Manual de compostaje del agricultor : experiencias en América Latina*. FAO, 2013.
- [72] D. Fallas Conejo, «Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo aireación forzada», Universidad de Costa Rica, San José, 2016. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-DiegoFallas.pdf>
- [73] R. Barrena Gómez, «Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso», Universitat Autònoma De Barcelona, Barcelona, 2006. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5307/rbg1de1.pdf>
- [74] L. Chen, M. de Haro, A. Moore, y C. Falen, «The Composting Process», 2011, Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.vineyardteam.org/files/resources/Commercial%20compost%20production%20process.pdf>
- [75] L. C. Castillo Huaman, «Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019.», Universidad Continental, Huancayo, 2020. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8245/3/IV_FIN_107_T E_Castillo_Huaman_2020.pdf
- [76] A. Quesada Rojas *et al.*, *La contaminación marina por plásticos: un análisis integral de Fundación Marviva*. San José, Costa Rica: Fundación MarViva, 2021.
- [77] M. Gómez Paniagua, «Compostabilidad de envases de bolsas de PBAT+PLA y envases rígidos de PLA mediante tecnologías de pila y túnel», Universidad Politécnica de Madrid, 2015. doi: 10.20868/UPM.thesis.39602.

- [78] H. Y. Sintim *et al.*, «Release of micro- and nanoparticles from biodegradable plastic during in situ composting», *Science of the Total Environment*, vol. 675, pp. 686-693, jul. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.179.
- [79] K. Meng, Y. Teng, W. Ren, B. Wang, y V. Geissen, «Degradation of commercial biodegradable plastics and temporal dynamics of associated bacterial communities in soils: A microcosm study», *Science of the Total Environment*, vol. 865, mar. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161207.
- [80] A. S. Al Hosni, J. K. Pittman, y G. D. Robson, «Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic», *Waste Management*, vol. 97, pp. 105-114, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.07.042.
- [81] E. Rudnik y D. Briassoulis, «Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing», *Ind Crops Prod*, vol. 33, n.º 3, pp. 648-658, may 2011, doi: 10.1016/J.INDCROP.2010.12.031.
- [82] J. Sarasa, J. M. Gracia, y C. Javierre, «Study of the biodisintegration of a bioplastic material waste», *Bioresour Technol*, vol. 100, n.º 15, pp. 3764-3768, ago. 2009, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2008.11.049.
- [83] P. J. Jandas, K. Prabakaran, S. Mohanty, y S. K. Nayak, «Evaluation of biodegradability of disposable product prepared from poly (lactic acid) under accelerated conditions», *Polym Degrad Stab*, vol. 164, pp. 46-54, jun. 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.04.004.
- [84] N. Nomadolo, O. E. Dada, A. Swanepoel, T. Mokhena, y S. Muniyasamy, «A Comparative Study on the Aerobic Biodegradation of the Biopolymer Blends of Poly(butylene succinate), Poly(butylene adipate terephthalate) and Poly(lactic acid)», *Polymers (Basel)*, vol. 14, n.º 9, may 2022, doi: 10.3390/polym14091894.
- [85] Y. X. Weng, Y. J. Jin, Q. Y. Meng, L. Wang, M. Zhang, y Y. Z. Wang, «Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions», *Polym Test*, vol. 32, n.º 5, pp. 918-926, 2013, doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.05.001.
- [86] H. Wang, D. Wei, A. Zheng, y H. Xiao, «Soil burial biodegradation of antimicrobial biodegradable PBAT films», *Polym Degrad Stab*, vol. 116, pp. 14-22, jun. 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.03.007.
- [87] E. F. Gómez y F. C. Michel, «Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation», *Polym Degrad Stab*, vol. 98, n.º 12, pp. 2583-2591, dic. 2013, doi: 10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2013.09.018.
- [88] D. Adhikari *et al.*, «Degradation of Bioplastics in Soil and Their Degradation Effects on Environmental Microorganisms», *J Agric Chem Environ*, vol. 05, n.º 01, pp. 23-34, 2016, doi: 10.4236/jacen.2016.51003.
- [89] M. Mihai, N. Legros, y A. Alemdar, «Formulation-properties versatility of wood fiber biocomposites based on polylactide and polylactide/thermoplastic starch

- blends», *Polym Eng Sci*, vol. 54, n.º 6, pp. 1325-1340, may 2014, doi: 10.1002/pen.23681.
- [90] Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN 13432 - Envases y embalajes - Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación - Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje». 2001.
- [91] OMS y FAO, *Manual sobre la elaboración y uso de las especificaciones de plaguicidas de la FAO y la OMS*. Roma, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i5713s/i5713s.pdf>
- [92] F. Camacho Céspedes, L. Uribe Lorío, Q. Newcomer, K. Masters, y M. Kinyua, «Fitotoxicidad de compost producido con cultivos de microorganismos de montaña y lodos de biodigestor», vol. 11, n.º 2, pp. 75-84, 2019.
- [93] A. Paccini, «Determinación de la fitotoxicidad del compost de la planta de tratamiento de residuos sólidos municipales de Carhuaz, utilizando el cultivo de trigo como indicador, Carhuaz - Ancash, 2017», Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, Perú, 2019.
- [94] FAO, «Protocolo patrón para ensayos de eficacia biológica de plaguicidas de uso agrícola». 2004.
- [95] S. Loganathan, R. B. Valapa, R. K. Mishra, G. Pugazhenthii, y S. Thomas, «Thermogravimetric Analysis for Characterization of Nanomaterials», en *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization*, Elsevier, 2017, pp. 67-108. doi: 10.1016/B978-0-323-46139-9.00004-9.
- [96] M. Wagner, «Thermogravimetric Analysis», en *Thermal Analysis in Practice*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017, pp. 162-186. doi: 10.3139/9781569906446.010.
- [97] K. Chiang y T. Mintz, «Gravimetric techniques», en *Techniques for Corrosion Monitoring*, Elsevier, 2020, pp. 239-254. doi: 10.1016/B978-0-08-103003-5.00009-6.
- [98] J. D. Menczel, «Thermogravimetric analysis of fibers», en *Thermal Analysis of Textiles and Fibers*, Elsevier, 2020, pp. 71-79. doi: 10.1016/B978-0-08-100572-9.00004-5.
- [99] M. K. Singh y A. Singh, «Thermogravimetric analyzer», en *Characterization of Polymers and Fibres*, Elsevier, 2022, pp. 223-240. doi: 10.1016/b978-0-12-823986-5.00015-4.
- [100] E. Z. E. Zawawi, A. H. Noor Hafizah, A. Z. Romli, N. Y. Yuliana, y N. N. Bonnia, «Effect of nanoclay on mechanical and morphological properties of poly(lactide) acid (PLA) and polypropylene (PP) blends», *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 1778-1782, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.612.
- [101] A. Awal, M. Rana, y M. Sain, «Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites», *Mechanics of Materials*, vol. 80, n.º Part A, pp. 87-95, 2015, doi: 10.1016/j.mechmat.2014.09.009.

- [102] A. H. I. Mourad, R. O. Akkad, A. A. Soliman, y T. M. Madkour, «Characterisation of thermally treated and untreated polyethylene- polypropylene blends using DSC, TGA and IR techniques», *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 38, n.º 7, pp. 265-278, 2009, doi: 10.1179/146580109X12473409436625.
- [103] J. Xu, C. Liu, H. Qu, H. Ma, Y. Jiao, y J. Xie, «Investigation on the thermal degradation of flexible poly(vinyl chloride) filled with ferrites as flame retardant and smoke suppressant using TGA-FTIR and TGA-MS», *Polym Degrad Stab*, vol. 98, n.º 8, pp. 1506-1514, 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.04.016.
- [104] B. A. Morris, «Analytical and modeling tools for flexible packaging design and process optimization», *Science and Technology of Flexible Packaging - Multilayer Films from Resin and Process to End Use (2nd Edition)*. Elsevier, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt0131B0Q1/science-technology-flexible/differential-scanning>
- [105] G. Wypych, «Important Analytical Methods Used In The Studies Of Nucleating Agents», en *Handbook of Nucleating Agents (2nd Edition)*, ChemTec Publishing, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt012I7UE4/handbook-nucleating-agents/fast-scanning-chip-calorimetry>
- [106] J. Li, Y. He, S. Anankanbil, y Z. Guo, «Phospholipid-Based Surfactant», *Biobased Surfactants - Synthesis, Properties, and Applications (2nd Edition)*. Elsevier, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt01224UG2/biobased-surfactants/phospholip-introduction>
- [107] M.-T. M. Kozłowski Ryszard M., «Testing of natural textile fibres», en *Handbook of Natural Fibres, Volume 1 - Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation (2nd Edition)*, Elsevier, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt012LVZH6/handbook-natural-fibres/differential-scanning>
- [108] N. Fedelich, «TGA-FTIR», en *Evolved Gas Analysis*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019, pp. 18-30. doi: 10.3139/9781569908105.003.
- [109] R. Sindhu, P. Binod, y A. Pandey, «Microbial Poly-3-Hydroxybutyrate and Related Copolymers», en *Industrial Biorefineries and White Biotechnology*, Elsevier, 2015, pp. 575-605. doi: 10.1016/B978-0-444-63453-5.00019-7.
- [110] M. K. Singh y A. Singh, «Fourier transform infrared (FTIR) analysis», en *Characterization of Polymers and Fibres*, Elsevier, 2022, pp. 295-320. doi: 10.1016/b978-0-12-823986-5.00014-2.
- [111] X. Zhang, B. Tan, y W. Li, «Plant extracts as environmentally sustainable corrosion inhibitors I», en *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors: Principles, Designing and Applications*, Elsevier, 2022, pp. 263-282. doi: 10.1016/B978-0-323-91176-4.00011-8.

- [112] M. A. Mohamed, J. Jaafar, A. F. Ismail, M. H. D. Othman, y M. A. Rahman, «Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy», en *Membrane Characterization*, Elsevier Inc., 2017, pp. 3-29. doi: 10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2.
- [113] Y. N. Sudhakar, M. Selvakumar, y D. K. Bhat, «6.4 SEM Analysis», en *Biopolymer Electrolytes - Fundamentals and Applications in Energy Storage*, Elsevier, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/khtml/id:kt011PFKD1/biopolymer-electrolytes/sem-analysis>
- [114] X. Zhai, W. Wang, H. Zhang, Y. Dai, H. Dong, y H. Hou, «Effects of high starch content on the physicochemical properties of starch/PBAT nanocomposite films prepared by extrusion blowing», *Carbohydr Polym*, vol. 239, n.º March, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116231.
- [115] E. Z. E. Zawawi, A. H. Noor Hafizah, A. Z. Romli, N. Y. Yuliana, y N. N. Bonnia, «Effect of nanoclay on mechanical and morphological properties of poly(lactide) acid (PLA) and polypropylene (PP) blends», *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 1778-1782, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.612.
- [116] K. M. Krishnan, «Scanning Electron Microscopy», en *Principles of Materials Characterization and Metrology*, Oxford University Press Oxford, 2021, pp. 693-744. doi: 10.1093/oso/9780198830252.003.0010.
- [117] Association Française de Normalisation (AFNOR), «prEN 17428:2020 Packaging - Determination of the degree of disintegration under simulated home composting conditions». 2020.
- [118] DosMil50 Empaques Compostables, «Empaques Compostables Catálogo 2022». 2022. Accedido: 12 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://irp.cdn-website.com/55d9de2b/files/uploaded/Cata%CC%81logo%20de%20entrega%20inmediata.pdf>
- [119] CeNAT y LANOTEC, «Microscopio Electrónico de Barrido», 2022. <https://lanotec.cenat.ac.cr/es/> (accedido 3 de septiembre de 2022).
- [120] OECD, «OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test». 2006.
- [121] EVER GREEN, «Ever Green Súper Tierra | Evergreen CR», 2022. <https://www.evergreencr.com/producto/ever-green-super-tierra-vitaminada/> (accedido 5 de septiembre de 2022).
- [122] M. P. Arrieta, J. López, E. Rayón, y A. Jiménez, «Disintegrability under composting conditions of plasticized PLA-PHB blends», *Polym Degrad Stab*, vol. 108, pp. 307-318, 2014, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.01.034.
- [123] T. A. de Oliveira, I. de Oliveira Mota, F. E. P. Mousinho, R. Barbosa, L. H. de Carvalho, y T. S. Alves, «Biodegradation of mulch films from poly(butylene adipate co-terephthalate), carnauba wax, and sugarcane residue», *J Appl Polym Sci*, vol. 136, n.º 47, pp. 1-9, 2019, doi: 10.1002/app.48240.
- [124] H. Jia, M. Zhang, Y. Weng, Y. Zhao, C. Li, y A. Kanwal, «Degradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) by *Stenotrophomonas* sp. YCJ1 isolated

- from farmland soil», *J Environ Sci (China)*, vol. 103, pp. 50-58, may 2021, doi: 10.1016/j.jes.2020.10.001.
- [125] N. Nordin, S. H. Othman, S. A. Rashid, y R. K. Basha, «Effects of glycerol and thymol on physical, mechanical, and thermal properties of corn starch films», *Food Hydrocoll*, vol. 106, sep. 2020, doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105884.
- [126] B. Debnath, P. Duarah, D. Haldar, y M. K. Purkait, «Improving the properties of corn starch films for application as packaging material via reinforcement with microcrystalline cellulose synthesized from elephant grass», *Food Packag Shelf Life*, vol. 34, dic. 2022, doi: 10.1016/j.fpsl.2022.100937.
- [127] B. Wang *et al.*, «Correlation between chain structures of corn starch and properties of its film prepared at different degrees of disorganization», *Int J Biol Macromol*, vol. 226, pp. 580-587, ene. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.12.084.
- [128] M. Zaborowska, K. Bernat, B. Pszczółkowski, A. Cydzik-Kwiatkowska, D. Kulikowska, y I. Wojnowska-Baryła, «Multi-faceted analysis of thermophilic anaerobic biodegradation of poly(lactic acid)-based material», *Waste Management*, vol. 155, pp. 40-52, ene. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2022.10.031.
- [129] G. Gorrasi y R. Pantani, «Effect of PLA grades and morphologies on hydrolytic degradation at composting temperature: Assessment of structural modification and kinetic parameters», *Polym Degrad Stab*, vol. 98, n.º 5, pp. 1006-1014, may 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.005.
- [130] A. N. Mistry, B. Kachenchart, A. Wongthanaroj, A. Somwangthanaroj, y E. Luepromchai, «Rapid biodegradation of high molecular weight semi-crystalline polylactic acid at ambient temperature via enzymatic and alkaline hydrolysis by a defined bacterial consortium», *Polym Degrad Stab*, vol. 202, ago. 2022, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110051.
- [131] N. Sundar, S. J. Stanley, S. A. Kumar, P. Keerthana, y G. A. Kumar, «Development of dual purpose, industrially important PLA-PEG based coated abrasives and packaging materials», *J Appl Polym Sci*, vol. 138, n.º 21, jun. 2021, doi: 10.1002/app.50495.
- [132] A. K. Pal, M. Misra, y A. K. Mohanty, «Silane treated starch dispersed PBAT/PHBV-based composites: Improved barrier performance for single-use plastic alternatives», *Int J Biol Macromol*, vol. 229, pp. 1009-1022, feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.12.141.
- [133] M. Sedničková *et al.*, «Changes of physical properties of PLA-based blends during early stage of biodegradation in compost», *Int J Biol Macromol*, vol. 113, pp. 434-442, 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.02.078.
- [134] L. Urbina *et al.*, «Biodegradable composites with improved barrier properties and transparency from the impregnation of PLA to bacterial cellulose membranes», *J Appl Polym Sci*, vol. 133, n.º 28, jul. 2016, doi: 10.1002/app.43669.
- [135] N. Karimpour-Motlagh *et al.*, «An experimental and theoretical mechanistic analysis of thermal degradation of polypropylene/polylactic acid/clay nanocomposites»,

- Polym Adv Technol*, vol. 30, n.º 11, pp. 2695-2706, nov. 2019, doi: 10.1002/pat.4699.
- [136] F. A. de Carvalho, A. A. Moreira, A. L. M. de Oliveira, y F. Yamashita, «Biodegradation of poly(lactic acid)—cassava bagasse composites produced by injection molding», *J Appl Polym Sci*, vol. 138, n.º 28, jul. 2021, doi: 10.1002/app.50667.
- [137] A. Kumar, V. R. Tumu, S. Ray Chowdhury, y R. R. Ramana, «A green physical approach to compatibilize a bio-based poly (lactic acid)/lignin blend for better mechanical, thermal and degradation properties», *Int J Biol Macromol*, vol. 121, pp. 588-600, ene. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.057.
- [138] A. Kumar, T. Venkatappa Rao, S. Ray Chowdhury, y S. V. S. Ramana Reddy, «Compatibility confirmation and refinement of thermal and mechanical properties of poly (lactic acid)/poly (ethylene-co-glycidyl methacrylate) blend reinforced by hexagonal boron nitride», *React Funct Polym*, vol. 117, pp. 1-9, ago. 2017, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2017.05.005.
- [139] M. S. Khan, P. P. Dhavan, D. Ratna, S. S. Sonawane, y N. G. Shimpi, «LDPE:PLA and LDPE:PLA:OMMT polymer composites: Preparation, characterization, and its biodegradation using *Bacillus* species isolated from dumping yard», *Polym Adv Technol*, vol. 32, n.º 9, pp. 3724-3739, 2021, doi: 10.1002/pat.5392.
- [140] N. K. Kalita, M. K. Nagar, C. Mudenur, A. Kalamdhad, y V. Katiyar, «Biodegradation of modified Poly(lactic acid) based biocomposite films under thermophilic composting conditions», *Polym Test*, vol. 76, n.º February, pp. 522-536, 2019, doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.02.021.
- [141] N. T. Kilic, B. N. Can, M. Kodal, y G. Ozkoc, «Compatibilization of PLA/PBAT blends by using Epoxy-POSS», *J Appl Polym Sci*, vol. 136, n.º 12, mar. 2019, doi: 10.1002/app.47217.
- [142] F. Ruggero, E. Carretti, R. Gori, T. Lotti, y C. Lubello, «Monitoring of degradation of starch-based biopolymer film under different composting conditions, using TGA, FTIR and SEM analysis.», *Chemosphere*, vol. 246, p. 125770, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125770.
- [143] L. Botta *et al.*, «Biocomposite PBAT/lignin blown films with enhanced photostability», *Int J Biol Macromol*, vol. 217, pp. 161-170, sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.07.048.
- [144] Y. X. Weng, Y. J. Jin, Q. Y. Meng, L. Wang, M. Zhang, y Y. Z. Wang, «Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions», *Polym Test*, vol. 32, n.º 5, pp. 918-926, 2013, doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.05.001.
- [145] M. Zheng, P. Wu, L. Li, F. Yu, y J. Ma, «Adsorption/desorption behavior of ciprofloxacin on aged biodegradable plastic PLA under different exposure conditions», *J Environ Chem Eng*, vol. 11, n.º 1, feb. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2022.109256.

- [146] W. Chen *et al.*, «Comparing the bacterial composition, succession and assembly patterns in plastisphere and kitchen waste composting with PLA/PBAT blends», *J Hazard Mater*, vol. 454, jul. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.131405.
- [147] E. Rudnik, «Composting methods and legislation», en *Compostable Polymer Materials*, Elsevier, 2019, pp. 127-161. doi: 10.1016/b978-0-08-099438-3.00005-7.
- [148] U. Hujuri, K. Sankar Paul, B. Kurmi, A. Borah, y F. A. Nongdhar, «Microbial composting and vermicomposting of temple waste using *Eisenia fetida*», *Mater Today Proc*, vol. 72, pp. 2780-2784, ene. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.177.
- [149] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «RTCR 485:2016.Sustancias químicas. fertilizantes y enmiendas para uso agrícola. Tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos y contaminantes.» 2016.
- [150] InfoAgro, «El cultivo de la lechuga». <https://www.infoagro.com/hortalizas/lechuga.htm>
- [151] J. G. Vásquez Camacho, «Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (*lactuca sativa* l.) en tres ciclos de siembra consecutivos, en San Miguel de la Tigra, San Carlos, Alajuela, C.R.», 2015.
- [152] P. y A. España. Ministerio de Agricultura, «Verduras y Hortalizas: Lechuga».
- [153] M. Vilaplana Batalla, «Verduras y hortalizas», *Offarm*, vol. 23, n.º 2, pp. 120-132, 2004, [En línea]. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-verduras-hortalizas-13057699>
- [154] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), «Cebolla *Allium cepa* L. Liliaceae». 1991. Accedido: 4 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658cebolla.pdf>
- [155] J. Japón Quintero y P. y A. España. Ministerio de Agricultura, «Cultivo extensivo de la cebolla», 1982, [En línea]. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1982_18.pdf
- [156] P. y A. España. Ministerio de Agricultura, «Verduras y Hortalizas: Cebolla».

9. ANEXOS

Anexo A.1. Datos de temperatura interna promedio de las réplicas para cada tratamiento de los sistemas de compostaje en cajas.

Temperaturas (°C)									
Día	Ambiente ¹	PLA	PBAT	Control	Día	Ambiente ¹	PLA	PBAT	Control
1	29,7	19,3 ± 0,8	20 ± 0,6	19,7 ± 0,5	79	25,5	22 ± 0	22,2 ± 0,4	22,2 ± 0,4
2	29,0	25,5 ± 1	27,8 ± 1,6	27,3 ± 1,2	84	22,3	25,7 ± 0,5	25,8 ± 0,4	25,5 ± 0,5
3	29,9	25,3 ± 0,8	25,5 ± 0,8	25,5 ± 0,5	87	28,7	25,3 ± 0,5	24,8 ± 0,4	25 ± 0
4	30,7	25,3 ± 1	25,3 ± 0,5	25,5 ± 0,5	91	32,5	25,2 ± 0,4	24,7 ± 0,5	25 ± 0
7	31,7	24,5 ± 0,5	24,5 ± 0,5	24,5 ± 0,5	94	30,9	24,5 ± 0,8	23,2 ± 0,4	23 ± 0
8	31,5	21,2 ± 0,4	21,8 ± 0,4	21 ± 0	98	31,9	24,7 ± 0,5	25 ± 0	24,3 ± 0,5
9	27,4	20,5 ± 0,8	21,3 ± 0,5	20,7 ± 0,5	101	27,0	25,2 ± 0,4	25,2 ± 0,8	24,8 ± 0,8
10	29,1	24,7 ± 0,8	25,3 ± 0,5	25,5 ± 0,8	105	30,8	24,7 ± 0,5	25,3 ± 0,5	25,2 ± 0,4
11	30,2	21,3 ± 0,5	21,7 ± 0,5	22,2 ± 0,4	108	32,6	25,2 ± 0,4	25,2 ± 0,4	25,2 ± 0,4
14	28,3	18,3 ± 0,5	18,7 ± 0,5	19 ± 0	112	26,0	23,3 ± 0,5	23,3 ± 0,5	23,8 ± 0,4
16	30,8	22 ± 1,1	21,3 ± 0,5	21 ± 0	115	27,4	24,7 ± 0,5	24,7 ± 0,5	25 ± 0
18	25,4	21,2 ± 0,4	21,2 ± 0,4	21,2 ± 0,4	119	30,2	24,8 ± 0,4	24,7 ± 0,5	25 ± 0
21	28,8	21 ± 0	21,2 ± 0,4	21,3 ± 0,5	122	25,8	22,7 ± 0,5	23 ± 0	22,8 ± 0,4
23	28,0	23,5 ± 0,8	26 ± 0,9	25,2 ± 0,4	126	30,7	25,2 ± 0,4	25,5 ± 0,5	25,3 ± 0,5
25	25,4	20,3 ± 1,6	20 ± 0,6	21 ± 0	129	21,6	25,2 ± 0,4	25,5 ± 0,5	25,3 ± 0,5
28	28,7	22 ± 0,6	23 ± 0	22,3 ± 0,5	133	26,6	25,2 ± 0,4	25 ± 0	25 ± 0
30	27,2	22,3 ± 0,8	22,8 ± 0,4	22,8 ± 0,4	136	24,5	24,7 ± 0,5	24,3 ± 0,5	24,5 ± 0,5
32	22,8	19,7 ± 0,8	19,5 ± 0,5	19,3 ± 0,5	140	25,8	24,5 ± 0,5	25 ± 0	25 ± 0
35	27,1	25,7 ± 0,8	25,5 ± 0,5	25,8 ± 0,8	143	30,3	24,5 ± 0,5	24,3 ± 0,8	24,3 ± 0,8
38	24,6	22 ± 0,6	22,2 ± 0,4	22 ± 0	147	28,4	23,5 ± 0,5	23,3 ± 0,5	23,8 ± 0,4
42	25,9	24,8 ± 0,8	24,2 ± 0,4	24,2 ± 0,4	150	26,4	24,3 ± 0,5	25 ± 0,6	24,5 ± 0,5
45	30,3	21,3 ± 0,5	21 ± 0	21,2 ± 0,4	154	24,1	25,5 ± 1	25,5 ± 0,5	24,8 ± 0,4
49	25,5	24,3 ± 0,5	24,7 ± 0,5	24,5 ± 0,5	157	25,1	25,5 ± 1	25,5 ± 0,8	24,8 ± 0,4
52	28,7	25,5 ± 0,5	26 ± 0	25,8 ± 0,4	161	28,4	23,2 ± 0,4	23 ± 0	23,2 ± 0,4
56	23,1	24,3 ± 0,5	23,8 ± 0,8	23,5 ± 0,8	164	24,7	21,8 ± 0,8	21,2 ± 0,4	21,8 ± 0,4
59	22,8	25,3 ± 0,5	24,8 ± 0,8	22,7 ± 1,2	168	30,9	23,5 ± 0,5	23,5 ± 0,5	23 ± 0
63	27,5	24,7 ± 0,5	24,2 ± 0,4	24 ± 0	171	29,9	24,8 ± 0,4	24,8 ± 0,4	24,7 ± 0,5
66	34,2	26,3 ± 1	26,5 ± 0,5	26 ± 0	175	28,3	23,2 ± 0,4	23,2 ± 0,4	23,2 ± 0,4
70	34,3	24,8 ± 0,4	25 ± 0,6	25 ± 0	178	26,8	23 ± 0	23,2 ± 0,4	23 ± 0
73	30,2	23,8 ± 0,4	24 ± 0	24 ± 0	180	30,8	24,2 ± 0,4	24 ± 0,6	24 ± 0
77	23,7	20,2 ± 0,4	20,7 ± 0,8	20,2 ± 0,4					

¹T ambiente registrada en el momento que se midieron las temperaturas internas de los reactores.

Los datos mostrados para cada reactor por día son el promedio de las repeticiones. Analizado por día entre los sistemas (PLA, PBAT y Control) el análisis estadístico refleja que el 85,2 % de los días no presentaron diferencias significativas, mientras que el 14,8 % mostraron que si existen diferencias significativas entre los valores de temperatura por día.

Anexo A.2. Datos de temperatura interna promedio de las réplicas para cada tratamiento de los sistemas de compostaje en rotatorias.

Temperaturas (°C)									
Día	Ambiente ¹	PLA	PBAT	Control	Día	Ambiente ¹	PLA	PBAT	Control
1	30,8	25,3 ± 0,6	24,7 ± 0,6	25,5 ± 0,7	79	30,9	24,3 ± 0,6	24,3 ± 0,6	24 ± 0
2	30,8	41 ± 2,6	42,3 ± 2,1	41,5 ± 2,1	84	31,9	25,7 ± 0,6	24,7 ± 0,6	25 ± 0
3	29,2	55,3 ± 1,2	54,7 ± 0,6	56 ± 1,4	87	27,0	25 ± 1	25,3 ± 0,6	25 ± 0
4	25,4	55 ± 1	54,3 ± 2,1	55 ± 4,2	91	30,8	24,7 ± 0,6	24,7 ± 0,6	23,5 ± 0,7
7	28,8	55,3 ± 0,6	55 ± 4,4	55,5 ± 3,5	94	32,6	25,3 ± 0,6	25 ± 0	25 ± 0
8	28,3	54,7 ± 1,2	56,3 ± 3,8	55 ± 4,2	98	26,0	23,7 ± 0,6	24,3 ± 0,6	24 ± 0
9	28,0	55 ± 1	56,7 ± 4,9	54 ± 5,7	101	27,4	24,3 ± 0,6	23,7 ± 0,6	24 ± 1,4
10	25,4	50 ± 4	54 ± 4,4	52 ± 0	105	30,2	25 ± 0	25,3 ± 0,6	25,5 ± 0,7
11	25,4	51,7 ± 1,5	54,3 ± 4,9	51 ± 1,4	108	25,8	23,7 ± 0,6	24 ± 0	23,5 ± 0,7
14	28,7	50 ± 2,6	46,7 ± 5,7	44 ± 5,7	112	30,7	24 ± 0	24,3 ± 0,6	24 ± 1,4
16	27,2	37,3 ± 4,2	38 ± 2	37 ± 2,8	115	21,6	24,3 ± 0,6	24 ± 0	24 ± 0
18	22,8	36,7 ± 3,1	33,7 ± 0,6	32,5 ± 4,9	119	26,6	25,3 ± 0,6	24 ± 0	25 ± 0
21	27,1	28,3 ± 1,2	27 ± 0	27,5 ± 0,7	122	24,5	25 ± 0	24,7 ± 0,6	25 ± 0
23	22,8	23,7 ± 0,6	24 ± 0	24,5 ± 0,7	126	25,8	25,7 ± 0,6	25 ± 0	25 ± 0
25	27,1	22,7 ± 0,6	22,3 ± 0,6	22,5 ± 0,7	129	30,3	23,3 ± 0,6	23,7 ± 0,6	24 ± 0
28	25,9	31,3 ± 1,2	29,7 ± 0,6	30 ± 0	133	28,4	24 ± 0	24 ± 0	24 ± 0
30	26,5	23 ± 0	23 ± 0	23 ± 0	136	26,4	24,7 ± 0,6	25,3 ± 0,6	25 ± 0
32	30,3	20,3 ± 0,6	20 ± 0	20 ± 0	140	24,1	24,3 ± 0,6	25 ± 0	24 ± 0
35	25,5	27,7 ± 0,6	28,3 ± 0,6	27 ± 0	143	25,1	25,7 ± 0,6	24,7 ± 0,6	25,5 ± 0,7
38	28,7	26,3 ± 0,6	26 ± 0	26,5 ± 0,7	147	28,4	23,3 ± 0,6	23 ± 0	23,5 ± 0,7
42	23,1	25,7 ± 1,2	24,7 ± 0,6	25 ± 0	150	24,7	22,3 ± 0,6	22 ± 0	21,5 ± 0,7
45	22,8	20,3 ± 0,6	20,3 ± 0,6	20 ± 0	154	30,9	23 ± 0	23 ± 0	23 ± 0
49	27,5	24,7 ± 0,6	24 ± 1	24 ± 0	157	29,9	23,3 ± 0,6	24,3 ± 0,6	25 ± 0
52	34,2	25 ± 0	25 ± 0	25,5 ± 0,7	161	28,3	24 ± 0	23,7 ± 0,6	24 ± 0
56	34,3	24 ± 0	24,3 ± 0,6	24,5 ± 0,7	164	26,8	24 ± 0	24 ± 0	24 ± 0
59	30,2	22 ± 0	22 ± 1	22 ± 0	169	30,8	24 ± 0	23,7 ± 0,6	24 ± 0
63	23,7	20 ± 0	20 ± 0	20 ± 0	172	32,2	25 ± 0	24,7 ± 0,6	25 ± 0
66	25,5	22 ± 0	22 ± 0	22 ± 0	175	31,9	25 ± 0	24 ± 1	24 ± 0
70	22,3	26 ± 0	25,3 ± 0,6	25,5 ± 0,7	178	30,5	25 ± 0	25 ± 0	25 ± 0
73	28,7	23 ± 0	22,7 ± 0,6	23 ± 0	180	28,7	25 ± 0	24,3 ± 0,6	25 ± 0
77	32,5	25,3 ± 0,6	25 ± 0	25 ± 0					

¹T ambiente registrada en el momento que se midieron las temperaturas internas de los reactores.

Los datos mostrados para cada reactor por día son el promedio de las repeticiones. Analizado por día entre los sistemas (PLA, PBAT y Control) el análisis estadístico refleja que el 98,4 % de los días no presentaron diferencias significativas, mientras que el 1,6 % mostraron que si existen diferencias significativas entre los valores de temperatura por día.

Anexo A.3. Resumen de análisis estadístico obtenido del análisis químico.

Parámetro	Unidades	PLA		PBAT	
		Cajas	Rotatorias	Cajas	Rotatorias
CH	%	64,6±0,6 ^a	56,8±2,6 ^a	60±2,1 ^a	56,6±5,5 ^a
pH	H ₂ O	4,8±0,1 ^a	7±0,3 ^a	4,6±0,1 ^a	7,7±0,1 ^b
C	%	38,9±0,5 ^a	40±1,1 ^a	37±0,8 ^a	38,9±0,9 ^a
MO	%	55,7±0,7 ^a	57,3±1,6 ^a	52,9±1,2 ^a	55,7±1,3 ^a
C/N	-	20,5±0,5 ^a	18,5±0,5 ^b	19,4±0,5 ^a	17,5±1,1 ^b
P	% masa	0,4±0 ^a	0,4±0 ^a	0,4±0 ^a	0,5±0 ^b
Mg	% masa	0,2±0 ^a	0,3±0 ^b	0,2±0 ^a	0,3±0 ^b
K	% masa	0,9±0 ^a	1±0,1 ^b	0,9±0 ^a	1,2±0,1 ^b
S	% masa	0,2±0 ^a	0,2±0 ^a	0,2±0 ^a	0,3±0 ^b
Cu	mg/kg	51,7±2,1 ^a	72,7±8,1 ^b	54±1 ^a	82±18,3 ^b
Zn	mg/kg	187,7±5,5 ^a	230,7±8,1 ^a	199,3±9,2 ^a	228,7±6,4 ^a
Mn	mg/kg	306±73,4 ^a	300±10,4 ^a	274,7±4,2 ^a	334±8,7 ^a
B	mg/kg	17,3±1,2 ^a	18±0 ^a	18±0 ^a	21,7±1,5 ^b
CE	mS/cm	9,7±0,5 ^a	3,5±1,3 ^b	10,2±0,4 ^a	2,4±0,3 ^b
N	% masa	1,9±0 ^a	2,2±0 ^b	1,9±0,1 ^a	2,2±0,1 ^b
Ca	% masa	1±0,1 ^a	1,2±0,1 ^b	1±0 ^a	1,4±0,1 ^b
Fe	mg/kg	10668±595 ^a	10979±702,5 ^a	11374,3±475,7 ^a	12031±292 ^a

Letras iguales en la misma fila (cada parámetro) y por tipo de bioplástico (PLA y PBAT) indican que no existen diferencias significativas entre los datos.

Anexo A.4. Resultados de la prueba de germinación previa a los ensayos de ecotoxicidad para determinar si los porcentajes de germinación son acordes con el valor de 87 % dado por el proveedor de las semillas.

Cultivo	Repetición	Semillas germinadas ¹	Porcentaje de germinación (%)	
			Individual	Promedio
Lechuga	1	31	86,1	88,19 ± 2,66
	2	32	88,9	
	3	33	91,7	
	4	31	86,1	
Cebolla	1	27	75,0	81,25 ± 4,74
	2	30	83,3	
	3	29	80,6	
	4	31	86,1	

36 semillas colocadas inicialmente en todas las repeticiones

¹ Luego de 15 días

Anexo A.5. Valores promedio de temperatura (T) y humedad relativa (HR) ambientales del invernadero ubicado en LANOTEC al momento de realizar el ensayo de ecotoxicidad con el compost obtenido de los sistemas en cajas.

Valores promedio				Rangos recomendados por el OECD 208 para cultivos de lechuga y cebolla			
Periodo	Hora	T (°C)¹	HR (%)¹			Datos	%
Nocturno	18:00	22,2	90,0	Temperaturas nocturnas			
	19:00	21,7	91,6				
	20:00	21,3	92,7	Entre 17 y 23 °C		242	95,7
	21:00	21,0	93,1	Menores a 17 °C		0	0,0
	22:00	20,7	94,0	Mayores a 23°C		11	4,3
	23:00	20,4	94,1				
	00:00	19,9	94,0	HR nocturnas			
	01:00	19,8	94,1				
	02:00	19,5	94,5	Entre 85 y 95 %		100	39,5
	03:00	19,2	94,6	Menores a 85%		21	8,3
	04:00	19,1	94,4	Mayores a 95%		132	52,2
	05:00	19,0	94,5				
Diurno	06:00	19,5	93,7	Temperaturas diurnas			
	07:00	24,1	82,3				
	08:00	26,7	72,0	Entre 22 y 28 °C		95	38,2
	09:00	33,5	55,6	Menores a 22 °C		39	15,7
	10:00	35,8	49,2	Mayores a 28°C		115	46,2
	11:00	34,4	51,3				
	12:00	32,4	56,1	HR diurnas			
	13:00	29,8	63,6				
	14:00	27,5	71,4	Entre 65 y 75 %		41	16,5
	15:00	26,0	77,0	Menores a 65%		101	40,6
	16:00	24,4	82,9	Mayores a 75%		107	43,0
	17:00	23,2	86,8	Mayores a 65%		148	59,4

¹Promedio de la temperatura y humedad relativa calculada para cada hora del día durante el total del experimento.

Anexo A.6. Valores promedio de temperatura (T) y humedad relativa (HR) ambientales del invernadero ubicado en LANOTEC al momento de realizar el ensayo de ecotoxicidad con el compost obtenido de los sistemas en rotatorias.

Valores promedio				Rangos recomendados por el OECD 208 para cultivos de lechuga y cebolla		
Periodo	Hora	T (°C) ¹	HR (%) ¹		Datos	%
Nocturno	18:00	21,7	91,5	Temperaturas nocturnas		
	19:00	21,4	92,4			
	20:00	21,1	93,2	Entre 17 y 23 °C	403	98,8
	21:00	20,7	93,7	Menores a 17 °C	0	0,0
	22:00	20,4	94,4	Mayores a 23°C	5	1,2
	23:00	20,2	94,8	HR nocturnas		
	00:00	19,9	95,0			
	01:00	19,7	95,2			
	02:00	19,5	95,4	Entre 85 y 95 %	190	46,6
	03:00	19,1	95,9	Menores a 85%	7	1,7
	04:00	18,9	96,0	Mayores a 95%	211	51,7
05:00	18,7	96,1	Temperaturas diurnas			
Diurno	06:00	19,8	94,6			
	07:00	27,1	72,8			
	08:00	29,8	67,3	Entre 22 y 28 °C	158	38,7
	09:00	32,2	59,9	Menores a 22 °C	70	17,2
	10:00	32,4	56,7	Mayores a 28°C	180	44,1
	11:00	33,3	54,1	HR diurnas		
	12:00	31,3	58,6			
	13:00	29,6	63,5			
	14:00	27,2	71,3	Entre 65 y 75 %	70	17,2
	15:00	25,2	78,4	Menores a 65%	159	39,0
	16:00	23,5	85,8	Mayores a 75%	179	43,9
17:00	22,4	89,3	Mayores a 65%	249	61,0	

¹Promedio de la temperatura y humedad relativa calculada para cada hora del día durante el total del experimento.

Anexo A.7. Resultados de la prueba de ecotoxicidad para el cultivo de lechuga.

Sustrato		Germinación máxima (%)	Plantas al final (%)	Longitud de planta (cm)	Biomasa seca (mg)
Tierra comercial (100% TC)					
TC	Rep. 1	61,9%	35,2%	8,9 ± 2,3	1771,7 ± 134
	Rep. 2	61,0%	43,8%	9,1 ± 2,2	1887,5 ± 133,4
Mezcla 75 % TC / 25 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	61,0%	41,0%	8,9 ± 2	2702,5 ± 163,3
	Rep. 2	68,6%	51,4%	7,6 ± 2,2	2460,3 ± 150,9
CF con PBAT	Rep. 1	61,9%	30,5%	7,6 ± 2	1284,3 ± 95,3
	Rep. 2	61,9%	61,0%	8,6 ± 3,1	3448,3 ± 230,4
CF sin BP	Rep. 1	67,6%	67,6%	10 ± 3,5	5183,7 ± 330,9
	Rep. 2	65,7%	64,8%	10,2 ± 3,2	5108,8 ± 300,1
Mezcla 50 % TC / 50 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	58,1%	48,6%	6,4 ± 1,9	1825,7 ± 134,9
	Rep. 2	37,1%	27,6%	7,3 ± 2,7	1010,3 ± 63
CF con PBAT	Rep. 1	34,3%	30,5%	7,1 ± 2,2	1296,5 ± 87,3
	Rep. 2	59,0%	59,0%	6,9 ± 2,2	2648,4 ± 160,8
CF sin BP	Rep. 1	54,3%	54,3%	7,7 ± 3,1	3927 ± 254,6
	Rep. 2	61,9%	61,0%	7,7 ± 2,6	3847,4 ± 218,1
Compost final (100% CF)					
CF sin BP	Rep. 1	49,5%	49,5%	4,9 ± 3,6	1032,9 ± 67,7
Tierra comercial (100% TC)					
TC	Rep. 1	45,7%	35,2%	6,8 ± 2,3	1853,2 ± 142,9
	Rep. 2	45,7%	34,3%	6,5 ± 2,1	1824,4 ± 125,3
Mezcla 75 % TC / 25 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	41,9%	40,0%	9,1 ± 1,5	1375,6 ± 139
	Rep. 2	50,5%	47,6%	9,5 ± 1,9	1785,4 ± 176,4
CF con PBAT	Rep. 1	53,3%	51,4%	8,8 ± 1,9	2145,3 ± 164,4
	Rep. 2	56,2%	52,4%	9 ± 1,8	2900,4 ± 259
CF sin BP	Rep. 1	53,3%	52,4%	11,2 ± 2,2	4191,5 ± 252
	Rep. 2	46,7%	46,7%	10,8 ± 2,7	7167,2 ± 504,6
Mezcla 50 % TC / 50 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	67,6%	60,0%	9,3 ± 1,9	1813,2 ± 194,8
	Rep. 2	36,2%	35,2%	8,1 ± 1,5	1013,3 ± 148,4
CF con PBAT	Rep. 1	49,5%	48,6%	8,3 ± 1,2	1841 ± 159,3
	Rep. 2	47,6%	44,8%	9,5 ± 2,1	3112,3 ± 205
CF sin BP	Rep. 1	76,2%	76,2%	10,8 ± 2,7	7167,2 ± 504,6
	Rep. 2	59,0%	56,2%	9 ± 2,1	3135,2 ± 312
Compost final (100% CF)					
CF sin BP	Rep. 1	64,8%	62,9%	8,3 ± 2,1	2755,7 ± 212,2
	Rep. 2	76,2%	59,0%	10,3 ± 2,1	3847,8 ± 237,2

Anexo A.8. Resultados de la prueba de ecotoxicidad para el cultivo de cebolla.

Sustrato		Germinación máxima (%)	Plantas al final (%)	Longitud de planta (cm)	Biomasa seca (mg)
Tierra comercial (100% TC)					
TC	Rep. 1	47,6%	42,9%	11,7 ± 3,6	1292,5 ± 90,3
	Rep. 2	59,0%	54,3%	13,9 ± 3,4	2282,1 ± 153,8
Mezcla 75 % TC / 25 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	58,1%	56,2%	8,4 ± 2,2	1370,8 ± 122,2
	Rep. 2	45,7%	41,9%	10,8 ± 3,3	1247,3 ± 105,7
CF con PBAT	Rep. 1	48,6%	38,1%	9,9 ± 3,1	1139,1 ± 87,9
	Rep. 2	38,1%	33,3%	9,6 ± 4,1	1029,9 ± 77
CF sin BP	Rep. 1	46,7%	41,0%	8,6 ± 3,6	1110 ± 75,1
	Rep. 2	34,3%	25,7%	9,3 ± 2,8	657,9 ± 49,9
Mezcla 50 % TC / 50 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	45,7%	41,0%	8,4 ± 2,3	1155,1 ± 92
	Rep. 2	41,0%	38,1%	9,5 ± 3,3	987,6 ± 85,8
CF con PBAT	Rep. 1	42,9%	31,4%	7,4 ± 3,6	695,3 ± 57,1
	Rep. 2	50,5%	41,0%	7,9 ± 3,2	886,6 ± 77,6
CF sin BP	Rep. 1	41,0%	25,7%	7,8 ± 3,5	566,8 ± 44
	Rep. 2	30,5%	22,9%	8,2 ± 3,1	527,3 ± 33,2
Compost final (100% CF)					
CF sin BP	Rep. 1	40,0%	23,8%	5,9 ± 2,4	489 ± 48
Tierra comercial (100% TC)					
TC	Rep. 1	38,1%	34,3%	11,8 ± 2,6	1233 ± 74,8
	Rep. 2	40,0%	36,2%	12,5 ± 3,4	1522,6 ± 99,3
Mezcla 75 % TC / 25 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	30,5%	24,8%	10,4 ± 2,6	652,4 ± 61,2
	Rep. 2	35,2%	35,2%	11,1 ± 2,8	1362,6 ± 78,5
CF con PBAT	Rep. 1	27,6%	21,0%	12,9 ± 3,3	788,2 ± 53,1
	Rep. 2	42,9%	40,0%	15,1 ± 4,5	2704,4 ± 161,9
CF sin BP	Rep. 1	48,6%	40,0%	9,9 ± 3,3	1200,2 ± 93,7
	Rep. 2	56,2%	49,5%	9,8 ± 2,6	834,5 ± 68,5
Mezcla 50 % TC / 50 % CF					
CF con PLA	Rep. 1	41,0%	29,5%	10,5 ± 3,1	1238,3 ± 80,8
	Rep. 2	40,0%	34,3%	9,3 ± 2,8	1312 ± 65,2
CF con PBAT	Rep. 1	29,5%	22,9%	12,6 ± 3,6	1061,5 ± 70,8
	Rep. 2	41,0%	29,5%	11,8 ± 3,7	1209,9 ± 78,9
CF sin BP	Rep. 1	52,4%	28,6%	9,8 ± 2,6	834,5 ± 68,5
	Rep. 2	52,4%	34,3%	10,6 ± 2,9	1101,6 ± 85,6
Compost final (100% CF)					
CF sin BP	Rep. 1	30,5%	28,6%	10,3 ± 2,8	1091,2 ± 69,7
	Rep. 2	39,0%	35,2%	12 ± 2,5	1795,7 ± 109,6

Anexo A.9. Imágenes ilustrativas del Objetivo Especifico 1.



Figura 42. Ubicación de sistemas de compostaje



Figura 43. Medición de temperatura interna de compost



Figura 44. Recubridor iónico de oro y carbón para muestras SEM

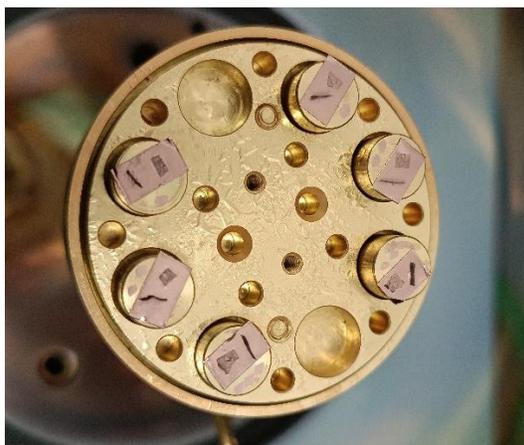


Figura 45. Muestras de bioplásticos recubiertas con oro



Figura 46. Secado de compost previo a tamizar

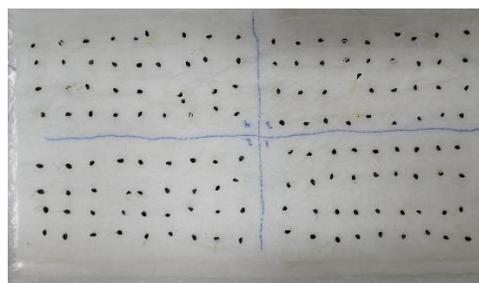


Figura 47. Tamizado de PBAT

Anexo A.10. Imágenes ilustrativas del Objetivo Especifico 3.



a)



b)

Figura 48. Prueba de germinación de semillas de a) lechuga y b) cebolla



a)



b)

Figura 49. Ensayo de ecotoxicidad a) invernadero utilizado, b) distribución de bandejas



a)



b)

Figura 50. Cosecha de a) cebolla y b) lechuga