



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

“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)”

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como requisito para optar por el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Yeymi Elizabeth Torrez Sequeira

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. Yeymi Elizabeth Torrez Sequeira
Candidata



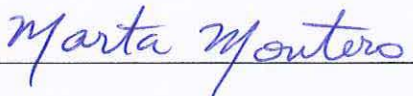
Beatriz Mazón Villegas, PhD.
Directora, Comité Asesor



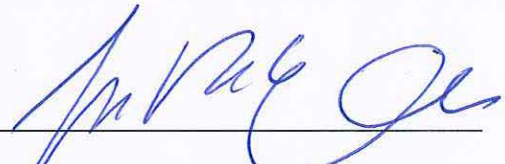
Gabriela Montes de Oca Vásquez, PhD
Miembro, Comité Asesor



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 mi madre, Etelvina.

A mi hermano, Brandon.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme finalizar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

A mi madre y hermano por su compañía, motivación, paciencia y apoyo brindado a lo largo de los años y por ser parte fundamental de este proceso. A mis gatos Kimi, Haru, Emi y Akira por la compañía, amor, felicidad y paz brindada.

A mi padre por su constante motivación y ser un ejemplo a seguir.

A mis tíos Silvia y Ronald, y mis primas Nisleydi, Darlyn y Yaritsa, por brindarme por su apoyo, motivación y por ser parte de mi proceso de crecimiento tanto personal, como profesional.

A Beatriz Mazón Villegas, directora del proyecto, por su amable orientación, apoyo incondicional, paciencia y asesoría brindada.

A Gabriela Montes de Oca, cuya guía, consejos, aportes y sugerencias fueron sumamente valiosas en este proyecto.

A Ana María, por todo el apoyo, sugerencias y recomendaciones brindadas.

A Diego Batista por capacitarme en el uso de los equipos y sus sugerencias.

A Silvia Fernández Fernández por ser mi amiga incondicional, por la ayuda, apoyo y constante motivación brindada en este proceso.

A Kevin Segura Rodríguez por su amistad y colaboración brindada durante el desarrollo del proyecto.

A todos esos amigos que tuve el privilegio de conocer y cada una de las personas especiales que conocí en este camino de preparación profesional.

Al Programa de CeNAT – CONARE por financiar este proyecto y brindarme la oportunidad de desarrollarlo en una institución tan prestigiosa, al LANOTEC por brindarme los insumos, equipos necesarios y apoyo durante el desarrollo del proyecto.

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.

Al Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) por su colaboración en el uso de la incubadora para desarrollar el ensayo de compostaje.

A la empresa DosMil50 Empaques Compostables por brindar los polímeros.

A Ensio Pérez por el apoyo brindado en uso de los laboratorios.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas (EIB-UCR) y a la Universidad de Costa Rica, por brindarme la posibilidad de formarme profesionalmente, así como a su sistema de becas, que me permitió culminar mis estudios de Licenciatura.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aplicaciones de los plásticos.....	1
1.2 Generación de residuos a nivel nacional	2
1.3 Beneficios del compostaje de empaques biodegradables.....	3
2. OBJETIVOS	5
2.1 Objetivo General	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 Antecedentes del problema	6
3.1.1 Sobre el uso de polímeros en la industria alimentaria en Costa Rica	7
3.1.2 Sobre la compostabilidad de biopolímeros	7
3.2 Fundamentos Teóricos	10
3.2.1 Empaques para alimentos	10
3.2.2 Plásticos convencionales.....	10
3.2.3 Plásticos degradables y biodegradables	10
3.2.4 Bioplásticos.....	10
3.2.5 Plásticos compostables.....	11
3.2.6 Análisis de caracterización de la degradación de polímeros.	12
3.2.7 Compostaje	15
3.2.8 Calidad del compost.....	16
3.2.9 Efectos fitotoxicidad en plantas	17

4. METODOLOGÍA.....	18
4.1 <i>Caracterización del proceso y el grado de desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015</i>	18
4.1.1 Materiales de investigación: Polímeros Biodegradables	18
4.1.2 Preparación de las muestras de los polímeros biodegradables para el proceso de compostaje.....	19
4.1.3 Proceso de preparación del compost según la norma UNE-EN ISO 20200:2015..	19
4.1.4 Proceso de compostaje y grado de desintegración de polímeros biodegradables según la norma UNE-EN ISO 20200:2015.	23
4.1.5 Caracterización de las muestras de los polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje.	27
4.1.6 Diseño experimental para la caracterización del proceso y el grado de desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015.....	28
4.2 Efecto de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost.	29
4.3 Evaluación mediante ensayos de fitotoxicidad de la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración de polímeros biodegradables usados como material de empaque para alimentos según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005.	30
4.4 Diseño experimental del estudio completo.	36
4.5 Análisis Estadístico	37
5. RESULTADOS	38
5.1 Caracterización del proceso de compostaje de polímeros biodegradables	38
5.1.1 Temperatura durante el periodo de incubación.....	38
5.1.2 Temperatura de los reactores de compostaje durante el periodo de incubación.....	39
5.1.3 Olor	41
5.1.4 Aspecto Visual	41

5.2	Reducción de los sólidos volátiles y el grado de desintegración de los biopolímeros (PLA y PBAT)	45
5.3	Grado de desintegración de los biopolímeros (PBA y PBAT).....	46
5.4	Caracterización de las muestras de los polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje.....	48
5.4.1	Muestras de los polímeros biodegradables para el análisis de la caracterización... 48	
5.4.2	Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)	50
5.4.3	Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)	53
5.4.4	Análisis Termogravimétrico (TGA)	56
5.4.5	Análisis de calorimetría de barrido diferencial (DSC)	59
5.5	Efecto de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost	62
5.6	Evaluación mediante ensayos de fitotoxicidad de la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración de polímeros biodegradables.....	72
5.6.1	Número máximo de plantas germinadas y número final de plantas	72
5.6.2	Apariencia visual de las bandejas de germinación	79
5.6.3	Biomasa húmeda.....	81
5.6.4	Resultados en la longitud de la raíz, del tallo y las hojas para las plantas de cebolla y lechuga.....	84
6.	CONCLUSIONES.....	88
7.	RECOMENDACIONES	91
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Microscopio electrónico de barrido JSM-6390LV, Jeol.-----	12
Figura 2. Espectrómetro infrarrojo Nicolet iS50 FT-IR, Thermo Fischer Scientific.-----	13
Figura 3. Analizador termogravimétrico TGA-Q500, TA Instruments.-----	14
Figura 4. Calorímetro diferencial de barrido DSC Q200, TA Instruments.-----	15
Figura 5. Tallo de lechuga con evidencia de clorosis, marchitez y necrosis de hojas basales, necrosis y estrangulación del cuello, podredumbres [51].-----	17
Figura 6. Presentación de los productos de la empresa DosMil50 Empaques Compostables de los polímeros biodegradables en estudio: a) Polímero biodegradable PLA y b) Polímero biodegradable PBAT.-----	19
Figura 7. Recipiente utilizado en la elaboración de 20 kg de residuo sintético.-----	22
Figura 8. Reactor de compostaje utilizados para el compostaje de polímeros biodegradables.--	23
Figura 9. Esquema del diseño experimental seguido para la desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015, los reactores de compostaje de cada tratamiento se indican como círculos enumerados del uno al seis.-----	29
Figura 10. Esquema de distribución de las dos combinaciones (g/g) de mezcla y sus repeticiones en cada bandeja de germinación (BG) para lechuga (L) en compost procedente del tratamiento PLA en combinación con tierra comercial (TC).-----	32
Figura 11. Diseño del invernadero utilizado en los ensayos de fitotoxicidad.-----	33
Figura 12. Delimitación de la raíz, tallo y hojas para la medición del crecimiento de las plantas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L).-----	34
Figura 13. Delimitación de la raíz, tallo y hojas medición del crecimiento de las plantas de cebolla (<i>Allium cepa</i> L).-----	34
Figura 14. Esquema del ensayo de fitotoxicidad: Las dos repeticiones del compost analizado resultante de los reactores cada tratamiento (PLA, PBAT y Control) se indican mediante círculos, cada repetición comprende las dos combinaciones (g/g) de mezcla, correspondientes a la misma especie de planta, además se muestran los controles de referencia y que combinaciones de mezcla se colocaron en la misma bandeja de germinación (BG).-----	35
Figura 15. Diagrama del diseño experimental del estudio completo: (1) proceso de compostaje de polímeros biodegradables, los reactores de compostaje de cada tratamiento se indican como	

círculos enumerados del uno al seis; (2), determinación de la influencia de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost; (3) prueba de fitotoxicidad. -----36

Figura 16. Temperatura máxima y mínima promedio por semana (S) dentro de la incubadora (INCUCCELL, 404 – ECO) durante del proceso de compostaje.-----38

Figura 17. Diagrama de bloques para las temperaturas de los reactores de compostaje de cada tratamiento, durante las 12 semanas de compostaje. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (prueba de Kruskal-Wallis, $p>0,05$). -----39

Figura 18. Temperatura promedio por semana de los reactores de compostaje de cada tratamiento.-----40

Figura 19. Diagrama de barras para reducción promedio del contenido de sólidos volátiles totales (%), R. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (prueba de Tukey HSD, $p>0,05$). -----46

Figura 20. Muestras de PLA extraídas de los reactores (de izquierda a derecha: reactor 1, reactor 2 y reactor 3) el día 11 del proceso de compostaje para el análisis de caracterización de los polímeros biodegradables. -----48

Figura 21. Morfología SEM del polímero biodegradable PLA durante el proceso de compostaje: a) vista frontal y b) vista transversal correspondientes al día 0; c) vista frontal, d) vista frontal, e) vista transversal y f) vista frontal correspondientes al día 11 del proceso. -----50

Figura 22. Micrografía electrónica de barrido de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón), primeras dos columnas en vista frontal y tercera columna en vista transversal, a diferentes días de compostaje (0, 11, 28, 42, 56, 73 y 84 días). -----52

Figura 23. Caracterización mediante análisis FT-IR del polímero PLA durante el compostaje de biopolímeros en los días: a) 0 y b) 11 del proceso de compostaje.-----54

Figura 24. Caracterización mediante análisis FT-IR de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el compostaje de biopolímeros en los días: 0, 11, 28, 42, 56, 72 y 84 del proceso. -----55

Figura 25. Termogramas del polímero biodegradable PLA a) TGA y b) DTG correspondientes a los días 0 y 11 del proceso de compostaje. -----57

Figura 26. Termogramas de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) a) TGA y b) DTG correspondientes a los días 0,11, 28 y 42 del proceso de compostaje; y c) TGA y d) DTG correspondientes a los días 0,56, 72 y 84 del proceso de compostaje.-----59

Figura 27. Termogramas DSC del polímero biodegradable PLA a) curvas de calentamiento y b) curvas de enfriamiento al inicio del compostaje y 11 días después. -----	60
Figura 28. Termogramas DSC de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón): a) curvas de calentamiento y b) curvas de enfriamiento para diferentes días de compostaje durante todo el proceso.-----	62
Figura 29. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (PLA, PBAT y Control) después del compostaje; y disminuyeron respecto a los valores iniciales del RS.-----	68
Figura 30. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (PLA, PBAT y Control) después del compostaje; y aumentaron respecto a los valores iniciales del RS. -----	69
Figura 31. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que presentaron diferencias significativas entre PBAT y Control después del compostaje; y su cambio respecto a los valores iniciales del RS. -----	70
Figura 32. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que presentaron diferencias significativas entre PLA y Control después del compostaje; y aumentaron respecto a los valores iniciales del RS.-----	71
Figura 33. Valores promedio de la máxima germinación y el número de plantas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y cebolla (<i>Allium cepa</i> L.) al final de ensayo para cada una de las combinaciones de la mezcla de compost y TC. -----	77
Figura 34. Diferencias porcentuales entre la germinación máxima y la cantidad de plantas al final de ensayo para las diferentes combinaciones de mezcla con respecto a los valores obtenidos para la tierra comercial (TC) para los cultivos de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y cebolla (<i>Allium cepa</i> L.), respectivamente. -----	78
Figura 35. Diferencias porcentuales de la biomasa húmeda, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la TC para lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y cebolla (<i>Allium cepa</i> L.), respectivamente. -----	83
Figura 36. Diferencias porcentuales de la longitud de la raíz, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la TC para lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y cebolla (<i>Allium cepa</i> L.), respectivamente. -----	85

Figura 37. Diferencias porcentuales de la longitud del tallo y hojas, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la tierra comercial (TC) para lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), respectivamente.-----87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los polímeros de investigación.....	18
Tabla 2. Denominación comercial o tipo de cada componente del residuo sintético.	20
Tabla 3. Cantidad de masa de cada componente para elaborar 20 kg de RS.....	22
Tabla 4. Monitoreo de parámetros y aireación del proceso de compostaje [53].	24
Tabla 5. Composición química de la tierra comercial Súper Tierra Ever Green.	30
Tabla 6. Cambio de color del residuo sintético de compostaje según la escala RGB durante los primeros 15 días del proceso.....	42
Tabla 7. Apariencia visual de los reactores en cada tratamiento (PLA, PBAT y Control) durante las 12 semanas (S) de duración del proceso de compostaje.....	43
Tabla 8. Reducción del contenido de sólidos volátiles.	45
Tabla 9. Grado de desintegración de cada biopolímero en los 6 reactores de compostaje.	47
Tabla 10. Apariencia visual de las muestras de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) extraídas para el análisis de la caracterización.	49
Tabla 11. Índice carbonilo (Ico) de la mezcla del polímero PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el tiempo (días) del proceso de compostaje.	56
Tabla 12. Resultados TGA del polímero biodegradable PLA durante el tiempo de duración del compostaje.	57
Tabla 13. Resultados TGA de la mezcla del polímero de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el tiempo (días) del proceso de compostaje.	58
Tabla 14. Valores promedio de las propiedades químicas y fisicoquímicas obtenidos mediante análisis químico de abonos orgánicos.....	63
Tabla 15. Contenidos mínimos de micronutrientes, expresados en mg/kg, de abonos con nutrientes principales y/o secundarios, para diversas aplicaciones [84].....	66
Tabla 16. Valor promedio del número de plantas máximas germinadas, plantas obtenidas al final del ensayo y el número de plantas pérdidas para cada combinación de la mezcla de abonos, correspondientes a cada especie de planta. La mezcla procede del compost de cada tratamiento (C _T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC).	75
Tabla 17. Apariencia visual de las plantas de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) de las bandejas de germinación, de una repetición, correspondientes a cada proporción (P) de mezcla. La mezcla	

procede del compost de cada tratamiento (C_T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC). Las fotografías corresponden al día de finalización del ensayo..... 80

Tabla 18. Apariencia visual de las plantas de cebolla (*Allium cepa* L.) de las bandejas de germinación, de una repetición, correspondientes a cada proporción (P) de mezcla. Las fotografías corresponden al día de finalización del ensayo. 81

Tabla 19. Biomasa húmeda promedio del número plantas obtenidas al final del ensayo para cada combinación de la mezcla de abonos, correspondientes a cada especie de planta. La mezcla procede del compost de cada tratamiento (CT), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC)..... 82

Tabla 20. Promedio de la longitud de la raíz, tallo y hojas de las plantas después de 21 días de germinado el 50% del grupo control de cada especie de planta (lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.)) correspondiente a cada proporción de mezcla entre el compost procedente de cada tratamiento (C_T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC). 84

RESUMEN

Los polímeros biodegradables son una alternativa para reducir el uso de plásticos desechables o de un solo uso. Sin embargo, la producción de polímeros biodegradables no garantiza un impacto mínimo en el medio ambiente, por lo tanto, el proceso de producción y la eliminación final deben ser controlados y regulados adecuadamente. El compostaje es una tecnología que permite el procesamiento de materiales de empaque biodegradables, produciendo compost como producto y promoviendo una economía circular. La norma UNE-EN ISO 20200:2015 permite determinar el grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio. La norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 permite evaluar la calidad del compost mediante ensayos de fitotoxicidad, en diferentes combinaciones de mezcla de tierra comercial (TC) y compost producido del compostaje de biopolímeros.

En el presente estudio, se caracterizó el proceso, el grado de desintegración y la calidad del compost obtenido del compostaje de polímeros biodegradables utilizados en la agroindustria para el empaque de alimentos, específicamente (Ácido poliláctico) PLA y poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato) PBAT, en condiciones de laboratorio. El compostaje de los polímeros y un grupo control (sin adición de polímeros) se realizó a escala de laboratorio, en condiciones termofílicas a 58 °C, durante 12 semanas, según lo estipulado en la norma UNE-EN ISO 20200:2015. Durante el proceso de compostaje se extrajeron muestras de ambos polímeros para caracterizar su degradación mediante análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC). La influencia de la degradación de los polímeros biodegradables en la composición del compost se determinó primero ejecutando un análisis químico. Los resultados de este se compararon con los resultados obtenidos de los mismos análisis químicos ejecutados en el grupo control mediante un análisis estadístico. Además, la calidad del compost se evaluó mediante ensayos de fitotoxicidad en el laboratorio según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 en plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.).

El PLA se desintegró en un 100% y el PBAT en un 99,43%. Las imágenes SEM evidenciaron que los polímeros se degradaron durante el proceso de compostaje. Los análisis FTIR muestran disminución de la absorbancia en el grupo carbonilo localizado en la longitud de onda 1750 cm^{-1} y 1715 cm^{-1} , del PLA y PBAT respectivamente. Estos resultados evidencian degradación. El

análisis TGA mostró una disminución en la estabilidad térmica del PLA, dado que la temperatura de a la que se alcanza el 5% de pérdida de masa, disminuyó en un 26% pasando de 293,8 °C a 217,5 °C después de 11 días de compostaje. El PBAT evidenció que es una mezcla polimérica de PBAT, PLA y almidón de maíz; además mostró que el pico de degradación del PLA de la mezcla se redujo de 312,56 °C a 305,23 °C; y el correspondiente a PBAT pasó de 398,09 a 394,97 °C. El análisis de DCS confirmó que el PLA es un polímero semicristalino, cuya temperatura de fusión disminuyó de 151,97 °C a 147,99 °C, durante el compostaje. Este resultado evidencia la degradación. El PBAT muestra que es una mezcla casi amorfa, por lo tanto, no se presentan cambios en las curvas DSC a pesar de la presencia de PLA y PBAT en la mezcla.

Al finalizar el proceso de compostaje los atributos químicos y fisicoquímicos evaluados que no presentaron diferencias con respecto al grupo control fueron el CH, C, MO, C/N, N, Ca, Mg, Fe, Zn y Mn; mientras que el pH, Cu, P, K, S, B y CE si reportaron diferencias significativas. El ensayo de fitotoxicidad consistió en 105 semillas por mezcla. Un total de 77 semillas por mezcla se mantuvo durante todo el ensayo en las plantas de lechuga, mientras que un total de 46 semillas se mantuvo en las plantas de cebolla. El compostaje de polímeros biodegradables es un método alternativo promisorio para promover la economía circular y reducir el impacto ambiental como resultado del uso de empaques fabricados de polímeros biodegradables.

Palabras Clave: Polímeros; Biodegradabilidad; Compost; Calidad; Empaques; Alimentos

1. INTRODUCCIÓN

1.1 *Aplicaciones de los plásticos*

El plástico es la base para la fabricación de diversos empaques utilizados en diferentes industrias. Kale et al [1], señalaron que, si los materiales de empaque se ensucian con alimentos u otras sustancias biológicas, el reciclaje físico de estos materiales resulta poco práctico y generalmente indeseable. Esta situación se presenta principalmente en la industria alimentaria. La implementación de empaques biodegradables es una alternativa prometedora para reducir el impacto ambiental a través del proceso de degradación. Además de reducir los residuos sólidos mediante el compostaje, se disminuyen problemas como el vertido y reprocesamiento de estos materiales [1]. Una gestión adecuada de los residuos en las distintas etapas posteriores a la generación de los desechos puede reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud, y disminuir la presión sobre los recursos naturales.

Los polímeros o plásticos son parte de la vida moderna y constituyen la materia prima base para la elaboración de una gran variedad de empaques. Por tal motivo, los plásticos son parte fundamental del sistema de trasiego de productos ya que estos contienen tanto alimentos como productos no comestibles. Los plásticos están compuestos de polímeros que pueden ser de origen biológico, sintético o semi-sintético provenientes del petróleo, siendo estos últimos los más utilizados a nivel mundial [2]. Los residuos plásticos representan una grave amenaza medioambiental debido a su abundancia, persistencia en el medio ambiente y falta de un adecuado sistema de recuperación, reciclado y reutilización [3]. Por ejemplo, en el año 2018 en Estados Unidos se generaron 35,68 millones de toneladas de residuos plásticos [4], de los cuales los contenedores y materiales de empaque representaron el 40,7%, empaques de alimentos duraderos el 38,4% y empaques de alimentos no duraderos como platos y vasos 20,9%. Cabe resaltar que de estos residuos el 88,1% corresponde a plásticos sintéticos no degradables como polietileno de alta y de baja densidad (HDPE y LDPE, por sus siglas en inglés), el polipropileno (PP), el cloruro de polivinilo (PVC), el poliestireno (PS) y el polietileno tereftalato (PET). Mientras que solo el 0,3% constituye un biopolímero biodegradable conocido como ácido poliláctico (PLA) y el restante 11,6% hace referencia a otras resinas no especificadas.

Los plásticos de base biológica o bioplásticos representan una alternativa para solventar los problemas de sostenibilidad y los desafíos medioambientales provocados por la producción y eliminación de plásticos sintéticos [5]. Los bioplásticos pueden ser biodegradables o compostables; tanto la biodegradabilidad, como la compostabilidad dependen de la estructura química más que de la fuente de materia prima [6]. Dicho de otra manera, no todo bioplástico o biopolímero es biodegradable.

Los materiales biodegradables se pueden degradar en la naturaleza o en el campo, mediante la acción combinada de dos mecanismos: fotodegradación de plásticos debido a la exposición a la radiación solar; y biodegradación causada por microorganismos del suelo [7]. Entre los plásticos biodegradables provenientes de recursos naturales se encuentran el ácido poliláctico (PLA), polihidroxicanoatos (PHA), polihidroxibutirano (PHB), polisacáridos derivados y poliaminoácidos; entre los derivados del petróleo se mencionan el poli (ϵ -caprolactona) (PCL), poli (succinato / adipato de butileno) (PBS/A) y poli (adipato-tereftalato de butileno) (PBA/T) [2].

1.2 Generación de residuos a nivel nacional

En el 2018 en Costa Rica, la generación diaria a nivel nacional de residuos sólidos fue de 3 900 toneladas, que equivalen a 1 313 000 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) [8]. De los cuales los residuos orgánicos son el elemento mayoritario con el 53%, seguidos de materiales reutilizables con un 33% (plásticos 10,2%, papel y cartón 10,4%) y los que deben ir a disposición final 14%.

Dentro de este marco, se llevó a cabo un estudio en cuatro municipios (San José, Alajuela, Belén y Barva) del Gran Área Metropolitana (GAM) [9]. Según este estudio la tasa de generación promedio ponderada de residuos sólidos, en la zona de estudio, es de 0,59 kg/hab-día. De los desechos sólidos generados, los residuos orgánicos son el elemento mayoritario con el 55,9%, seguidos de materiales con alto potencial para ser reciclados o utilizados como combustibles (plásticos 10,2%, papel y cartón 10,4%). De este estudio se concluye que los residuos generados a nivel nacional tienen una distribución porcentual de los componentes similar. Esto muestra que en Costa Rica la cantidad de residuos biodegradables representa entre el 50% y 56%. Además, se menciona que el 10% de los residuos nacionales corresponde a plásticos, sin embargo, es

necesario clasificar estos resultados con el objetivo de distinguir los plásticos biodegradables, de los que no lo son, para definir el correcto manejo de este tipo de residuos. Por consiguiente, el compostaje representa una valiosa alternativa agroambiental que puede solucionar el problema de contaminación provocado por la acumulación de residuos biodegradables [10].

Por otra parte, la presencia de desechos orgánicos en los vertederos sanitarios es un gran problema dado que durante el proceso de descomposición de los desechos se generan lixiviados y se liberan varios gases, incluido el metano [11]. El metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero, que se genera como resultado de la descomposición anaerobia de los residuos sólidos en los vertederos. Debido a la relación entre el metano y su potencial de calentamiento, hace que sus emisiones al medio ambiente sean más contaminantes que las emisiones de dióxido de carbono [12]. Por otra parte, el lixiviado es considerado como un líquido contaminante del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas, producto de la percolación y escorrentía superficial, respectivamente [13].

Por lo tanto, con la implementación del compostaje como método de tratamiento de residuos orgánicos, los desechos sólidos en los vertederos se reducen en un ~50% [10]. Lo que implica que las emisiones de CO_2 y CH_4 , así como los lixiviados y los costos de operación de los vertederos se reducirían considerablemente. Cabe señalar que este método debe considerarse en un sistema de manejo integral de residuos. Sistema en el que los desechos se separan, recolectan y clasifican correctamente, de manera que se utilicen eficazmente métodos de reciclaje, compostaje y vertido sanitario, minimizando el impacto negativo en el medio ambiente.

1.3 Beneficios del compostaje de empaques biodegradables

El compostaje permite tratar los materiales de empaques biodegradables que en comparación con la clasificación y el reprocesamiento para su reciclaje requiere menos energía [1]; aunque el compostaje consume más energía que hacer el depósito en un vertedero. Sin embargo, mediante el compostaje se reduce el impacto ambiental y se obtiene como producto abono orgánico que puede generar beneficios económicos. Además, puede desencadenar otras actividades rentables que beneficien a la comunidad, como el establecimiento de un vivero o jardín para el turismo y la misma comunidad [14]. Así como la opción de brindar servicios de tratamiento de residuos compostables de diferentes industrias. Para un aprovechamiento económico del compost, se debe

garantizar su calidad. La calidad del compost no es un concepto absoluto, sino que dependiendo de su uso o implementación se puede definir como “la capacidad o aptitud del compost para satisfacer las necesidades de las plantas, con un mínimo impacto ambiental y sin riesgo para la salud pública” [15].

Los polímeros biodegradables mediante compostaje son una alternativa para reducir la utilización de plásticos de un solo uso [16]. Sin embargo, la producción de polímeros biodegradables no es garantía de un impacto ambiental mínimo, por lo tanto, deben considerarse cuidadosamente el proceso de producción y la eliminación final. Esto con el objetivo de gestionar adecuadamente estos materiales para reducir la acumulación de polímeros en el medio ambiente y disminuir la presión sobre los recursos naturales. Bajo la premisa de que la industria, el gobierno y los consumidores deben promover y adoptar este método alternativo [1], fomentando de este modo la cultura del compostaje, el uso de materiales compostables o biodegradables, su correcta disposición y tratamiento final.

Las pruebas de biodegradabilidad son necesarias para evaluar el impacto ambiental a largo plazo de los materiales biodegradables y encontrar soluciones reales para evitar la acumulación de polímeros en el medio ambiente [17]. Esto aportará beneficios a la sociedad, ya que brindará información relevante para el establecimiento y fortalecimiento del marco legal enfocado en los sistemas de gestión de residuos sólidos [18], especialmente de los empaques compostables, lo que permitirá ayudar a la generación de pautas necesarias para el adecuado manejo desde la generación de estos desechos hasta la disposición final. Cabe destacar que la forma que Costa Rica utiliza los materiales es fundamental para el futuro económico y medioambiental [19], esto incluye la gestión de residuos sólidos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar el proceso, el grado de desintegración y la calidad del compost obtenido del compostaje de polímeros biodegradables (PLA y PBAT) utilizados en el empaque de alimentos en condiciones de laboratorio.

2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar el proceso y el grado de desintegración durante la degradación de polímeros biodegradables utilizados como material de empaque para alimentos en condiciones de laboratorio, según la norma UNE-EN ISO 20200:2015.
2. Analizar la influencia de la degradación de polímeros biodegradables utilizados como material de empaque para alimentos en la composición del compost.
3. Evaluar mediante ensayos de fitotoxicidad en laboratorio según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración de polímeros biodegradables usados como material de empaque para alimentos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes del problema

En septiembre de 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) aprobó en Nueva York la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. La agenda está conformada por 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) enfocados en tres dimensiones: económica, social y ambiental. En septiembre de 2016, Costa Rica se convirtió en el primer país del mundo en suscribir un Pacto Nacional por los ODS. Especialmente en lo que respecta a la dimensión ambiental, se tiene el ODS número 12 que contempla impulsar especialmente a las grandes empresas, a adoptar prácticas de desarrollo sostenible. Así como reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización [20], a través diferentes métodos, entre ellos el compostaje. De manera similar el ODS número 13 toma en cuenta la educación, la conciencia y las capacidades humanas e institucionales para la mitigación del cambio climático y la adaptación a este [21]. Por ello, el país ha formulado diversos planes y estrategias a nivel nacional para promover el logro de las metas de los ODS, reduciendo así el impacto negativo en el medio ambiente mediante la mitigación y adaptación al cambio climático.

Dentro de este marco, en el año 2017 en Costa Rica se establece la Estrategia nacional de sustitución de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021. Esta fue formulada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Ministerio de Salud (Minsa) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). El principal sustento de la estrategia lo da la Ley de gestión integral de residuos sólidos número 8839 y su reglamento, Decreto 37567. Además, forma parte del Plan nacional para la gestión integral de residuos 2016– 2021, la Política nacional para la gestión integral de residuos 2010-2021 y la Estrategia nacional de separación, recuperación y valorización de residuos.

Asimismo, con el fin de mejorar la gestión de residuos, el Gobierno de la República ha impulsado el Plan de Acción para la Gestión Integrada de Residuos 2019-2022 [22] y el Plan Nacional de Compostaje 2020-2050 [23], promoviendo así una economía circular. La visión es eliminar la materia orgánica en los rellenos sanitarios de Costa Rica para el 2030 y sensibilizar a la sociedad para su adecuado manejo. El aporte de conocimientos y herramientas de gestión de residuos a los costarricenses es una de las estrategias para llevar a cabo este plan.

3.1.1 Sobre el uso de polímeros en la industria alimentaria en Costa Rica

Según PROCOMER [24], la industria de fabricación de plásticos desechables (bolsas, envases, paletizado de plásticos, otros) en Costa Rica está compuesto por 56 empresas. Se estima que 43 empresas utilizan plástico amigable con el medio ambiente: reciclable (23 empresas), biodegradable (23 empresas) y / o compostable (12 empresas). Aproximadamente 31 empresas declararon que podían reemplazar todos los productos con opciones amigables, sin embargo, una de las principales limitaciones era la baja capacidad de los clientes para pagar estos productos. Además, la falta de instalaciones de compostaje industrial y la estandarización de los métodos de compostaje doméstico genera un desaprovechamiento de las condiciones de compostaje de los biopolímeros, aspectos que limitan el desarrollo de este campo.

Da Luz Castro [25], indica que en Costa Rica el 24% de la producción de la industria del plástico tiene como mercado final la industria alimentaria. También señala que los plásticos empleados en alimentos se deben analizar y caracterizar correctamente para garantizar que el alimento no se altere y se mantenga su inocuidad. Además, indica que los polímeros más empleados en la industria alimentaria son polietileno tereftalato (PET), el polietileno de alta y de baja densidad (HDPE y LDPE, por sus siglas en inglés), policloruro de polivinilo (PVC), polipropileno (PP), el poliestireno (PS), poliamidas (nylon 6), alcohol etilvinílico, poliuretano (PU) y celofán.

De acuerdo con los autores antes mencionados, la mayoría de los polímeros empleados en Costa Rica no son biodegradables, por lo que es necesario que la industria del plástico sustituya su producción por materiales renovables no derivados del petróleo, biodegradables y compostables [24]. Estas alternativas si bien son amigables con el medioambiente, requieren de un manejo adecuado, ya que una mala gestión de los residuos plásticos tendría como consecuencia el mismo daño ambiental que los ocasionados por los productos plásticos tradicionales [24].

3.1.2 Sobre la compostabilidad de biopolímeros

El compostaje permite la biodegradación de la materia orgánica, y el producto final generado es el compost o abono orgánico [26]. Por tanto, el compostaje de polímeros biodegradables es una alternativa prometedora para reducir el impacto en el medio ambiente, permitiendo el aprovechamiento del polímero al final de su vida útil y la promoción de un sistema de economía circular [1], [18], [27].

Adamcová et al [18], analizaron el comportamiento de biopolímeros certificados a escala de laboratorio y familiar. Los resultados determinaron que las muestras poliméricas certificadas como compostables se degradaron en condiciones de laboratorio, sin embargo, en compostaje doméstico mostraron una baja descomposición. Esto demuestra que existe una diferencia entre el compostaje en condiciones domésticas y en condiciones de laboratorio. De este estudio se destaca la importancia de estudiar las condiciones de compostaje que permitan la degradación del biopolímero, para transmitir esta información, ya sea a nivel industrial y/o del hogar. En esta investigación también se indica que la muestra polimérica etiquetada por el productor como "100% degradable" no mostró ningún signo visual de degradación en las condiciones del estudio. Este resultado es relevante porque permite visualizar la necesidad de formular políticas, legislación y reglamentos que regulen la venta y el uso de polímeros biodegradables, para guiar sobre el correcto compostaje, entre otros.

En el mismo estudio se analizó el efecto de la biodegradación/desintegración de las muestras poliméricas en la calidad del abono mediante pruebas de fitotoxicidad utilizando *Sinapis alba L.* y *Hordeum vulgare L.* Las semillas no germinaron en el 81% de las macetas iniciadas. En conclusión, el pH promedio de 3,5 en condiciones de laboratorio es bajo para evaluar el impacto de las muestras en la calidad del abono. Por tal motivo, el pH es un parámetro que tiene efecto en el análisis de calidad del abono resultante del proceso de compostaje de polímeros biodegradables.

Lv, et al [28], estudiaron la degradación del PLA puro y una mezcla de polímeros 30:70 (almidón: PLA) en un ambiente de suelo real durante 70 días, para lo cual fabricaron probetas o barras de estos materiales. Las muestras se enterraron entre 10 y 15 cm por debajo de la superficie del suelo. Al final de la prueba, el análisis FT-IR encontró que los grupos carbonilo (C=O) de ambos polímeros disminuyeron, lo que indica que las muestras se degradaron y que la degradación se produjo en los grupos éster de los polímeros. Según los resultados de FT-IR y SEM, la mezcla de almidón y PLA presentó una mayor degradación que el PLA puro. Lo que indica que la adición de almidón favoreció la desintegración del material. También, Phetwarotai et al [29], al analizar la biodegradación de películas de mezcla de PLA y almidón gelatinizado, encontraron que las tasas de biodegradación de las películas aumentaron al aumentar el contenido de almidón, las dimensiones de las películas de polímeros era de 15 mm, 150 mm,

250 μm , además reportan que la alteración del aspecto físico, la morfología SEM y las propiedades de tracción de las películas de PLA puro tras la biodegradación bajo tierra fue insignificante.

Palsikowski et al [30] estudió de biodegradación, en el suelo durante 360 días, en un contenedor cerrado mantenido a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) polímeros de PLA y PBAT y sus mezclas, compatibilizadas con extensor de cadena (agente de acoplamiento y reacciona con el polímero para aumentar el peso molecular). En búsqueda de acelerar la biodegradación del PLA en el suelo. Las muestras se mezclaron en las proporciones 100% (PLA), 75:25 (PLA: PBAT), 25:75 (PLA: PBAT), y 100% (PBAT), las películas de estas combinaciones de mezcla eran de 3 x 3 cm y un grosor de $\sim 0,3$ mm. El estudio mostró la gran complejidad del proceso de biodegradación de las mezclas de PLA y PBAT cuando se compatibilizan con un extensor de cadena. Las mezclas mostraron un comportamiento intermedio en comparación con los polímeros originales. Sin embargo, no lograron la expectativa de acelerar la biodegradación del PLA.

En Costa Rica se realizó un estudio [31] sobre la capacidad de biodegradación de PLA, en condiciones de compostaje casero a 25 ± 5 °C. Las muestras del material se extrajeron de vasos desechables, cortados en fragmentos de 2×2 cm. Luego de 78 semanas en compostaje casero los vasos de PLA no presentaron ningún indicio de degradación. Los resultados de los estudios mencionados muestran la importancia de las condiciones de compostaje y las características del polímero a desintegrar mediante este. Además, revelan que el hecho de que un polímero no se degrade en condiciones caseras no significa que no sea degradable en condiciones de laboratorio o industriales.

3.2 *Fundamentos Teóricos*

3.2.1 **Empaques para alimentos**

El empaque es un sistema de elementos que promueve la distribución, almacenamiento, comunicación, presentación, uso y eliminación de productos empacados [32]. Los empaques empleados en la industria alimentaria deben seguir estrictas normas y cuidados para asegurar la calidad, la inocuidad y la protección de los alimentos antes de su consumo [25].

3.2.2 **Plásticos convencionales**

Tijera Martínez [33], indica que plásticos o polímeros convencionales son aquellos derivados del petróleo, estos son materiales sintéticos compuestos por macromoléculas de polímeros y poseen un alto grado de resistencia al medio ambiente. Razón por la cual no pueden reintroducirse a los ciclos naturales y pueden perdurar en la tierra por muchos años. Por este motivo, se consideran altamente contaminantes, y dado que su fuente es un recurso no renovable, se buscan cada vez más métodos alternativos para reemplazar el uso de polímeros convencionales.

3.2.3 **Plásticos degradables y biodegradables**

De acuerdo con las disposiciones de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), los plásticos degradables son polímeros cuya estructura química cambia bajo condiciones ambientales específicas, resultando en una pérdida significativa de sus propiedades físicas y mecánicas [34]. Considerando lo anterior, los plásticos biodegradables son aquellos que pueden degradarse a dióxido de carbono, agua y biomasa debido a la acción de vida de los microorganismos como las bacterias, los hongos y las algas o enzimas producidas por estos microorganismos [34], [35].

3.2.4 **Bioplásticos**

Niaounakis [36], señala que en la definición de biopolímero o bioplástico sobresalen dos criterios. El primer criterio se basa en el origen de la materia prima, las cuales pueden ser de origen sintético o natural y que pueden ser moldeados o procesados en una gran variedad de formas, aplicando calor y presión [33]. El segundo criterio se basa en la degradabilidad del polímero la diferencia radica en los tres tipos de biopolímeros:

- a) Los biopolímeros de materias primas renovables (biobasados) y son biodegradables: Estos biopolímeros pueden ser producidos por sistemas biológicos (microorganismos, plantas y animales), o sintetizados químicamente a partir de materiales biológicos de partida (por ejemplo, maíz, azúcar, almidón, otros). En estos polímeros se incluyen: el ácido poliláctico (PLA); los polihidroxialcanoatos (PHAs); y biopolímeros de origen natural, como el almidón o las proteínas.

- b) Los biopolímeros que se derivan de materias primas renovables (biobasados) y no son biodegradables. Entre estos se incluyen: polímeros sintéticos de recursos renovables como poliamidas del aceite de ricino (poliamida 11), poliésteres del biopropanediol, el biopolietileno (bio-PEBD, bio-HDPE), el biopolipropileno (PP) o el biopolivinilcloruro (bio-PVC) basados en el bioetanol (por ejemplo, de la caña de azúcar) y biopolímeros naturales como el caucho o el ámbar naturales.

- c) Los biopolímeros provenientes de fuentes fósiles y son biodegradables: Se producen a partir de combustibles fósiles, como los poliésteres alifáticos sintéticos fabricados a partir de petróleo crudo o gas natural. Entre estos se incluyen: El poli(ϵ -caprolactona) (PCL), el poli (succinato de butileno) (PBS), el adipato-tereftalato de polibutileno (PBAT) y ciertos copoliésteres "alifáticos-aromáticos".

3.2.5 Plásticos compostables

Un plástico compostable según la ASTM, es un material que sufre degradación biológica y se transforma en dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a una velocidad similar a otros materiales compostables conocidos, sin dejar residuos tóxicos [37]. Cabe señalar que no todos los polímeros biodegradables son compostables, es decir, no todos son degradados por los procesos biológicos durante el compostaje [25].

Cualquier polímero compostable que cumpla los requerimientos de las normas ISO y ASTM tiene las siguientes características: (i) Se desintegra rápidamente durante el compostaje, por lo que no se encontrarán grandes fragmentos de plástico al final del proceso; (ii) En condiciones adecuadas de compostaje se biodegrada rápidamente; (iii) No disminuye el valor del compost

terminado y puede mantener vida vegetal y (iv) Los metales o cualquier material tóxico se encuentran dentro de los límites permitidos [16], [37].

3.2.6 Análisis de caracterización de la degradación de polímeros.

Para determinar la eficiencia de la degradación de un polímero se emplean análisis cualitativos como (SEM, FT-IR, TGA y DSC) [38]. Estos análisis son empleados para evidenciar la biodegradación que sufren los polímeros en un proceso de compostaje [39].

3.2.6.1 Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes SEM muestran la morfología de la superficie de las muestras [40], permitiendo evaluar cambios morfológicos de la superficie de los polímeros después de un proceso de degradación [38], [41], como es la biodegradación del polímero mediante el compostaje. Previo al análisis, la superficie de las muestras deben revestirse con un baño de oro [39] [40], con una capa de aproximadamente 2 a 40 nm de espesor, para evitar la acumulación de electrones durante el análisis [39], evitando la alteración en la estructura de la muestra, permitiendo la obtención de imágenes de alta calidad. La Figura 1 muestra el equipo empleado para el análisis SEM.



Figura 1. Microscopio electrónico de barrido JSM-6390LV, Jeol.

3.2.6.2 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

El análisis FT-IR estudia la absorción o emisión de energía radiante provocada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio [42]. La Figura 2 muestra el equipo empleado para el análisis FT-IR. En un espectro infrarrojo se puede identificar las bandas de absorción características de los grupos funcionales de los polímeros, por ejemplo, los picos en las longitudes de onda 1720 cm^{-1} y 910 cm^{-1} , o cercanos a esta, corresponden al grupo carbonilo y los grupos éster presente en la mezcla de PLA con PBAT [43]. Los cambios químicos en los polímeros debido al proceso de degradación pueden evaluarse mediante cambios en la intensidad de absorción del material [38] evidenciado mediante el espectro infrarrojo. Estos cambios se determinan analizando la muestra inicial como punto de partida (antes del proceso de degradación) y después del proceso de degradación, por ejemplo, mediante el compostaje de polímeros biodegradables. Los datos se pueden recopilar utilizando escalas de absorbancia o transmitancia el rango de 400 a 4000 cm^{-1} [38]. Además, se puede determinar cuantitativamente la degradación del polímero empleando las lecturas de los espectros infrarrojos en la determinación del índice de carbonilo calculado como la relación entre el área del pico de carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) y el área de la banda del pico CH, elegida como referencia [30].



Figura 2. Espectrómetro infrarrojo Nicolet iS50 FT-IR, Thermo Fischer Scientific.

3.2.6.3 *Análisis termogravimétrico (TGA)*

El análisis TGA es empleado para determinar el comportamiento de la degradación térmica [44]. Este muestra como varía la masa de la muestra en función de la temperatura [45] permitiendo analizar la degradación y estabilidad térmica de los polímeros y determinando la temperatura de descomposición del polímero [38], [44], [46]. Cabe resaltar que si el termograma muestra un comportamiento de degradación en dos pasos, indica que el polímero analizado es una mezcla [39]. La Figura 3 muestra el equipo empleado para el análisis TGA.



Figura 3. Analizador termogravimétrico TGA-Q500, TA Instruments.

3.2.6.4 *Calorimetría diferencial de barrido (DSC)*

El análisis DSC permite determinar propiedades térmicas de los polímeros como la temperatura de transición vítrea primaria, las temperaturas y entalpías de cristalización en frío y las temperaturas y entalpías de fusión [38]. Además, a partir del análisis calorimétrico se puede analizar la compatibilidad entre las fases de los poliésteres como PLA y PBAT, en la determinación de las temperaturas de cristalización y fusión [43]. La Figura 4 muestra el equipo empleado para el DSC.



Figura 4. Calorímetro diferencial de barrido DSC Q200, TA Instruments.

3.2.7 Compostaje

El compostaje es una de las tecnologías que permite la biodegradación aeróbica controlada de la materia orgánica antes de ser incorporada al suelo y cuyo producto final es el compost o abono orgánico [26].

Las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje [47], son las siguientes:

- **Relación carbono-nitrógeno:** Corresponde a la división entre la masa de carbono orgánico y la masa de nitrógeno orgánico, normalmente expresada como C/N.
- **El oxígeno disponible:** Para mantener niveles de oxígeno aceptables, se puede utilizar diferentes métodos como; la ventilación forzada, el mezclado y/o volteo.
- **La humedad:** La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50-70%, por lo tanto, es importante mantener la humedad dentro de este rango durante el compostaje.
- **La temperatura:** Cada microorganismo tiene un rango de temperatura óptimo en el que su actividad es máxima y efectiva: 15-40 °C para microorganismos mesófilos y 40-70 °C para los termófilos.
- **El pH:** El rango óptimo para el desarrollo de la actividad microbiana está entre 6,5 y 8,0, aunque el proceso puede operar hasta valores de pH de 5 o 9 a menor velocidad.
- **Las características físicas del medio:** Depende de los residuos a compostar. Las propiedades físicas pueden afectar la aireación, la retención de agua y de calor entre

otros. Las tres propiedades físicas principales referentes a la mezcla genérica que formará el compost (no a cada material en sí) son: La porosidad, la textura y la estructura.

3.2.8 Calidad del compost

Ansorena J et al [15], establecen que la calidad del compost se puede determinar con criterios agronómicos y legales. La calidad agronómica hace referencia a la capacidad del compost para suplir los requerimientos nutricionales de las plantas, con un impacto mínimo en el medio ambiente y sin dañar la salud. La calidad legal se aplica al bono que se va a comercializar, implementando la legislación que indica el uso que puede darse al abono según sus propiedades. Por ejemplo, según la legislación española, el contenido de metales pesados de un compost determina si se puede utilizar como componente de matriz para cultivos hortícolas comestibles, para el sellado de rellenos sanitarios o para la restauración de suelos degradados por actividades industriales o mineras.

Por esta razón es importante que en Costa Rica se establezcan normativas que permitan regular la venta de compost, de manera que se inste a las empresas o pequeños productores de este insumo, a brindar productos de calidad acorde con su uso. En el caso del compostaje de polímeros estas regulaciones deben indicar cuales son los límites máximos permitidos del abono resultante, así como las pruebas necesarias que indiquen su composición para que pueda ser comercializado.

Generalmente, la calidad del compost para un propósito determinado se puede determinar de dos formas. El primer método consiste en medir la respuesta de las plantas a diferentes dosis de compost, según la producción de biomasa, crecimiento de las raíces y número de hojas o de flores [15]. El segundo método se basa en la medición de un conjunto de características, algunas de las cuales, pueden ser evaluadas sensorialmente como las organolépticas (olor, color, textura, tamaño de partícula, presencia de elementos impropios tales como plásticos, vidrio, etc.). Mientras que las propiedades físicas, químicas y biológicas (densidad, porosidad, aireación, pH, conductividad eléctrica, contenido de humedad, nutrientes, metales pesados, contaminación bacteriológica, etc.), suelen ser determinadas en el laboratorio [10], [15]. Por ello, para determinar los posibles usos del compost no basta con conocer sus propiedades, sino que es necesario determinarlas en distintas proporciones de mezcla con otros componentes (sustratos) o

con el medio receptor (enmiendas y abonos), seleccionando la combinación con mejores características [15].

3.2.9 Efectos fitotoxicidad en plantas

Algunos indicadores de fitotoxicidad en las plantas son clorosis, necrosis, marchitamiento, deformaciones de las hojas y del tallo [48]. En la Figura 5 se puede observar algunos de estos indicadores. La clorosis se debe a la falta de clorofila, produciendo un color amarillento en las hojas, puede ser causada por diversos factores como deficiencias nutricionales, mal drenaje, raíces compactas y dañadas [49]. La necrosis es la muerte de tejido foliar, de fácil identificación por la aparición de un color negruzco y deja de producir hojas nuevas [50]. Deformaciones en las plantas de lechuga pueden presentar protuberancias, engrosamiento de los nervios y las plantas toman un aspecto enano o raquítrico [51]. Mientras que en las plantas de cebolla se presentan deformaciones en las hojas. Estas crecen de forma desordenada como si se marchitasen y se vuelven cloróticas [52], es decir, amarillentas.



Figura 5. Tallo de lechuga con evidencia de clorosis, marchitez y necrosis de hojas basales, necrosis y estrangulación del cuello, podredumbres [51].

4. METODOLOGÍA

4.1 Caracterización del proceso y el grado de desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015

La caracterización del proceso y el grado de desintegración de dos polímeros biodegradables en compost preparado según la norma UNE-EN ISO 20200:2015 se ejecutó en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la UCR. La determinación del contenido de humedad y los sólidos volátiles se realizó en el Laboratorio de Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la UCR. Finalmente, la caracterización de las muestras de los polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT).

4.1.1 Materiales de investigación: Polímeros Biodegradables

Se analizaron dos polímeros biodegradables, el primero es el polímero biodegradable PLA y el segundo consiste en una mezcla de PBAT, PLA y almidón de maíz, el cual por practicidad será denominado como PBAT de ahora en adelante. Ambos biopolímeros fueron suministrados por la empresa DosMil50 Empaques Compostables. En la Tabla 1 se describe cada polímero biodegradable y la Figura 6 muestra la presentación de los productos de empaque (PLA) y trasiego de alimentos (PBAT) ofrecidos por la empresa y analizados en el presente estudio.

Tabla 1. Descripción de los polímeros de investigación.

Características del polímero	PLA	PBAT, PLA y almidón de maíz
Composición del material	Ácido poliláctico	Poli (Butilén Adipato-co-Tereftalato), ácido poliláctico, almidón de maíz y
Espesor (μm)	20	20
Color	Transparente	Verde
Código del producto de la empresa	CSG2	BMMTB-MD19GRN 1
Dimensiones (Ancho, largo, alto)	2 3/4" x 2 1/2" x 9"	11"x17"x7"
Aplicaciones	Empaque primario	Trasiego de productos



Figura 6. Presentación de los productos de la empresa DosMil50 Empaques Compostables de los polímeros biodegradables en estudio: a) Polímero biodegradable PLA y b) Polímero biodegradable PBAT.

4.1.2 Preparación de las muestras de los polímeros biodegradables para el proceso de compostaje.

El material de ensayo se cortó según lo indicado en la norma UNE-EN ISO 20200:2015. Las dimensiones de las piezas corresponden a $2,5 \times 2,5$ cm. El espesor de ambos polímeros biodegradables es de ~ 20 μm . Los polímeros biodegradables se secaron hasta alcanzar una masa constante en una estufa (VENTICELL, 111 - ECO line) a 40 ± 2 °C para registrar su peso inicial con una balanza (BOECO, BXX 31) con una resolución de 0,0001 g. Se prepararon seis muestras que contenían cada una 15 g de cada polímero biodegradable ($2,5 \times 2,5$ cm).

4.1.3 Proceso de preparación del compost según la norma UNE-EN ISO 20200:2015.

El método empleado para simular un proceso de compostaje aeróbico intensivo para la degradación de polímeros biodegradables es el que especifica la norma UNE-EN ISO 20200:2015 [53]. El experimento tuvo una duración de 12 semanas a una temperatura controlada de 58 °C en una incubadora (INCUCCELL, 404-ECO line) ubicada en el CIGRAS. El objetivo fue exponer los polímeros biodegradables a un proceso de compostaje en un sustrato o matriz sólida, inoculada con compost maduro procedente de una instalación municipal o industrial. El compost maduro utilizado en este ensayo fue un compost industrial (Abono orgánico Ever Green).

La matriz sólida empleada para el compostaje de los polímeros biodegradables (PLA y PBAT) y el tratamiento control (sin polímeros biodegradables) consiste en un residuo sólido sintético (RS), cuya masa seca corresponde al 45% del residuo húmedo. Su composición consta de 40% de aserrín, 30% de alimento para conejos, 10% de compost maduro, 10% de almidón de maíz, 5% de sacarosa, 4% aceite de maíz y de 1% de urea. La Tabla 2 muestra la denominación comercial u origen de cada componente. La composición fue basada en la masa seca total de residuo sólido sintético considerada como 100%.

Tabla 2. Denominación comercial o tipo de cada componente del residuo sintético.

Componente	Denominación comercial u origen
Aserrín	Aserradero en Turrialba, Cartago, Costa Rica
Alimento para conejos	VIT-PRO
Compost Maduro	Abono Orgánico EverGreen
Almidón de maíz	Almidón de maíz (Fécula de maíz) Pradera
Sacarosa	Azúcar Doña María
Aceite de maíz	Mazola
Urea	Fertilizante Seracsa Urea al 46%
Agua añadida	Agua destilada

Para precisar la cantidad de cada componente, se determina el contenido de humedad en base húmeda (CH) y masa seca (MS) del aserrín, compost maduro, urea y alimento de conejo. Cabe aclarar que el almidón de maíz y la sacarosa se consideraron como componentes secos. Para determinar la masa seca de cada material se realizaron tres repeticiones de cada uno, las muestras se colocaron en recipientes de aluminio, se registró la masa inicial con una balanza (Sartorius, BCE224I) con resolución de $\pm 0,001$ g y se colocaron en un horno (Jeio Tech, OF-22GW) a 105 °C durante 24 horas. Posteriormente, las muestras se estabilizaron a temperatura ambiente, dentro de un desecador y se registraron las masas. El contenido de humedad y masa seca se expresan como porcentaje de la masa total de la muestra, Ecuación 1 y Ecuación 2, respectivamente.

$$\% CH_C = \frac{M_H - M_S}{M_H} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\% M_S = \frac{M_S}{M_H} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

$\% CH_C$: Contenido de humedad del componente (%).

M_S : Masa seca del componente (g).

M_H : Masa húmeda del componente (g).

En total se elaboraron 20 kg de residuo sintético para asegurar la uniformidad de este en todos los reactores considerando 11% de pérdida en el proceso. La primera suposición consideró un 45% del total de masa seca del residuo sintético. La cantidad inicial requerida de masa seca de cada componente se determinó a partir de la masa seca del residuo sintético y de los porcentajes de cada componente indicados en la norma UNE-EN ISO 20200:2015 [53] y aplicando la ecuación 3. Para los componentes: maicena, azúcar y aceite de maíz, el resultado obtenido al aplicar la Ecuación 3 corresponde a la masa final requerida.

$$M_S = MT_{RS} \times \%MS_{RS} \times \%M \quad (3)$$

Donde:

M_S : Masa seca del componente (kg).

MT_{RS} : Masa total del residuo sintético (kg).

$\%MS_{RS}$: Porcentaje de masa seca del residuo sintético (%).

$\%M$: Porcentaje del componente en el residuo sólido sintético (%).

Posteriormente, se determinó la cantidad de masa total requerida de cada componente que presentaba contenido de humedad: aserrín, compost maduro y alimento de conejo, empleando la Ecuación 4. La presentación comercial de urea indica que tiene un 46% de esta, para asegurar el 100% de urea requerida se realizó un ajuste con la Ecuación 5. La Tabla 3 muestra los porcentajes de cada componente del residuo sintético, la masa seca de todos los componentes y la cantidad final de masa o materia requerida de cada componente y de agua agregada para la elaboración de 20 kg de residuo sintético (RS).

$$M_C = M_S + (M_S * CH_C) \quad (4)$$

Donde:

M_C : Masa total requerida del componente (kg).

M_S : Masa seca del componente (kg).

CH_C : Contenido de humedad del componente (%).

$$M_{Uaj} = M_U * \frac{100\%}{46\%} \quad (5)$$

Donde:

M_{Uaj} : Masa de urea total requerida (kg).

M_U : Masa de urea (kg).

CH : Contenido de humedad del componente (%).

Tabla 3. Cantidad de masa de cada componente para elaborar 20 kg de RS.

Componente	Porcentaje de masa seca del componente	Masa seca del componente (kg)	Masa inicial del componente (kg)
Aserrín	40%	3,60	4,18
Alimento para conejo	30%	2,70	3,01
Compost Maduro	10%	0,90	1,29
Almidón de maíz	10%	0,90	0,90
Sacarosa	5%	0,45	0,45
Aceite de maíz	4%	0,36	0,36
Urea	1%	0,09	0,20
Total, correspondiente a componentes	100%	9,00	10,39
	Agua Añadida		9,61

El aserrín y el compost maduro se seleccionaron por tamaño de partícula con un tamiz de 5 mm normalizado según la Norma ISO 3310-1. El residuo sintético se preparó mezclando manualmente los componentes y añadiendo 9,61 kg de agua destilada para ajustar el contenido de agua final al 55% del agua total. El proceso de elaboración se realizó en una caja de 120 L (Figura 7). La relación carbono/nitrógeno (C/N) del residuo sintético se verificó entre 20:1 y 40:1 según la norma UNE-EN ISO 20200:2015. El análisis de abonos orgánicos, para determinar la relación C/N, se realizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA-UCR).



Figura 7. Recipiente utilizado en la elaboración de 20 kg de residuo sintético.

El proceso de compostaje se realizó en un reactor de compostaje (unidad experimental) que consiste en una caja de polipropileno (Sterilite) de $34,6 \times 21,0 \times 12,4$ cm (largo, ancho, alto) (Figura 8). Un orificio de 5 mm de diámetro se perforó en el centro de los lados de 21 cm y a 6,5 cm del fondo de la caja como se muestra en la Figura 8, para facilitar el intercambio de gases entre la atmósfera interior y el exterior.

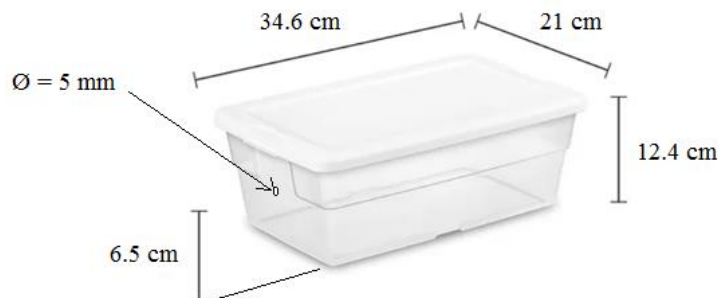


Figura 8. Reactor de compostaje utilizados para el compostaje de polímeros biodegradables.

En total se prepararon 18 reactores para el compostaje, 6 reactores por polímero, PLA y PBAT y 6 reactores con el tratamiento control. Posteriormente, en cada reactor se colocó 1 kg de residuo sintético.

4.1.4 Proceso de compostaje y grado de desintegración de polímeros biodegradables según la norma UNE-EN ISO 20200:2015.

Las muestras de 15 g de ambos polímeros biodegradables se humedecieron en agua destilada durante 30 s y posteriormente se mezclaron con el residuo sintético. Cada reactor se tapó, se registró su masa inicial, los bordes de la tapa se sellaron con cinta adhesiva y se introdujo en una incubadora (INCUCCELL, 404 – ECO) a 58 ± 2 °C durante 12 semanas (84 días). La temperatura de la incubadora se registró y se comprobó dos veces por semana con un Data Logger (Hobbo, MX2300 Series Temp/RH loggers) durante el periodo del ensayo.

Las instrucciones del plan de medición descrito en la norma Tabla 4 se siguieron para garantizar las condiciones ambientales y obtener el compost adecuado. Para garantizar igualdad de condiciones para todos los tratamientos, se monitorearon la temperatura (termómetro de mercurio, BRIXCO) y la humedad (método gravimétrico) a lo largo del proceso de compostaje, durante los días especificados en la Tabla 4. El contenido de cada reactor se mezcló con una

espátula de acero inoxidable sin dañar los materiales de ensayo (PLA y PBAT), para asegurar la aireación durante el proceso de compostaje. La Tabla 4 muestra los días de mezcla del contenido de los reactores. El proceso de compostaje también se controló examinando el olor y aspecto visual, para verificar que el residuo sintético se convierta en compost. Cabe destacar que después de cada medición los bordes de la tapa de cada reactor se sellaron con cinta adhesiva, para evitar una evaporación excesiva de humedad.

Tabla 4. Monitoreo de parámetros y aireación del proceso de compostaje [53].

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 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 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.

El contenido de cada reactor se secó al final del proceso de compostaje. La tapa de cada reactor se retiró y se colocaron en una incubadora (INCUCCELL, 404-ECO line) con circulación de aire a 58 ± 2 °C, secándolos hasta masa constante. Los grumos de compost se rompieron suavemente sin dañar ningún fragmento residual de los polímeros biodegradables atrapados en ellos.

El compost de cada reactor se tamizó individualmente. El proceso inició con un tamiz estándar (según ISO 3310-1) de 10 mm. Las partículas que no pasan este tamiz se examinan y los aglomerados de compost existentes se rompieron suavemente sin dañar los restos de material de prueba (polímeros biodegradables) que puedan quedar atrapados en ellos. Los fragmentos de polímeros biodegradables que no pasaron por el tamiz de 10 mm se recolectaron y almacenaron.

Las partículas de una fracción de granulometría inferior a 10 mm se pasaron a través de un tamiz de 5 mm, seguido por un tamiz de 2 mm, ambos tamices estándar (según ISO 3310-1), siguiendo el mismo proceso que el tamiz de 10 mm. El material de prueba recolectado de las diversas fases

del tamizado fue reunido y limpiado de compost. Finalmente, el material de prueba se secó en una estufa (VENTICELL, 111 - ECO line) a 40 ± 2 °C hasta masa constante y se registró la masa final.

4.1.4.1 *Determinación de los sólidos volátiles*

La masa seca y los sólidos volátiles del residuo sintético se determinaron al inicio y al final tras el proceso de compostaje. La masa seca (M_S) se determinó por el método descrito en la sección 1.1.3, empleando la Ecuación 1 y la Ecuación 2.

El contenido en sólidos volátiles se determinó por calcinación, a 550 °C durante 8 h, utilizando las muestras previamente secas a 105 °C empleadas para determinar la masa seca. Las muestras se colocaron en un horno mufla (Yamato, FO810CR). La pérdida de masa durante la calcinación corresponde al contenido en sólidos volátiles (SV) de la muestra. El contenido de sólidos volátiles (SV) se expresa como porcentaje de la masa seca (M_S) de la muestra, Ecuación 6.

$$\% SV = \frac{M_R}{M_S} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

$\% SV$: Sólidos volátiles de la muestra (%).

M_R : Masa remanente de la muestra después de la calcinación (g).

M_S : Masa seca de la muestra (g).

4.1.4.2 *Determinación del grado de desintegración de los polímeros biodegradables*

Según la UNE-EN ISO 20200:2015 el proceso de compostaje de polímeros biodegradables es válido si se cumplen dos condiciones. La primera es que la reducción del contenido de sólidos volátiles totales, R, entre el residuo de síntesis inicial y el compost obtenido al final del ensayo, debe ser igual o superior al 30%. La segunda condición es que el grado de desintegración entre las réplicas no deben diferir en más de un 20%.

4.1.4.2.1 Reducción del contenido de sólidos volátiles

La reducción del contenido de sólidos volátiles totales, R, se calcula con la Ecuación 7 en cada reactor.

$$R = \frac{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i] - [m_f \times (DM)_f \times (VS)_f]}{[m_i \times (DM)_i \times (VS)_i]} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

m_i : masa inicial del residuo sintético húmedo introducido en el reactor.

$(DM)_i$: porcentaje de masa seca inicial del residuo sintético expresada en decimales.

$(VS)_i$: porcentaje del contenido inicial en sólidos volátiles del residuo sintético, expresado en decimales.

m_f : masa final del compost.

$(DM)_f$: porcentaje de masa seca final del compost, expresada en decimales.

$(VS)_f$: porcentaje del contenido final en sólidos volátiles del compost, expresado en decimales.

4.1.4.2.2 Determinación del grado de desintegración de los polímeros biodegradables

El grado de desintegración se calcula a partir de la Ecuación 8, el material de ensayo (PLA y PBAT) recuperado del proceso de tamizado se consideró material no desintegrado. El material que pasa por el tamiz de 2mm se considera material desintegrado.

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

m_i : masa seca inicial del material de ensayo.

m_r : masa seca del material de ensayo residual recuperado del tamizado.

Para cada reactor se calcula, de forma independiente, el grado de desintegración.

4.1.5 Caracterización de las muestras de los polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje.

Los polímeros biodegradables PLA y PBAT se caracterizaron antes de iniciar el proceso de compostaje. Las muestras se recolectaron de 3 reactores para caracterizar ambos polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje. Tomando como día cero el día de inicio del ensayo de compostaje, los días de extracción de muestras corresponden a los días: 11, 28, 42, 56, 72 y 84 del ensayo.

Posteriormente, las muestras se lavaron con agua destilada, se secaron en la incubadora a 40 °C hasta alcanzar una masa constante y se pesaron en una balanza analítica (BOECO, BXX 31) con una precisión de 0,1 mg. La caracterización consistió en análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría de barrido diferencial (DSC) realizados en el LANOTEC.

4.1.5.1 Microscopía electrónica de barrido

El análisis de microscopía electrónica de barrido se realizó utilizando el equipo JSM-6390LV, Jeol (Figura 1), con una aceleración de voltaje de 10 keV, con electrones secundarios (SEI) y tamaño del diámetro de la punta del haz o spot size de 50. Las imágenes de la superficie y de la sección transversal de la muestra se tomaron a diferentes magnificaciones, desde 100x hasta 4000 x. Previo al análisis las muestras se recubrieron con una capa de oro y carbón en un cobertor iónico (Denton Vacuum, Desk V) a 20mAh durante 180s.

4.1.5.2 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

El análisis de las muestras de polímeros biodegradables se realizó utilizando un espectrómetro infrarrojo Nicolet iS50 FT-IR, Thermo Fischer Scientific, Figura 2. El barrido se realizó en un rango de 500 a 4000 cm^{-1} . Los espectros se analizaron con el software OMNIC 8.1 (OMNIC Series 8.1.10, Thermo Fischer Scientific). Se determinó el índice de carbonilo (I_{CO}) en función a la absorbancia a partir de la relación entre el área bajo el pico de carbonilo (C=O) y el área bajo el pico de C-H, según la Ecuación 9 [30].

$$\%I_{CO} = \frac{A_{C=0}}{A_{C-H}} \times 100 \quad (9)$$

4.1.5.3 *Análisis termogravimétrico*

Las muestras de polímeros biodegradables se analizaron mediante un analizador termogravimétrico TGA-Q500, TA Instruments, Figura 3, equipado con el software Universal Analysis 2000 (versión 4.5A, TA Instruments). El flujo de purga de nitrógeno en la balanza y en la muestra corresponden a 40 mL/min y 60mL/min, respectivamente. Inicialmente, el equipo se mantuvo en equilibrio a 25 °C por 5 min. Posteriormente, el calentamiento se realizó a 10 °C/min, en un rango de temperatura de 25 a 600 °C.

4.1.5.4 *Calorimetría de barrido diferencial*

Las muestras de polímeros biodegradables se analizaron utilizando un calorímetro diferencial de barrido DSC Q200, TA Instruments, Figura 4, equipado con el software Universal Analysis 2000 (versión 4.5A, TA Instruments), con un flujo de nitrógeno a 50 mL/min. Inicialmente, el equipo se mantuvo en equilibrio a 40 °C por 5 min. Posteriormente, el calentamiento se realizó a 10 °C/min, en un rango de temperatura de 40 a 200 °C y seguidamente el enfriamiento de 200 a 40 °C, a 10 °C/min.

4.1.6 Diseño experimental para la caracterización del proceso y el grado de desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015

Con la finalidad de determinar el grado de desintegración de los polímeros biodegradables (PLA y PBAT) mediante un proceso de compostaje controlado se evaluaron tres tratamientos, el primero corresponde al polímero biodegradable PLA, el segundo al polímero biodegradable PBAT y el tercero al tratamiento control (sin polímeros biodegradables). Cada tratamiento tuvo 6 repeticiones, ilustradas en la Figura 9 como círculos enumerados del uno al seis, cada una consistió en un reactor de compostaje (unidad experimental) para un total de 18 reactores. Para la caracterización de los polímeros biodegradables (PLA y PBAT) se analizaron las muestras de 3 reactores por biopolímero; sin embargo, las muestras se extrajeron de los 6 reactores correspondientes a cada polímero biodegradable, para asegurar las mismas condiciones en todos

los reactores Figura 9. Al finalizar el proceso de compostaje se tomaron en cuenta todas las repeticiones por tratamiento (Figura 9) para medir el grado de desintegración de los polímeros biodegradables.

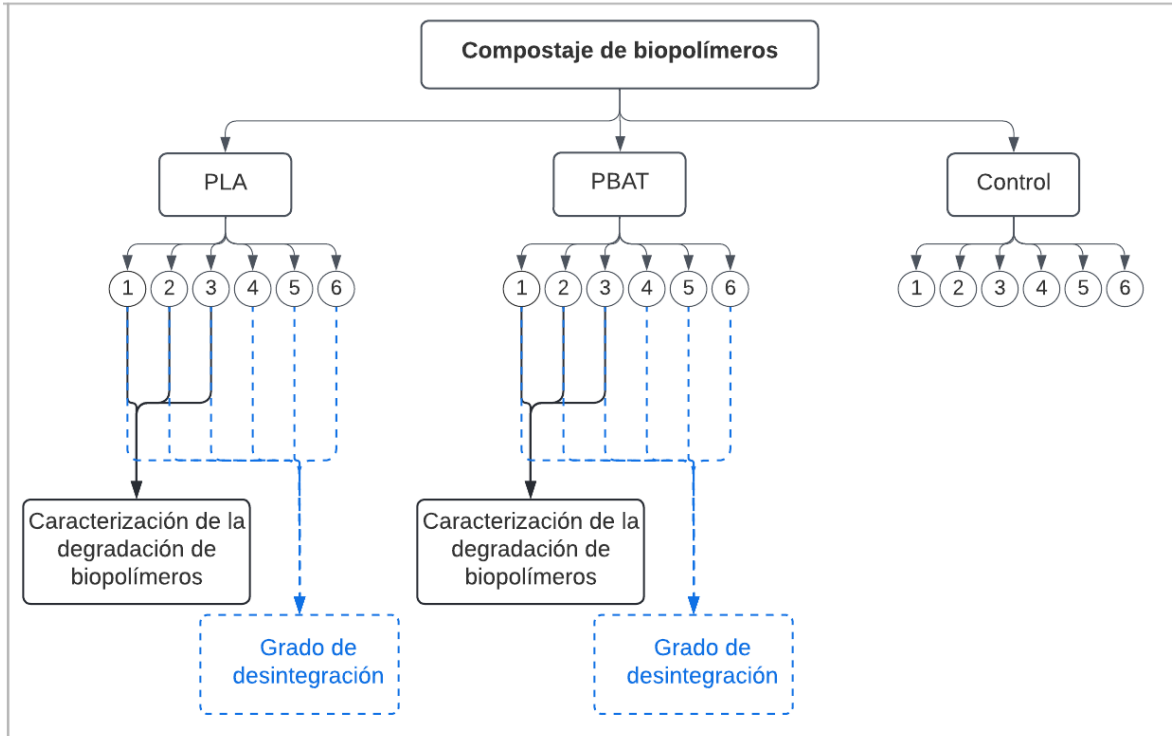


Figura 9. Esquema del diseño experimental seguido para la desintegración de polímeros biodegradables mediante compostaje según la norma UNE-EN ISO 20200:2015, los reactores de compostaje de cada tratamiento se indican como círculos enumerados del uno al seis.

4.2 Efecto de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost.

Las muestras de residuo sintético utilizado para el proceso de compostaje se analizaron químicamente. Un análisis de abonos orgánicos se realizó en el CIA-UCR para determinar los parámetros del residuo sintético previo al proceso de compostaje. Una vez finalizado el proceso de compostaje (después de 12 semanas) se tamizó el contenido de cada reactor y se realizó el mismo análisis químico a tres muestras de compost por cada tratamiento (PLA, PBAT y Control), para determinar los valores de los mismos parámetros. Los parámetros analizados fueron: carbono (C), nitrógeno (N), carbono total / nitrógeno total (C / N relación), potencial de hidrógeno (pH), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), azufre (S), porcentaje de humedad (%H) y conductividad eléctrica (CE).

La prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con nivel de significancia (α) de 5%, se aplicó para determinar si existe un efecto significativo de la degradación de los polímeros biodegradables en la composición del compost. El fin es establecer si existen diferencias significativas entre cada tratamiento (Sección 1.1.6), con polímeros biodegradables (PLA y PBAT) y el control (sin polímero biodegradable), mediante el software IBM SPSS (versión 26.0; SPSS Inc, Chicago, IL, EE. UU.).

4.3 *Evaluación mediante ensayos de fitotoxicidad de la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración de polímeros biodegradables usados como material de empaque para alimentos según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005.*

La evaluación consistió en analizar el efecto de la degradación de los polímeros biodegradables sobre la calidad del compost mediante pruebas de fitotoxicidad a escala de laboratorio, según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 [54]. Los efectos ecotóxicológicos fueron evaluados utilizando dos especies de plantas y se determinaron bajo condiciones controladas de invernadero. Los efectos se evaluaron 21 días después de la emergencia del 50% de las plántulas en el grupo control. El ensayo de crecimiento de plantas se realizó según lo indicado en el documento OECD Guideline for testing of chemical 208 “Terrestrial plants. Growth Test” (OECD 208) [48]. Un sustrato de referencia se mezcló con el compost por analizar. El sustrato de referencia consistió en tierra comercial (TC) para macetas (Súper Tierra Ever Green), en Tabla 5 muestra la composición química indicada en la etiqueta. La TC que permite la germinación normal de las semillas y el crecimiento de la planta y el compost analizado fue el obtenido de este estudio, procedente de los tres tratamientos (PLA, PBAT y Control).

Tabla 5. Composición química de la tierra comercial Súper Tierra Ever Green.

Elemento	Concentración (% p/p)
Nitrógeno (N)	0,370 - 0,400
Fósforo (P ₂ O ₅)	0,014 - 0,017
Potasio(K ₂ O)	0,051 - 0,054
Calcio (CaO)	0,100 - 0,130
Magnesio (MgO)	0,022-0,024
Inertes	99,375 - 99,443
Total	100

Contiene trazas de hierro, manganeso, zinc y cobre. Además, contiene de 5,57 a 6,25 g de ingredientes activos por kilogramo de producto formulado.

En el estudio se emplearon dos plantas previamente establecidas (OCDE 208), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.). Las semillas empleadas de ambas especies (Vigrow Seeds®) presentan una tasa de germinación del 87% y una pureza del 99%, según las especificaciones técnicas en el empaque.

Primero, se realizó una prueba de germinación de las semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L), con una duración de 10 días. Se registró el porcentaje de germinación, empleando 4 repeticiones de 36 unidades de semilla cada una, por especie de planta. El porcentaje de germinación (%G) se obtuvo de la Ecuación 10.

$$\%G = \frac{\text{Plántulas emergidas al 10 día}}{\text{Total de semillas sembradas}} \times 100 \quad (10)$$

El compost (C) obtenido después de la desintegración de los materiales de ensayo (PLA y PBAT) y el compost considerado como control se mezcló con el sustrato de referencia (TC). La mezcla se realizó en dos proporciones: la primera corresponde a 25% compost y 75% tierra comercial (g/g) y la segunda a 50% compost y 50% tierra comercial (g/g), ambas en una muestra de masa de 250 g.

Para desarrollar la prueba de fitotoxicidad se analizó el compost resultante de dos reactores de cada tratamiento PLA, PBAT y Control. La prueba de fitotoxicidad constó de dos repeticiones por especie de planta (lechuga, cebolla) y combinación de mezcla (g/g) para el compost obtenido de cada tratamiento PLA, PBAT y Control. Del compost de cada reactor se elaboraron las dos combinaciones (g/g) de mezcla tanto para lechuga como para cebolla. De modo que el compost del reactor uno corresponde a la repetición uno y el compost del reactor 2 corresponde a la repetición dos. Además, se realizó un control de referencia que consiste en dos repeticiones para cada especie de planta, empleando 250 g de tierra comercial (TC).

Una masa de 250 g de cada combinación de mezcla de compost se distribuyó en 35 celdas de una bandeja de germinación de 105 celdas. En cada celda se sembró tres semillas de la misma especie de planta, para un total de 105 semillas por combinación de mezcla. Las dos combinaciones (g/g) de mezcla de la misma especie de planta, lechuga (*Lactuca sativa* L.) o cebolla (*Allium cepa* L), se colocaron en una misma bandeja de germinación (BG), tal como se muestra en la Figura 10. Los dos controles de referencia de cada especie de planta se distribuyeron de igual forma en una misma bandeja de germinación.

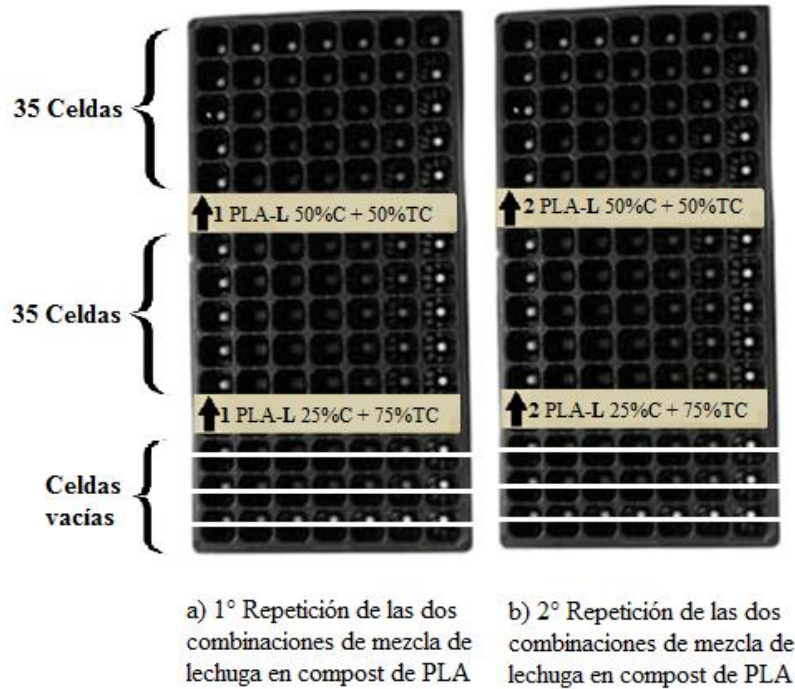


Figura 10. Esquema de distribución de las dos combinaciones (g/g) de mezcla y sus repeticiones en cada bandeja de germinación (BG) para lechuga (L) en compost procedente del tratamiento PLA en combinación con tierra comercial (TC).

En total, 14 bandejas se colocaron dentro de un invernadero (Scool Value) de polietileno (PE), (Figura 11). El invernadero es de material impermeable, protege contra el viento, el frío y permite el control de insectos, por lo cual, es una barrera que permite proteger las plantas de estos factores. La frecuencia de riego de las bandejas fue de 5 días por semana. El riego se aplicó con un atomizador, para no dañar las plantas. El proceso de germinación de cada lote se registró 3 días por semana.

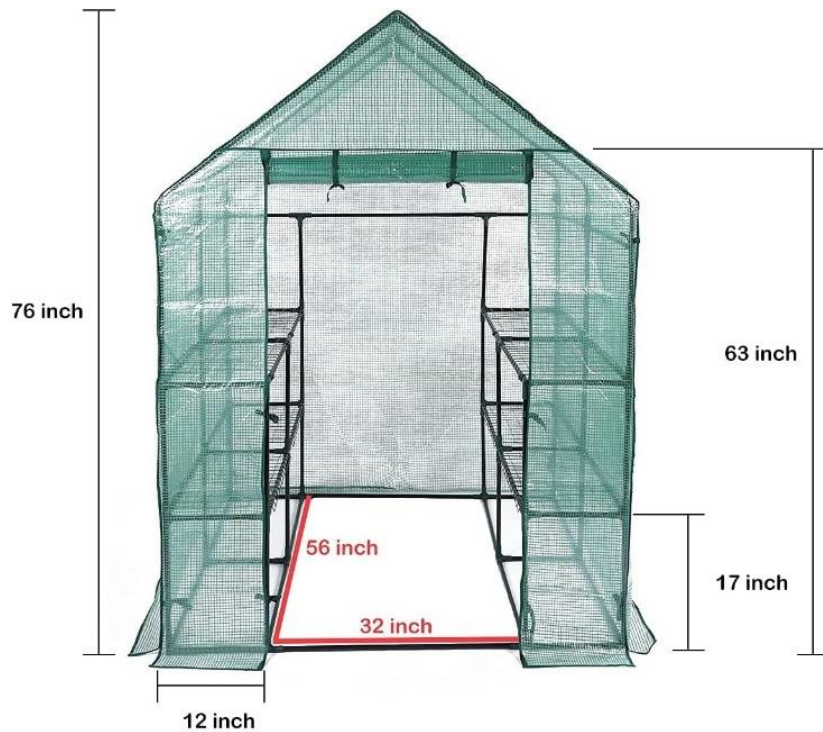


Figura 11. Diseño del invernadero utilizado en los ensayos de fitotoxicidad.

Una vez transcurridos 21 días de la emergencia del 50% de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L) en el grupo control se procedió a medir el crecimiento de cada planta. El registro consistió en medir la longitud de la planta en dos secciones, la primera sección la longitud de la raíz y la segunda en la longitud del tallo y las hojas. La delimitación de la raíz, el tallo y las hojas se aprecia en la Figura 12 para el caso de la lechuga y en la Figura 13 para el caso de la cebolla. Las mediciones se realizaron con una regla ($\pm 0,1$ mm) y sobre esta se colocó la parte de la planta a medir, estirándola en su totalidad y registrando la longitud en centímetros. El total de semillas de lechuga sembradas corresponde a 1 470.

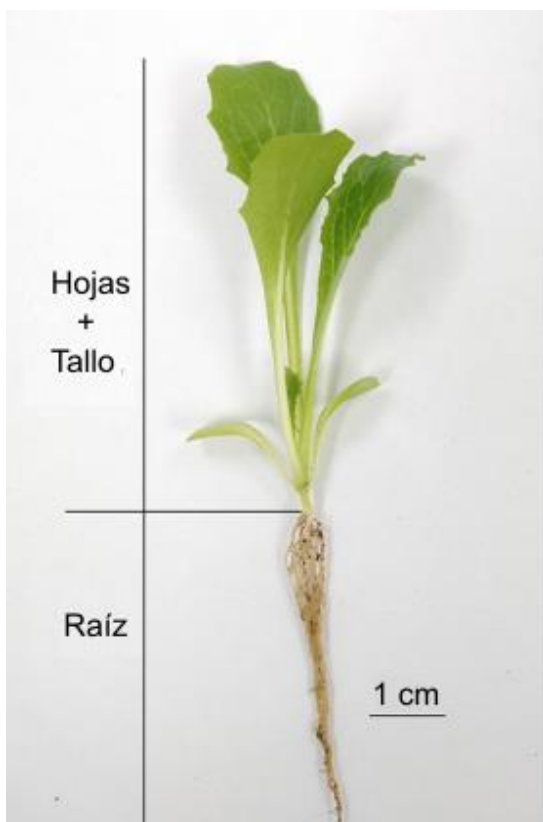


Figura 12. Delimitación de la raíz, tallo y hojas para la medición del crecimiento de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L).

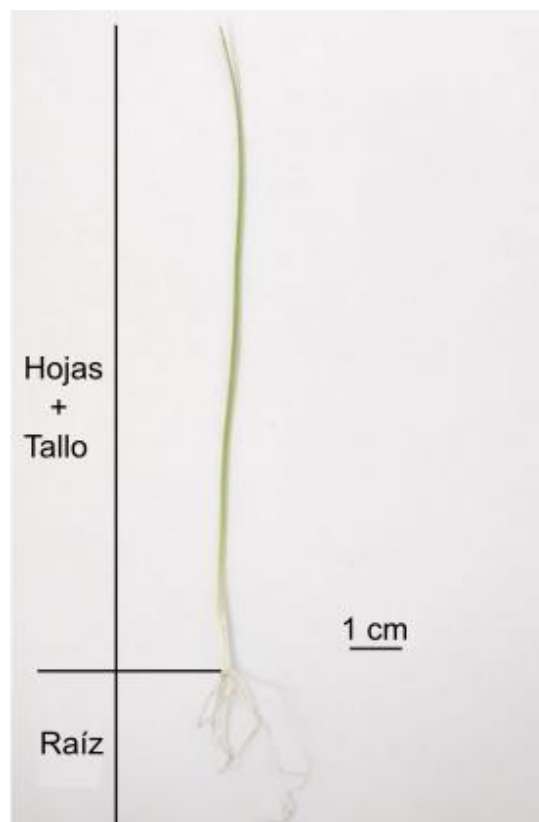


Figura 13. Delimitación de la raíz, tallo y hojas medición del crecimiento de las plantas de cebolla (*Allium cepa* L).

Los criterios de evaluación consisten en la comparación del número de germinaciones (número de plantas que crecen), altura de la raíz, del tallo y hojas (cm) y la biomasa húmeda (g) de la planta obtenidos con la muestra de compost en combinación con la tierra comercial en todas las proporciones de mezcla (25% o 50% de compost). Los valores serán comparados como porcentaje de los valores obtenidos en el blanco (tierra comercial). El diseño experimental consistió en dos repeticiones por tratamiento, la Figura 14 ilustra todos los tratamientos realizados para evaluación de fitotoxicidad.

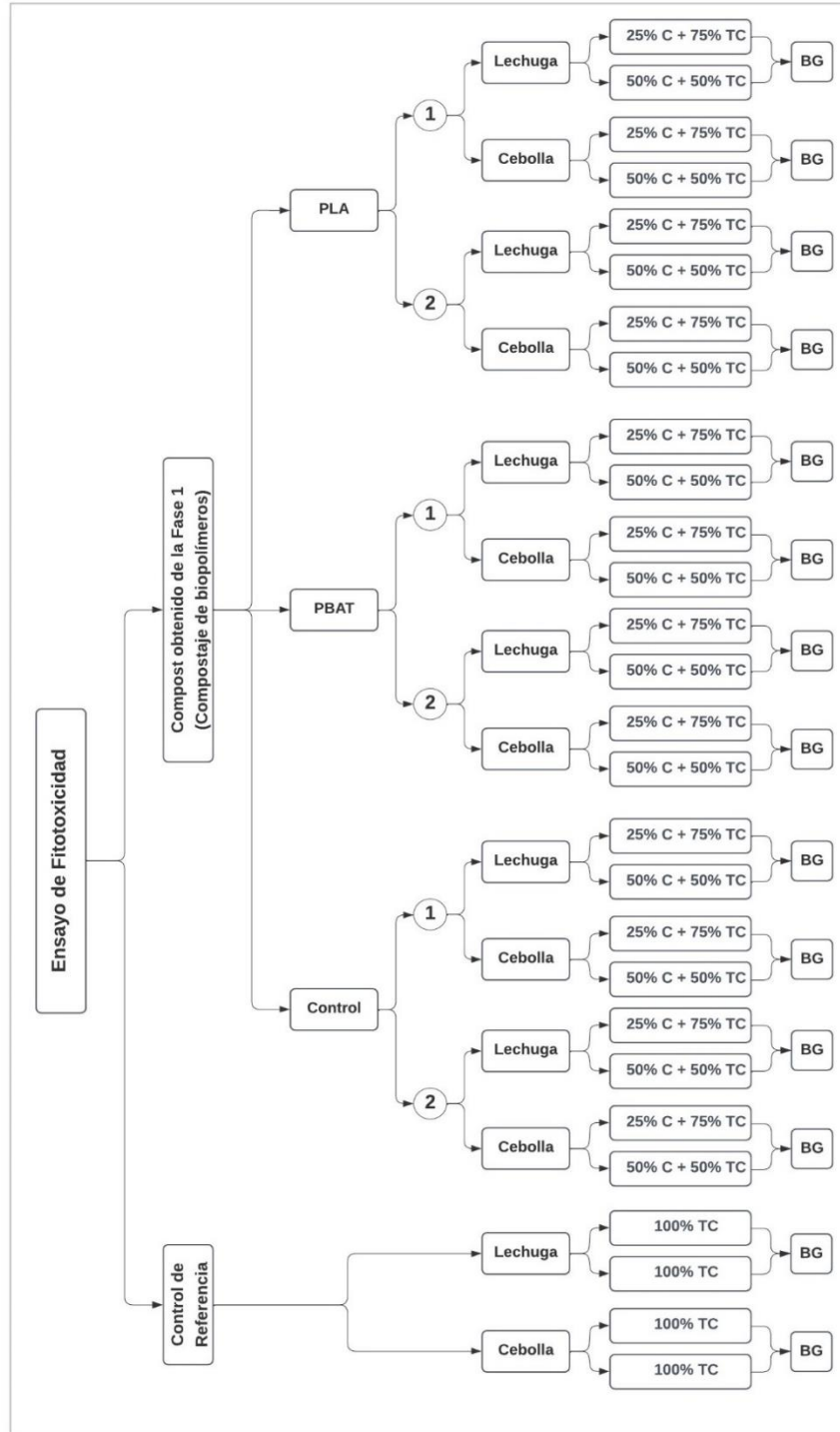


Figura 14. Esquema del ensayo de fitotoxicidad: Las dos repeticiones del compost analizado resultante de los reactores cada tratamiento (PLA, PBAT y Control) se indican mediante círculos, cada repetición comprende las dos combinaciones (g/g) de mezcla, correspondientes a la misma especie de planta, además se muestran los controles de referencia y que combinaciones de mezcla se colocaron en la misma bandeja de germinación (BG).

4.4 Diseño experimental del estudio completo.

En la Figura 15 se muestra el diagrama del diseño experimental del estudio completo. Primero, se caracterizó el proceso de compostaje para desintegración de polímeros biodegradables. Luego, un análisis del efecto de la degradación de polímeros biodegradables sobre la composición del compost se realizó mediante un análisis de abonos orgánicos. Finalmente, la calidad del compost resultante de la biodegradación de polímeros biodegradables se evaluó mediante ensayos de fitotoxicidad en laboratorio según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005, Figura 15.

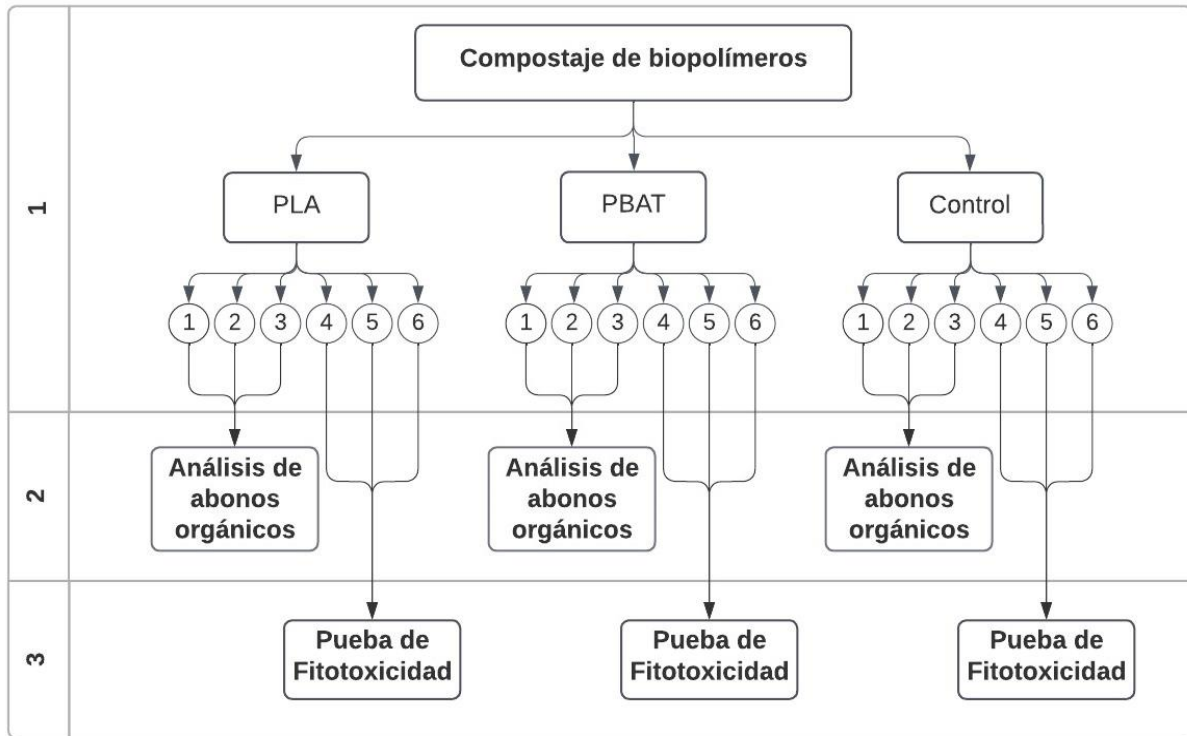


Figura 15. Diagrama del diseño experimental del estudio completo: (1) proceso de compostaje de polímeros biodegradables, los reactores de compostaje de cada tratamiento se indican como círculos enumerados del uno al seis; (2), determinación de la influencia de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost; (3) prueba de fitotoxicidad.

4.5 *Análisis Estadístico*

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico SPSS de IBM (versión 26.0; SPSS Inc, Chicago, IL, EE. UU.) empleando diversas pruebas según la naturaleza de la información procesada. Para determinar la normalidad de los datos se empleó la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) para datos menores de 50 y la prueba Kolmogorov-Smirnov ($p > 0,05$) para datos superiores a 50. Para homogeneidad de varianza (homocedasticidad) se utilizó la prueba de Levene ($p > 0,05$). Las medias de los diferentes tratamientos se analizaron mediante análisis de la varianza de una vía (ANOVA) con comparaciones múltiples entre tratamientos mediante la prueba de Tukey HSD. Cuando no se cumple el supuesto de normalidad, la alternativa no paramétrica utilizada es Kruskal-Wallis.

5. RESULTADOS

5.1 Caracterización del proceso de compostaje de polímeros biodegradables

5.1.1 Temperatura durante el periodo de incubación

La temperatura dentro de la incubadora según la norma debía mantenerse a 58 ± 2 °C durante el proceso de compostaje. La Figura 16 y el Anexo 1 presentan los registros de temperatura durante todo el periodo del proceso de compostaje. Esta variable se mantuvo en el rango permitido durante el periodo del ensayo excepto en las semanas 1 y 7. En la semana 1 la temperatura promedio máxima fue de $60,71 \pm 0,74$ °C y la mínima de $60,26 \pm 1,18$ °C, superando el rango permisible en 0,71 °C y 0,26 °C, respectivamente. En la semana 7, la temperatura más baja registrada fue de $55,74 \pm 1,90$ °C, es decir, 0,26 °C fuera del rango permitido. Dado que la temperatura durante todo el proceso se mantuvo en el rango termofílico entre 40-65 °C [55], [56]; y de las 12 semanas de duración del proceso compostaje, 10 semanas se mantuvieron dentro del rango permitido. En la semana 1 y 7, la temperatura se mantuvo en rango termofílico, alrededor de 60 °C, necesaria para el periodo de estabilización de los componentes del residuo sintético. Por lo tanto, la variación de temperatura registrada dentro de la incubadora no representó ninguna implicación negativa para el proceso de compostaje. Tal como se demuestra en la siguiente Sección 5.1.2 estas excepciones no implicaron una variación de la temperatura en los reactores de compostaje.

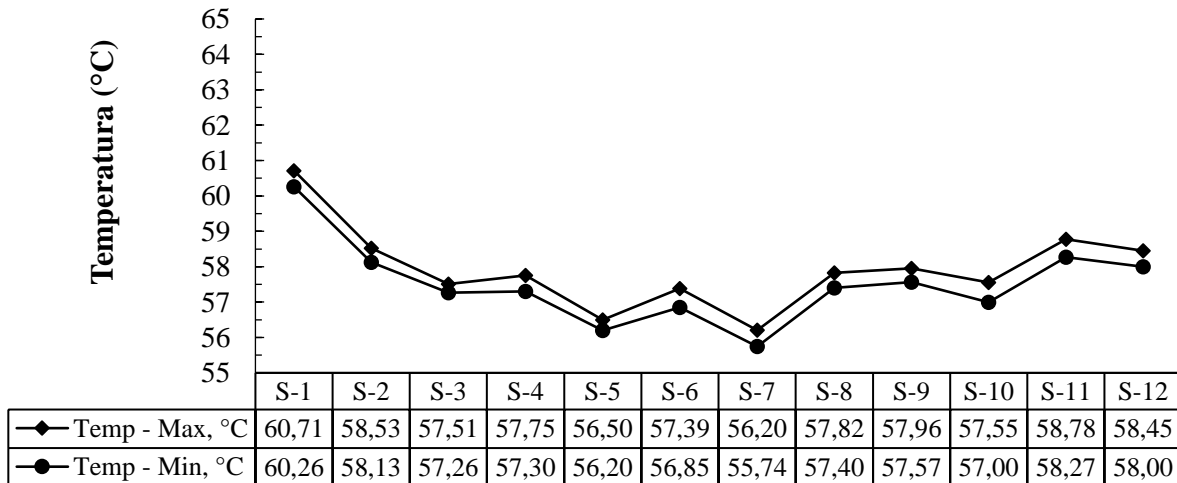


Figura 16. Temperatura máxima y mínima promedio por semana (S) dentro de la incubadora (INCUCCELL, 404 – ECO) durante del proceso de compostaje.

5.1.2 Temperatura de los reactores de compostaje durante el periodo de incubación

Respecto a la temperatura de los reactores de compostaje, durante las 12 semanas del periodo de incubación, los tratamientos con los materiales de PLA y PBAT, no presentaron diferencias estadísticamente significativas, Figura 17. La temperatura promedio reportada es de $55 \pm 1,57$ °C y $55 \pm 1,56$ °C, respectivamente. Mientras que la temperatura del tratamiento control, con una media de $51 \pm 2,31$ °C difiere de la media de los otros tratamientos en 4 °C, Figura 17. Sin embargo, la temperatura de todos los tratamientos se mantuvo por encima de los 50 °C, en el rango termofílico [57], favoreciendo la eficiencia de los microorganismos [58] que intervienen en el proceso de compostaje.

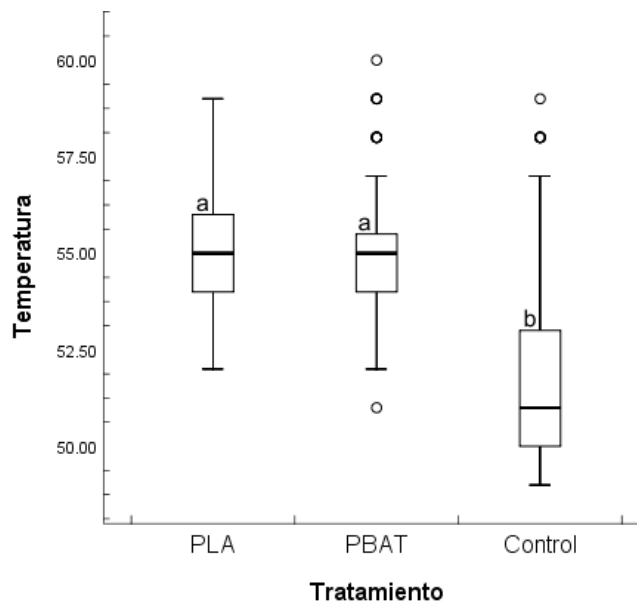


Figura 17. Diagrama de bloques para las temperaturas de los reactores de compostaje de cada tratamiento, durante las 12 semanas de compostaje. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (prueba de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$).

En la Figura 18 (generada a partir de la información del Anexo 2) se observa que la temperatura promedio semanal máxima alcanzada por los tres tratamientos, ocurrió durante la primera semana con un valor de 57 °C. Este resultado muestra que la variación de temperatura de la incubadora durante la primera semana no implicó un cambio significativo en las temperaturas de los reactores de compostaje. Este comportamiento durante la primera semana se puede atribuir al periodo de estabilización de los componentes del residuo sólido sintético y al proceso de compostaje en sí. Este proceso consiste en la descomposición de residuos orgánicos por la acción microbiana [59], [60], esta acción se da en condiciones aeróbicas y es exotérmica [60]. Además,

tomando en cuenta que durante la primera semana por la mezcla y descomposición de los componentes se da un incremento significativo de la actividad microbiana, resultando en un aumento de temperatura de hasta 60 °C [61].

Durante las 12 semanas los tratamientos con polímeros biodegradables, PLA y PBAT, presentaron una temperatura superior al tratamiento control, por lo que se puede inferir que una de las posibles causas de este comportamiento, es que la actividad de los microorganismos dentro de los reactores con polímeros biodegradables es mayor debido a la presencia del biopolímero en la matriz de compostaje. Mediante el compostaje se puede lograr la recuperación orgánica de los polímeros y la mineralización de estos materiales por parte de microorganismos como bacterias y hongos, genera un mayor impacto tanto en la velocidad como en la biodegradación global del polímero y por lo tanto en la actividad microbiana del entorno de compostaje [39], lo que provoca un aumento de la temperatura.

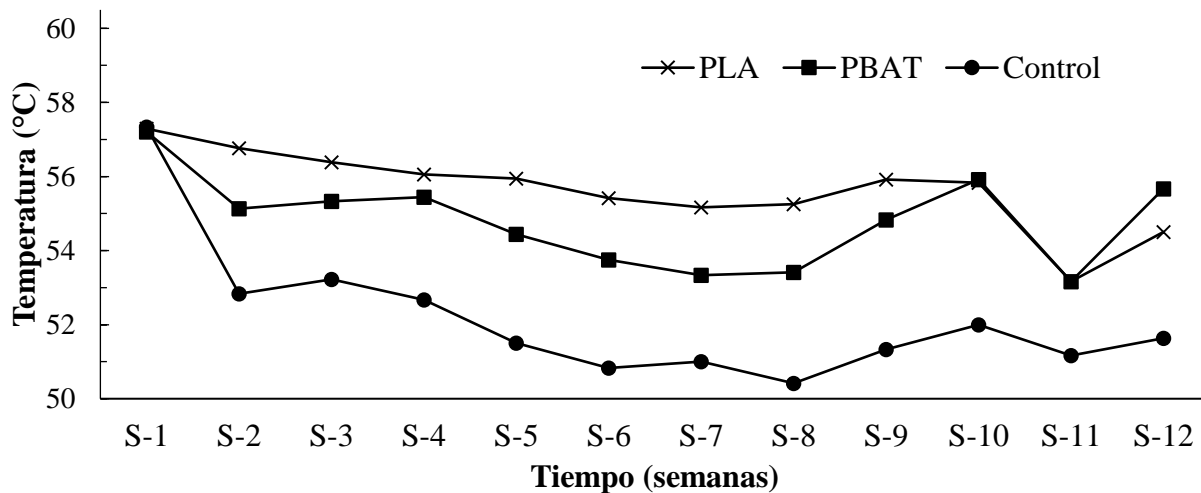


Figura 18. Temperatura promedio por semana de los reactores de compostaje de cada tratamiento.

La exposición del compost a temperaturas superiores a 55 °C (dependiendo de los materiales que lo componen) durante 5 a 15 días reduce o elimina el número de patógenos microbianos [56], como las bacterias *Escherichia coli* y *Salmonella spp* [62]. También se eliminan parásitos como quistes y huevos de helminto, esporas y semillas de maleza, dando como resultado un producto higienizado [62]. Los componentes iniciales para la elaboración del residuo sintético se consideran libres de patógenos, puesto que son productos comerciales, a excepción del aserrín, por lo cual el residuo sintético requería tiempo aproximado de exposición a 55 °C durante de 5 días, para

lograr la higienización. Por lo tanto, se podría indicar que se obtuvo un compost higienizado de todos los tratamientos, desde la primera semana, ya que todos alcanzaron una temperatura de 57 °C durante este periodo, Figura 18.

Si bien el presente estudio se realiza en condiciones de laboratorio, es importante destacar que la temperatura alcanzada en los reactores de compostaje, superior a 50 °C, puede obtenerse a escala industrial, mediante el uso de un sistema de compostaje adecuado. Por ejemplo, la empresa DosMil50 Empaques Compostables cuenta con un sistema de pilas de compostaje de diseño sencillo, que alcanza temperaturas de 60 °C. El objetivo de un diseño sencillo es minimizar el tiempo y mano de obra necesarios para mantener las condiciones de compostaje adecuadas. Además, el sistema puede replicarse e implementarse en escuelas, comunidades y municipalidades, promoviendo la economía circular a un bajo costo. Además, en Costa Rica se cuenta con el plan Nacional de Compostaje 2020-2050 [23]. Este busca promover una Ley de Economía Circular, que contemple la aplicación de responsabilidad extendida del productor para el compostaje de polímeros biodegradables, donde el productor es responsable de los residuos generados por su actividad, revalorizando los polímeros biodegradables.

5.1.3 Olor



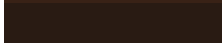
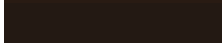

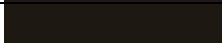
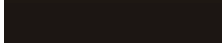



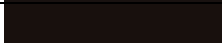
Durante las dos primeras semanas de compostaje, se registró un fuerte olor a amoníaco y su intensidad se redujo considerablemente hasta desaparecer por completo en la semana 5. Después, se registró un ligero olor a tierra y permaneció sin cambios por el resto del tiempo de compostaje. El olor a amoníaco está relacionado con la presencia de nitrógeno en el residuo sintético inicial aportado por la urea y durante la biodegradación en compostaje se liberan gases como el amoníaco (NH_3) [63]. El producto final, después de 12 semanas de compostaje, exhibió un ligero olor a tierra y ningún olor desagradable, tal como se espera del producto obtenido mediante un proceso de compostaje [23].

5.1.4 Aspecto Visual

Respecto al aspecto visual del residuo sintético, la Tabla 6 muestra la evolución del cambio de color, según la escala RGB. En el día cero, el residuo sintético, presenta el color más claro según la escala de color R=95, G=64 y B=34, previo al ingreso de los reactores a la incubadora, debido a la concentración inicial del aserrín. Para el día 1, después de 24 horas a 58 ± 2 °C, el cambio de

color es notable, con un valor de R=57, G=34 y B=22. Todos los parámetros de color presentan disminución. Durante la primera semana el cambio de color es fácilmente perceptible, Tabla 6, y a partir de la segunda semana el color es marrón y se mantiene sin cambios perceptibles durante el periodo restante del compostaje. El cambio de color gradual es un indicador del progreso de la madurez [64], transformando el residuo sintético inicial a compost. Este proceso de cambio de color coincide según lo esperado.

Tabla 6. Cambio de color del residuo sintético de compostaje según la escala RGB durante los primeros 15 días del proceso.
















Semana	Día	Escala de color			Color
		R	G	B	
1	0	95	64	34	
	1	57	34	22	
	2	41	27	19	
	3	35	25	19	
	4	31	24	21	
2	7	30	24	19	
	8	28	22	19	
	9	26	20	15	
	10	26	18	15	
	11	25	18	16	
3	14	24	16	13	

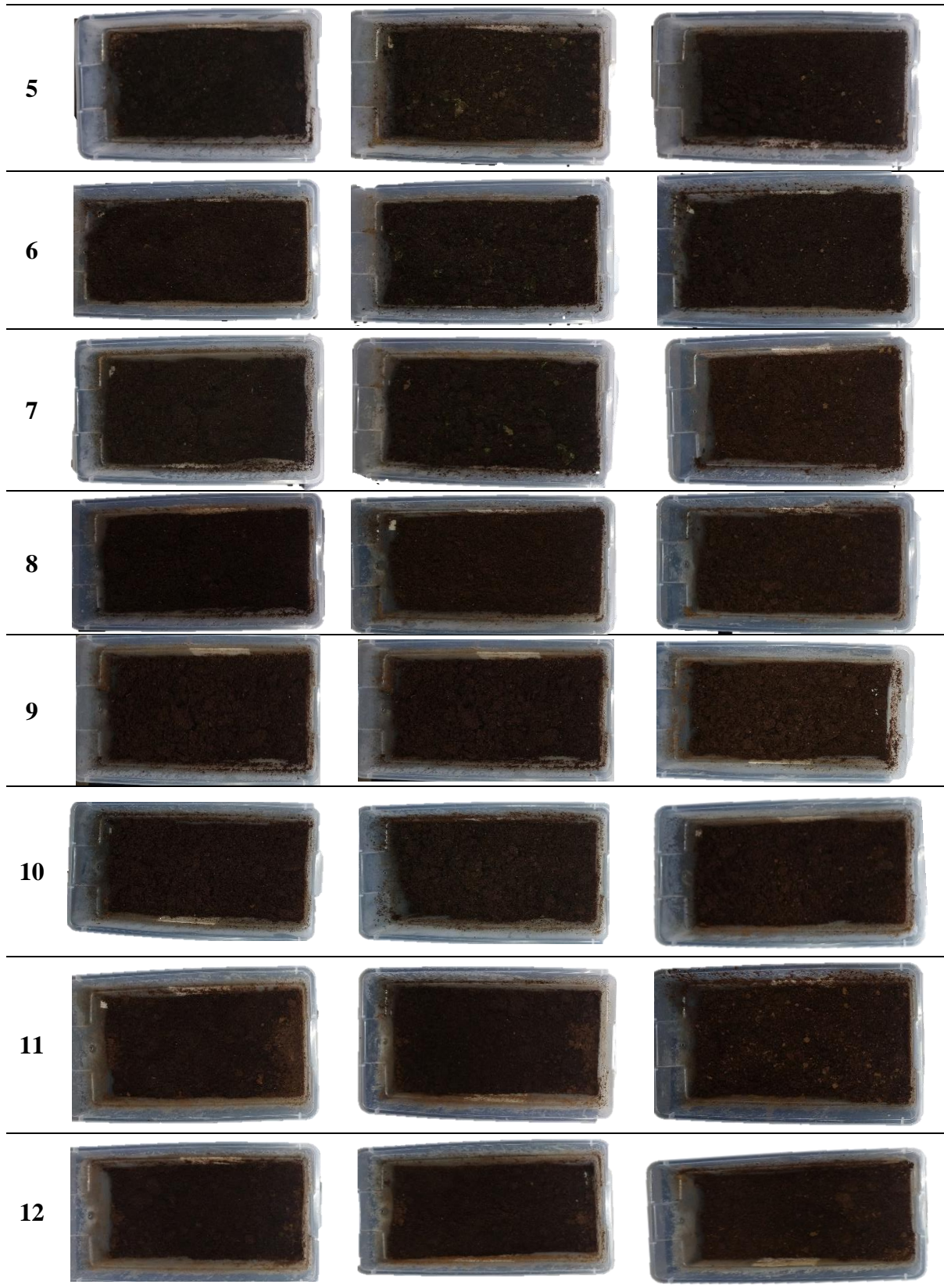
La desintegración de los polímeros biodegradables (PLA, PBAT) y el aspecto del tratamiento control, durante las 12 semanas de compostaje, se aprecian en la Tabla 7. En el día cero, se muestra el estado inicial de un reactor de compostaje para cada tratamiento, previo al ingreso a la incubadora. En el caso del polímero biodegradable PLA su degradación ocurrió antes de lo previsto, para el día 14 de iniciado el compostaje ya se había degradado por completo, por esta razón en la semana 3, Tabla 7, ya no se distinguen visualmente fragmentos de PLA en la matriz de compostaje. Debido a lo anterior, solo se pudo realizar un punto de muestreo para la caracterización del biopolímero PLA mediante TGA, FT-IR, DSC y SEM durante el proceso de compostaje.

El avance de la degradación del polímero biodegradable PBAT, se muestra en la Tabla 7. El PBAT es fácilmente distinguible dentro del compost hasta la semana 4, y durante las semanas 5 y 7 aún se distinguen pequeños fragmentos. A partir de semana 8, los fragmentos de PBAT

redujeron su tamaño y el compost se encontraba adheridos a estos, dificultando su visibilidad, pero aumentando el contacto con la matriz de compostaje. También, se aprecia que el cambio de color gradual durante el proceso de compostaje fue homogéneo entre los tratamientos, siendo este un indicador de que se mantuvieron las condiciones de compostaje iguales.

Tabla 7. Apariencia visual de los reactores en cada tratamiento (PLA, PBAT y Control) durante las 12 semanas (S) de duración del proceso de compostaje.

S	Tratamiento		
	PLA	PBAT	Control
0			
1			
2			
3			
4			



5.2 Reducción de los sólidos volátiles y el grado de desintegración de los biopolímeros (PLA y PBAT)

La reducción del contenido de sólidos volátiles totales (%), R, entre el residuo de síntesis inicial y el compost obtenido al final del ensayo en cada reactor, debe ser igual o superior al 30%, y R, debe calcularse con la Ecuación 1. La reducción del contenido de sólidos volátiles de cada uno de los reactores, de cada tratamiento (polímeros biodegradables: PLA, PBAT; y Control) fue superior al 30%, Tabla 8, por lo tanto, se cumple con lo que se especifica en la norma. El tratamiento de PLA registró un R promedio de $71,4 \pm 0,9$ %, el PBAT de $69,9 \pm 1,0$ y el tratamiento control de $68,7 \pm 1,6$, presentando diferencias entre las medias los tratamientos PLA y control, Figura 19.

Tabla 8. Reducción del contenido de sólidos volátiles.

Reactor	INICIAL			FINAL			R (%)
	Masa de RS (mi)	masa seca (DM)i	Sólidos Volátiles (VS)i	Masa de RS (mf)	masa seca (DM)f	Sólidos Volátiles (VS)f	
PLA 1	1 002	0,55	0,92	580	0,33	0,75	71,7
PLA 2	999	0,55	0,92	638	0,3	0,74	71,7
PLA 3	1 000	0,55	0,92	625	0,31	0,76	70,9
PLA 4	1 001	0,55	0,92	631	0,32	0,75	70,0
PLA 5	1 002	0,55	0,92	639	0,29	0,74	72,5
PLA 6	1 002	0,55	0,92	655	0,29	0,76	71,8
PBAT 1	1 000	0,55	0,92	654	0,3	0,74	71,4
PBAT 2	1 000	0,55	0,92	654	0,3	0,76	70,7
PBAT 3	1 000	0,55	0,92	647	0,32	0,76	68,9
PBAT 4	1 000	0,55	0,92	631	0,33	0,76	69,2
PBAT 5	1 000	0,55	0,92	650	0,32	0,75	69,2
PBAT 6	1 000	0,55	0,92	642	0,31	0,76	69,9
Control 1	1 000	0,55	0,92	647	0,32	0,79	68,2
Control 2	1 000	0,55	0,92	652	0,31	0,75	70,3
Control 3	1 000	0,55	0,92	633	0,33	0,76	68,5
Control 4	1 000	0,55	0,92	657	0,3	0,76	70,7
Control 5	1 000	0,55	0,92	652	0,32	0,77	68,6
Control 6	1 000	0,55	0,92	657	0,35	0,75	66,2

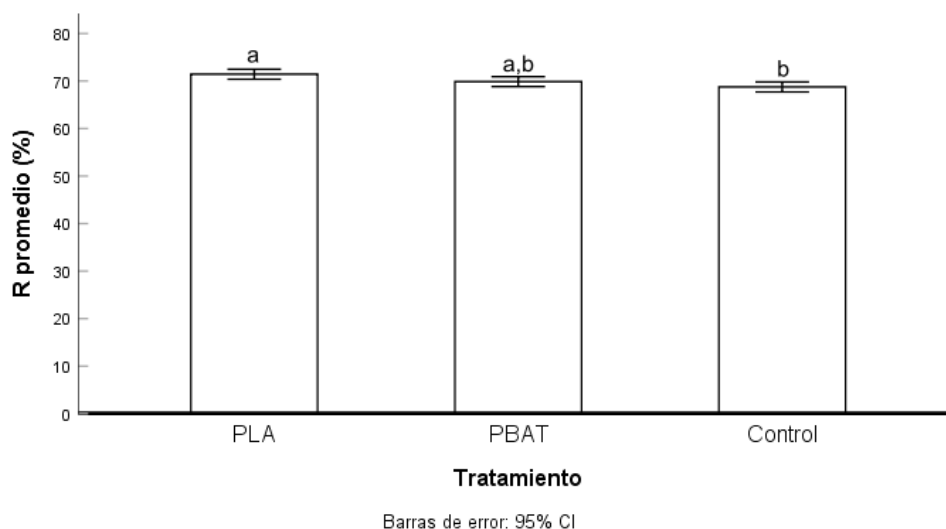


Figura 19. Diagrama de barras para reducción promedio del contenido de sólidos volátiles totales (%), R. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas (prueba de Tukey HSD, $p > 0,05$).

5.3 Grado de desintegración de los biopolímeros (PBA y PBAT)

El grado de desintegración del biopolímero PLA fue de 100%, Tabla 9, mientras que para la mezcla del polímero PBAT (PBAT, PLA y almidón) fue de 99,43% en promedio. Tal como se aprecia la variabilidad en los resultados del PBAT es de 5,1%. Por lo tanto, se concluye que el ensayo de compostaje es válido, dado que la reducción de sólidos volátiles es superior al 30% y la variación entre el grado de desintegración de los polímeros biodegradables es menor al 20%.

El grado de desintegración obtenido en este estudio en bolsas de PLA de 20 μm de espesor es del 100%, en contraste con los resultados de la investigación sobre la capacidad de biodegradación en condiciones de compostaje casero (25 ± 5 °C) de vasos plásticos de PLA, de venta en Costa Rica, cortados en fragmentos (2×2 cm) [31], no reportaron cambios significativos en el material. El producto de PLA analizado en este estudio previo provenía de vasos desechables de venta a nivel nacional. Este material tiene un espesor mayor al analizado en el presente estudio (20 μm), reportando que después de 78 semanas en compostaje casero los vasos de PLA no presentaron ningún indicio de degradación. En contraste, el presente estudio determinó en el día 14 una degradación completa de las láminas de PLA, puesto que ya no se distinguía visualmente

el polímero dentro de la matriz de compostaje. Sin embargo, las condiciones de estudio fueron diferentes, ya que se analizaron bolsas de PLA de 20 μm de espesor y en condiciones de compostaje a 58 ± 2 °C. Al comparar estos resultados se evidencia la importancia de los factores que intervienen en el proceso de compostaje de polímeros biodegradables, como la composición inicial del compost, las condiciones de compostaje y las características del material a desintegrar.

El PLA fue desintegrado en su totalidad y la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) después del proceso de compostaje y de ser tamizado presentó un 0,57% de su masa seca inicial, Tabla 9. Ambos polímeros mostraron una descomposición satisfactoria durante el compostaje según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 [54]. La descomposición de los polímeros se considera satisfactoria, mediante compostaje termofílico, si permanece un máximo del 10 % de su masa seca original del polímero después de pasar por un tamiz de 2,0 mm después de 84 días en una prueba de compostaje controlado.

Tabla 9. Grado de desintegración de cada biopolímero en los 6 reactores de compostaje.

Reactor	Masa de polímeros biodegradables inicial (mg)	Masa de polímeros biodegradables no desintegrada (mg)	Grado de desintegración (%)	Promedio del grado de desintegración (%)
PLA 1	15 060,0	0	100	100
PLA 2	15 014,3	0	100	
PLA 3	15 008,7	0	100	
PLA 4	15 105,7	0	100	
PLA 5	15 145,5	0	100	
PLA 6	15 008,5	0	100	
PBAT 1	15 035,1	65,2	99,56	99,43
PBAT 2	15 074,8	65,8	99,56	
PBAT 3	15 132,2	47,5	99,68	
PBAT 4	15 102,4	102,2	99,32	
PBAT 5	15 134,7	109,3	99,27	
PBAT 6	15 155,5	124,8	99,17	

5.4 Caracterización de las muestras de los polímeros biodegradables durante el proceso de compostaje.

5.4.1 Muestras de los polímeros biodegradables para el análisis de la caracterización

En la Figura 20 se observan las muestras de PLA, extraídas después de 11 días de compostaje. Se observó que estas muestras tenían compost adherido, además que los biopolímeros se agruparon en conglomerados debido a la presencia de humedad en el sustrato del compost. Para este periodo, la mayoría de los fragmentos de PLA se habían desintegrado. Los fragmentos mostrados en la Figura 20 aún se distinguían en la matriz de compostaje debido a que formaban parte de un conglomerado de fragmentos de polímeros. Mediante inspección visual, se observó que los polímeros en el conglomerado no mostraron el mismo grado de avance en la degradación, por lo que se concluye que los polímeros en contacto directo con el compost se degradaron con mayor rapidez que los encontrados dentro del conglomerado. Después de cuatro días de compostaje el PLA que al inicio es transparente se tornó blanco y algo amarillento, por el contacto con el agua y la acción de los microorganismos [29], aspecto que se logra apreciar en la Figura 20.




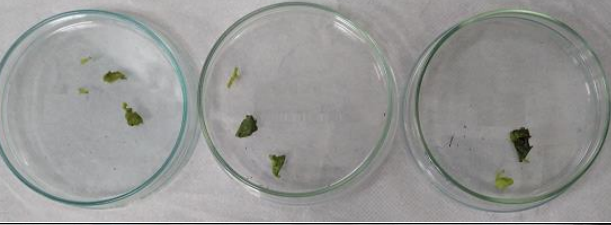
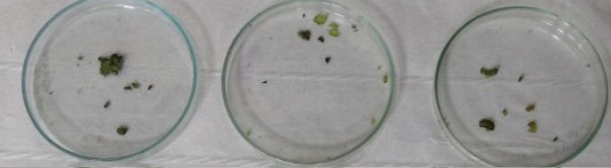



Figura 20. Muestras de PLA extraídas de los reactores (de izquierda a derecha: reactor 1, reactor 2 y reactor 3) el día 11 del proceso de compostaje para el análisis de caracterización de los polímeros biodegradables.

En la Tabla 10 se muestra el aspecto de las muestras del polímero biodegradable PBAT durante el proceso de compostaje. El PBAT también se agrupó en conglomerados. Por lo tanto, los polímeros no mostraron el mismo avance en la degradación. Las muestras extraídas no siempre corresponden a los fragmentos en contacto directo con el compost debido a que no se pueden separar ya que el compost se encontraba adherido. Por esta razón, para evitar presencia de compost, las muestras fueron extraídas del polímero después de la primera capa del conglomerado para no incurrir en errores en la caracterización. Hasta el día 42 del compostaje las

muestras que se pudieron extraer presentaban tamaños similares al inicio del ensayo. Sin embargo, debido a la degradación del polímero las muestras extraídas presentaban un menor tamaño.

Tabla 10. Apariencia visual de las muestras de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) extraídas para el análisis de la caracterización.

Día de extracción	Muestras de PBAT (reactor 1, reactor 2, reactor 3)		
11			
28			
42			
56			
73			
84			

5.4.2 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes SEM fueron empleadas para caracterizar los cambios morfológicos de la superficie de los polímeros durante el periodo de compostaje. Las micrografías de las superficies de las películas de PLA antes del proceso de compostaje y después de 11 días de compostaje, Figura 21, mostraron diferencias. El PLA previo al compostaje presentaba superficies lisas y un espesor de 20 μm , imágenes a) y b) de la Figura 21. En contraste con las imágenes SEM después de 11 días de compostaje, c), d), e) y f) de la Figura 21, que presentaron una superficie rugosa y porosa, correspondiente al desarrollo de microorganismos que generaban la degradación del PLA [65].

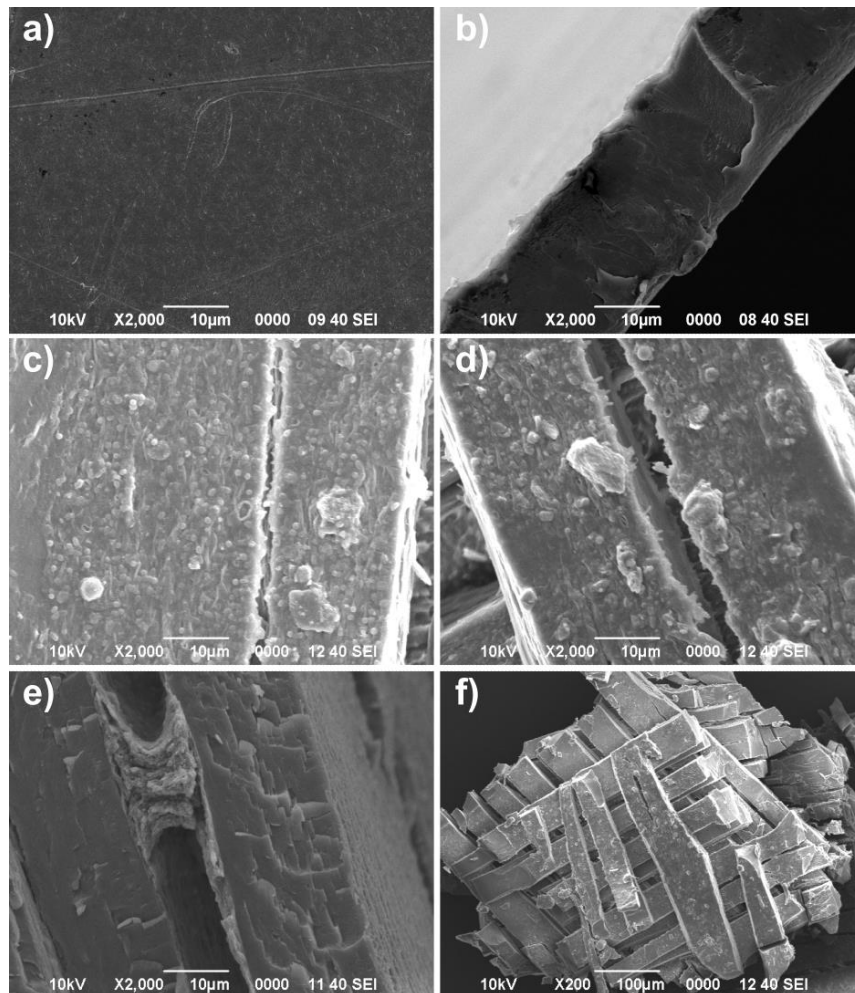


Figura 21. Morfología SEM del polímero biodegradable PLA durante el proceso de compostaje: a) vista frontal y b) vista transversal correspondientes al día 0; c) vista frontal, d) vista frontal, e) vista transversal y f) vista frontal correspondientes al día 11 del proceso.

El espesor del PLA presentó una disminución debido a la degradación [38], pasando de 20 μm a $\sim 15 \mu\text{m}$. La agrupación de los polímeros se aprecia en la Figura 21 e) y f). Los polímeros no se separaron debido al avance de la degradación y la muestra estaba formada por varios polímeros adheridos. Una mayor tasa de degradación se comprobó en la capa en contacto directo con el compost, la Figura 21 d) y f) muestra que la primera capa presentó mayor degradación, lo cual podría estar relacionado a una mayor degradación por la acción de los microorganismos. La Figura 21, también presenta la fragmentación y desarrollo de microorganismos en el material después de 11 días de compostaje. La rápida biodegradación del PLA se debe a la erosión y fragmentación superficial por hidrólisis [38] y al crecimiento de microorganismos [66] presentes en el compost, que degradan el polímero por acción enzimática. El compostaje de los polímeros biodegradables se realiza a una temperatura de 58 °C, cercana a la temperatura de transición vítrea del PLA (58-60 °C), lo que promueve la degradación por hidrólisis, seguida de la asimilación microbiana (bacterias termófilas y hongos) [39].

La Figura 22 muestra los cambios morfológicos de las muestras de la mezcla del polímero PBAT, PLA y almidón de maíz. Previo al proceso de compostaje (Figura 22, 0D) la superficie del polímero era rugosa, con el avance en el tiempo del compostaje la superficie del polímero aumentó su porosidad. En el día 73 y al final del compostaje día 84, Figura 22, se aprecia un aumento en la porosidad. Lo anterior es un factor que favorece el crecimiento microbiano dentro del polímero [29], acelerando la biodegradación. Este polímero también se volvió gradualmente más frágil, debido a la aparición de grietas en el material, por la hidrólisis que produce la ruptura de enlaces en la cadena principal del polímero [67] y por la acción microbiana.

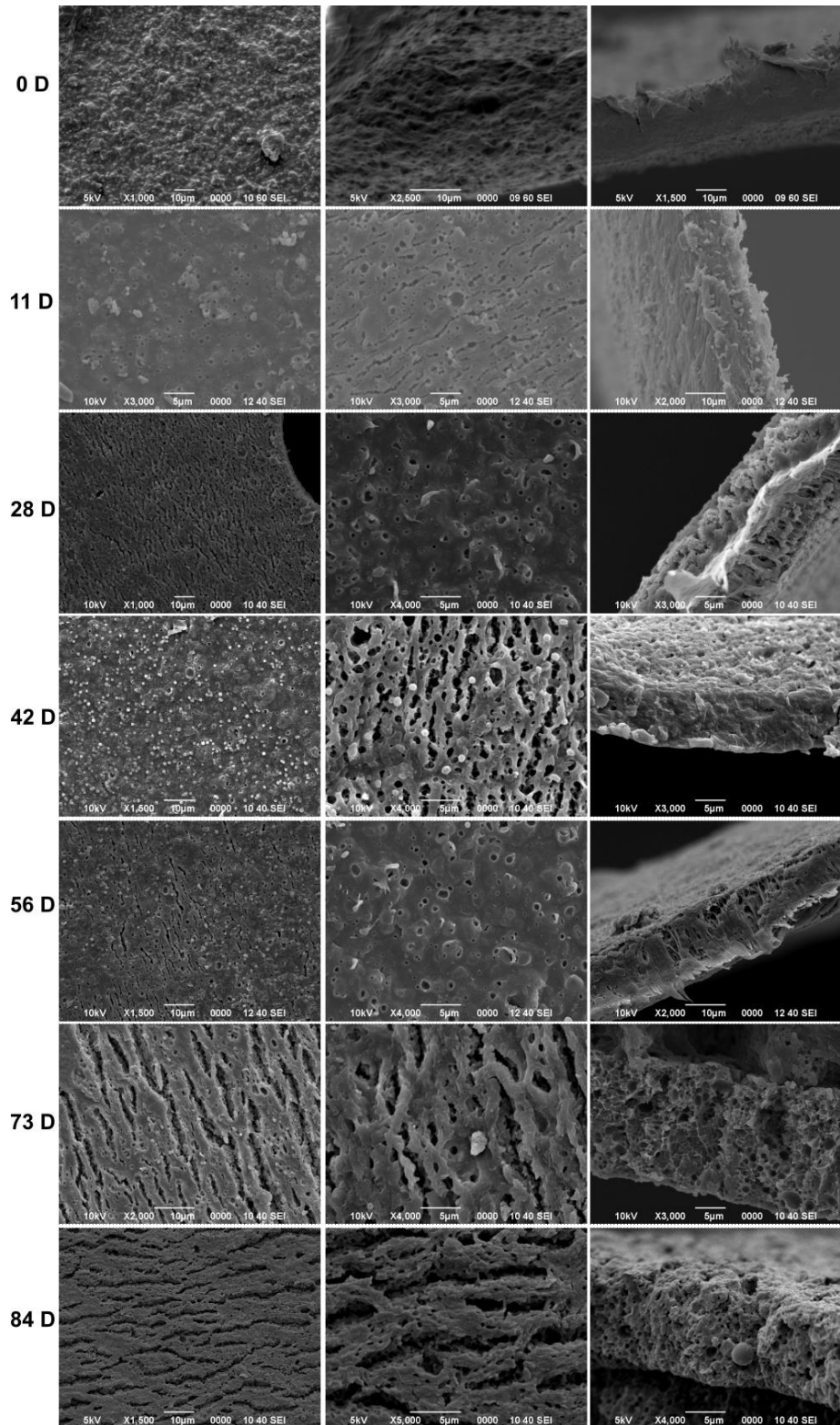


Figura 22. Micrografía electrónica de barrido de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón), primeras dos columnas en vista frontal y tercera columna en vista transversal, a diferentes días de compostaje (0, 11, 28, 42, 56, 73 y 84 días).

Las grietas presentes en el polímero podrían estar relacionadas a que la degradación no es homogénea debido a la mezcla polimérica, por lo que los microorganismos podrían degradar más rápido un componente de la mezcla. Otra característica que evidencia la biodegradación del polímero es la formación de puntos blancos de tamaño micrométricos en la superficie del polímero, tal y como se aprecian en el día 42 y 56, Figura 22. Estos puntos podrían corresponder a metabolitos excretados por los microorganismos tras la asimilación de los polímeros biodegradables [65]. También se registró una disminución en el grosor del polímero, este previo al compostaje era de $\sim 20 \mu\text{m}$ y disminuyó a $10 \mu\text{m}$ en algunos casos, este adelgazamiento es el resultado de la biodegradación [38].

5.4.3 Análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)

Los análisis FT-IR se emplearon para caracterizar el cambio de los polímeros biodegradables causados en el proceso de compostaje. Los polímeros sufren cambios en sus grupos funcionales debido a la transformación de la materia orgánica causada por la acción de los microorganismos. El análisis FT-IR analiza la frecuencia que absorben y transmiten los grupos funcionales de un elemento en concreto [68].

En la Figura 23 a, la gráfica 0 D, corresponde al PLA antes del proceso de compostaje. Las bandas que caracterizan el material se localizan alrededor de 2997, 2940, 1760, 1457, 1045, 870 y 760 cm^{-1} [69]. El PLA, Figura 23 b, presentó cambios en estas bandas a los 11 días. Las cadenas alquílicas que conforman el PLA, se analizan en el rango de $2995\text{-}2850 \text{ cm}^{-1}$ que corresponden a las longitudes de onda de los enlaces simples de carbono e hidrogeno (C-H); sí después del compostaje la intensidad de la absorbancia disminuye, indica que el polímero sufrió degradación [28]. Luego de 11 días de compostaje (Figura 23 b), la intensidad en las bandas de absorción entre los números de onda $2995\text{-}2850 \text{ cm}^{-1}$, esto puede atribuirse a la degradación del material.

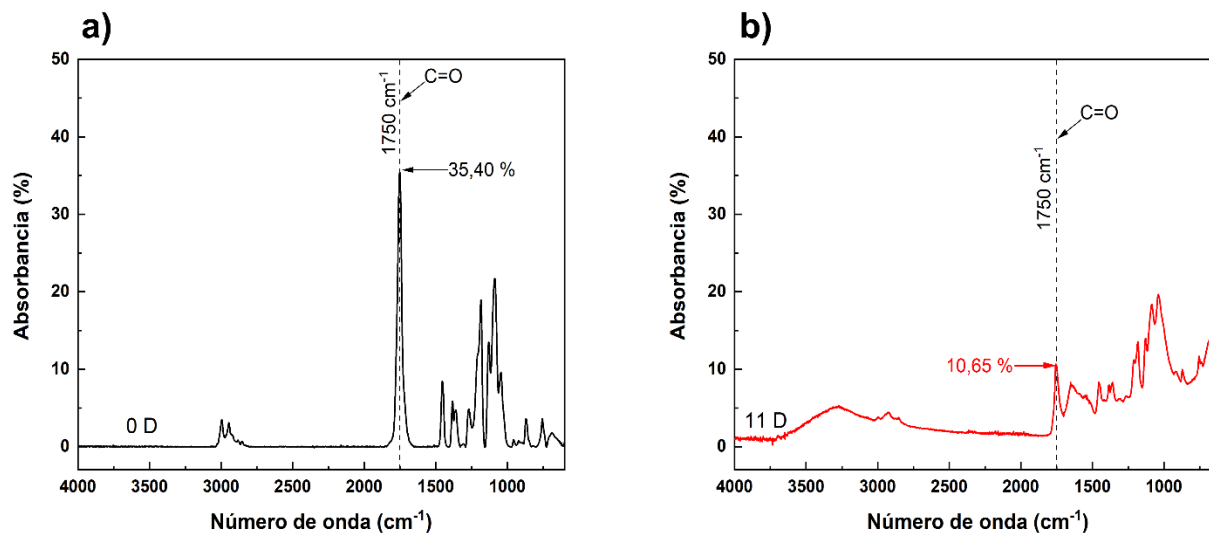


Figura 23. Caracterización mediante análisis FT-IR del polímero PLA durante el compostaje de biopolímeros en los días: a) 0 y b) 11 del proceso de compostaje.

Lv et al [28], analizaron la degradación de PLA empleando análisis FT-IR para caracterizar la degradación, analizando únicamente el cambio de intensidad en el pico del carbonilo localizado en las bandas de absorción de la longitud de onda de 1750 cm^{-1} . Al evaluar los cambios en esta longitud de onda, se observa que este pico solo presentó cambios en intensidad, mas no en desplazamiento en la longitud de onda. El pico alrededor de 1750 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento o tensión del carbonilo (enlace C=O) en el grupo éster presente en el PLA [47], [70], [71]. Luego de 11 días de compostaje (Figura 23 b), el pico localizado en la longitud de onda de 1750 cm^{-1} disminuyó un 24,75 % en la absorbancia del material, pasando de 35,40 % (Figura 23 a) a 10,65 % (Figura 23 b), coincidiendo con la degradación del PLA [47], lo que significa una reducción en el grupo carbonilo presente en el material. Lo anterior, podría indicar que el PLA fue degradado durante el proceso de compostaje. Este polímero biodegradable se fragmentó a causa de la hidrólisis en los grupos funcionales éster de las cadenas largas que lo componen [28]. El principal mecanismo de degradación del PLA es la hidrólisis del enlace éster en presencia o ausencia de microorganismos, además los subproductos de la degradación de PLA se disuelven en agua o se bioasimilan [72] durante el compostaje.

El polímero biodegradable PBAT está mezclado con PLA y almidón de maíz. En la Figura 24 se corrobora que es una mezcla de polímeros biodegradables porque los análisis FT-IR presentan picos característicos de PLA y PBAT. Los picos en los números de onda 1262 cm^{-1} y 1168 cm^{-1} corresponde al enlace C-O para el PBAT y al enlace C=O para el PLA, respectivamente [68].

Uno de los principales mecanismos de degradación corresponde a la hidrólisis del enlace éster [72], produciendo la escisión de la cadena principal en los enlaces éster generando grupos terminales de alcohol y ácido carboxílico [68]. Por lo tanto, se utilizó el indicador de procesos de degradación denominado índice de carbonilo (I_{CO}) calculado como la relación entre el área del pico de carbonilo, en el número de onda 1715 cm^{-1} y el área de la banda del pico CH, elegida como referencia [30], correspondiente al número de onda 1453 cm^{-1} . A medida que aumenta la degradación del polímero a causa de la hidrólisis, se espera un aumento en el índice carbonilo por la liberación de ácido carboxílico que se genera durante el proceso. De lo contrario, la disminución I_{CO} significa que los microorganismos presentes en el compostaje aumentan la asimilación del grupo carbonilo [68], indicando que la degradación se da por un mecanismo diferente a la hidrólisis.

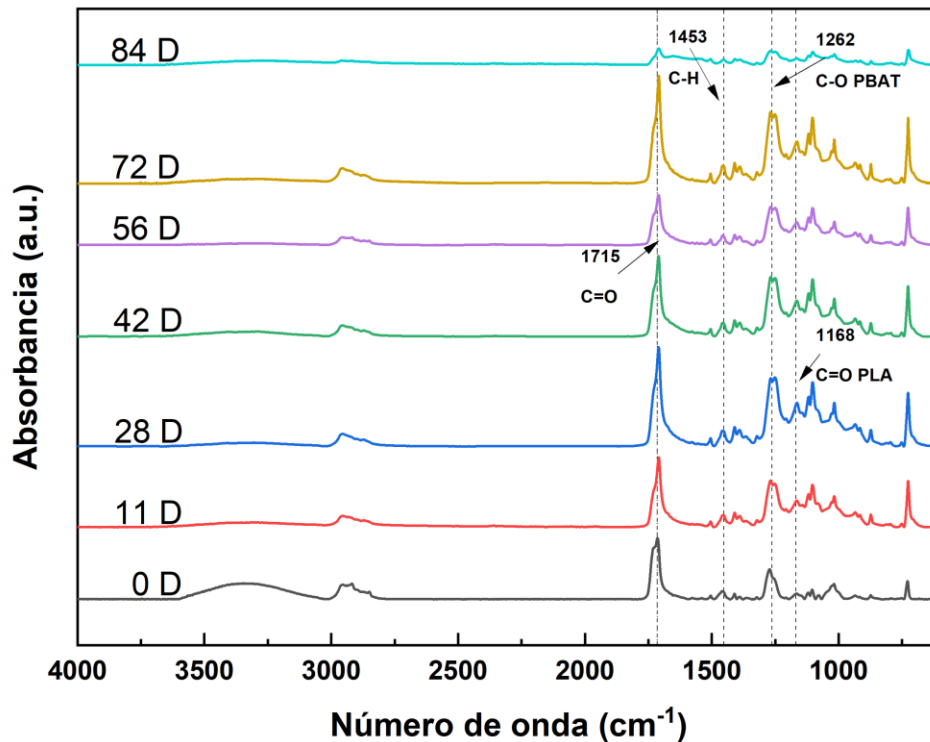


Figura 24. Caracterización mediante análisis FT-IR de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el compostaje de biopolímeros en los días: 0, 11, 28, 42, 56, 72 y 84 del proceso.

La Tabla 11 muestra el comportamiento del I_{CO} del PBAT. En los primeros 11 días de compostaje, el valor I_{CO} pasó de 12,03% a 8,08%, lo que indica que en la primera etapa la degradación ocurrió mediante un mecanismo diferente a la hidrólisis del enlace éster. Los mecanismos de degradación de polímeros biodegradables dentro del proceso de compostaje

pueden ocurrir de forma simultánea con mayor predominancia de alguno. Entre estos mecanismos se encuentra la escisión de la cadena hidrolítica, escisión de la cadena principal y transferencia de hidrógeno β -CH [73].

Tabla 11. Índice carbonilo (I_{CO}) de la mezcla del polímero PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el tiempo (días) del proceso de compostaje.

Días	C=O (1715 cm^{-1})	C-H (1453 cm^{-1})	I_{CO} (%)
0	14,76	1,23	12,03
11	16,27	2,01	8,08
28	23,83	2,62	9,10
42	20,01	2,15	9,30
56	13,09	1,33	9,87
72	26,05	2,74	9,51
84	3,73	0,92	4,08

El comportamiento del I_{CO} del día 11 al día 56, Tabla 11, presentó un aumento gradual en los valores, resultados que confirman que hubo degradación del polímero por escisión de la cadena principal causada por la hidrólisis del enlace éster. Sin embargo, del día 56 al 72, se presentó una leve disminución en el I_{CO} pasando de 9,87 a 9,51 y al finalizar el proceso de compostaje, día 84, el I_{CO} alcanzó un valor de 4,08. Estos resultados son esperados, dado que la literatura indica que el PLA, el PBAT y el almidón pueden degradarse en condiciones de compostaje [73]. El último valor de I_{CO} en el día 84 puede atribuirse además a que la muestra analizada tenía compost adherido a ella, debido al avance de la degradación.

5.4.4 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis TGA se utilizó para analizar la estabilidad y la descomposición térmica de los polímeros biodegradables. El comportamiento se evaluó mediante el cambio de la temperatura a la cual se obtiene el 5, 15 y 50% de pérdida de masa, y las temperaturas a la velocidad máxima de degradación ($T_{m\acute{a}x}$) durante el proceso de compostaje. La $T_{m\acute{a}x}$ registrada en la primera derivada de las curvas TG correspondiente a las curvas termogravimétricas derivadas (DTG). Las curvas TGA y las curvas DTG de las muestras de PLA, Figura 25, muestran que la descomposición térmica, previo al proceso de compostaje (0 D, Figura 25) y después de 11 días (11 D, Figura 25) se produce en un paso, comportamiento propio de polímeros puros [44].

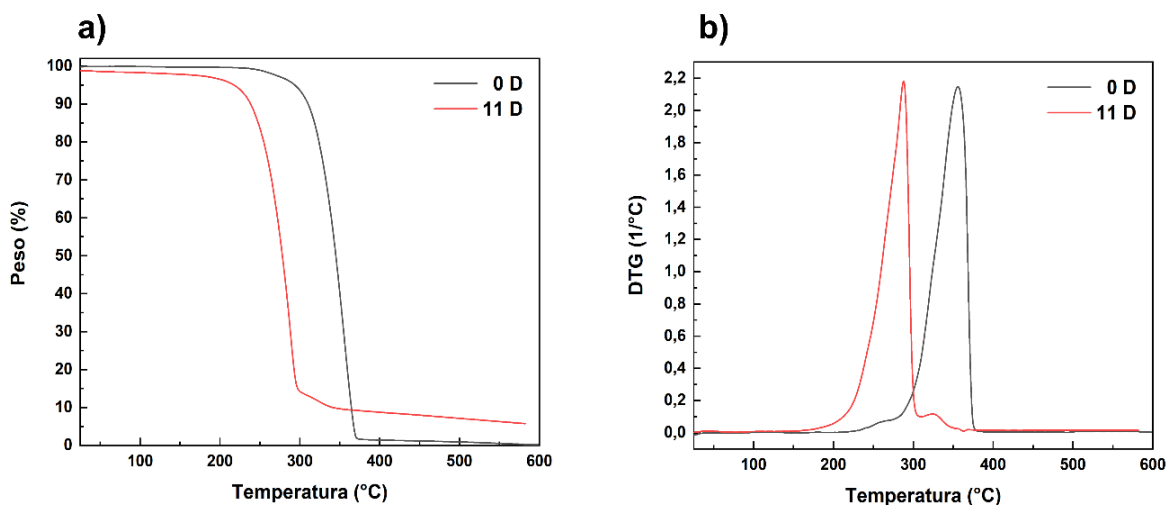


Figura 25. Termogramas del polímero biodegradable PLA a) TGA y b) DTG correspondientes a los días 0 y 11 del proceso de compostaje.

La temperatura a la que se alcanza el 5% de pérdida de masa, la temperatura al 15 y 50% de pérdida de masa y la temperatura máxima del pico de degradación de las muestras de PLA, disminuyeron en un 26, 22, 19 y 19% respectivamente, después de 11 días de compostaje, Tabla 12. La temperatura de 50% de pérdida de masa y la temperatura máxima de degradación presenta el mismo porcentaje de disminución debido a la cercanía, una diferencia de 10,8 °C en el día 0 y de 9,6 °C en el día 11, Tabla 12. La disminución de la estabilidad térmica se podría atribuir a una estructura molecular más irregular debido a una disminución en el peso molecular más amplia y un aumento en el contenido de grupos terminales después de la degradación [67]. Una vez que las moléculas de agua penetran en los espacios intersticiales de los polímeros biodegradables, se facilita el ingreso de los microorganismos, aumentando la tasa de biodegradación, lo que podría influir en la caída de la estabilidad térmica [74], después de 11 días de compostaje.

Tabla 12. Resultados TGA del polímero biodegradable PLA durante el tiempo de duración del compostaje.

Tiempo (días)	Temperatura (°C)			
	5%	15%	50%	máx
0	293,8	318,5	345,2	356,0
11	217,5	248,0	278,2	287,8
Δ Temperatura (%)	-26	-22	-19	-19

Las curvas TGA y DTG de las muestras de la mezcla PBAT, PLA y almidón de maíz durante el proceso de compostaje, (Figura 26 y Tabla 13), indican que la descomposición térmica ocurre en dos pasos debido a la incompatibilidad entre las dos matrices poliméricas [68] principales PLA y PBAT. El pico de degradación menor de la mezcla polimérica corresponde al PLA presente en la mezcla, y el pico de degradación mayor corresponde a PBAT [68]. La Tabla 13 muestra los valores correspondientes a cada pico durante el proceso de compostaje. Con respecto al almidón de maíz, dado que no hubo picos adicionales, se concluye que el compuesto era compatible o miscible con una o ambas matrices poliméricas.

Tabla 13. Resultados TGA de la mezcla del polímero de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) durante el tiempo (días) del proceso de compostaje.

Tiempo (días)	Temperatura (°C)				
	5%	15%	50%	*Máx PLA	Máx PBAT
0	203,06	303,09	385,06	312,56	398,09
11	280,49	324,61	389,90	310,64	397,67
28	282,93	319,36	390,10	312,24	398,20
42	279,63	320,16	390,39	305,94	397,66
56	284,16	349,12	391,99	306,68	397,17
72	281,37	345,34	392,73	310,27	397,25
84	259,33	333,86	392,21	305,23	394,97

* Corresponde a la mezcla de PBAT, PLA y almidón, no al PLA puro.

En la Tabla 13, se muestra que durante los primeros 11 días de compostaje, las temperaturas $T_{5\%}$, $T_{15\%}$ y $T_{50\%}$ presentaron un incremento de 38,13%, 7,10% y 1,26% respectivamente. La estabilidad térmica, la temperatura de inicio y la temperatura a la tasa máxima de degradación de los polímeros biodegradables dependen de su composición y rellenos utilizados [75]. Dado que no se conoce la composición química exacta de la mezcla del polímero biodegradable, no se puede derivar la razón de este comportamiento. El comportamiento del cambio de temperatura, Tabla 13, no es constante debido al conglomerado polimérico y la adhesión del compost sobre las muestras extraídas, como se explicó previamente, siendo esta la causa de la variación en las temperaturas reportadas en la Tabla 13.

Al finalizar el proceso de compostaje después de 84 días, si bien, las temperaturas necesarias para lograr una pérdida de masa de 5, 15 y 50%, Tabla 13, presentaron un aumento de 27,71%, 10,15% y 1,86%, respectivamente, en comparación a la muestra previa al proceso de compostaje, día 0, Tabla 13. El pico de degradación del PLA se redujo de 312,56 °C a 305,23 °C; y el

correspondiente a PBAT pasó de 398,09 a 394,97 °C, resultados que corroboran que la mezcla de PBAT, PLA y almidón de maíz, presentó degradación [68], durante el compostaje.

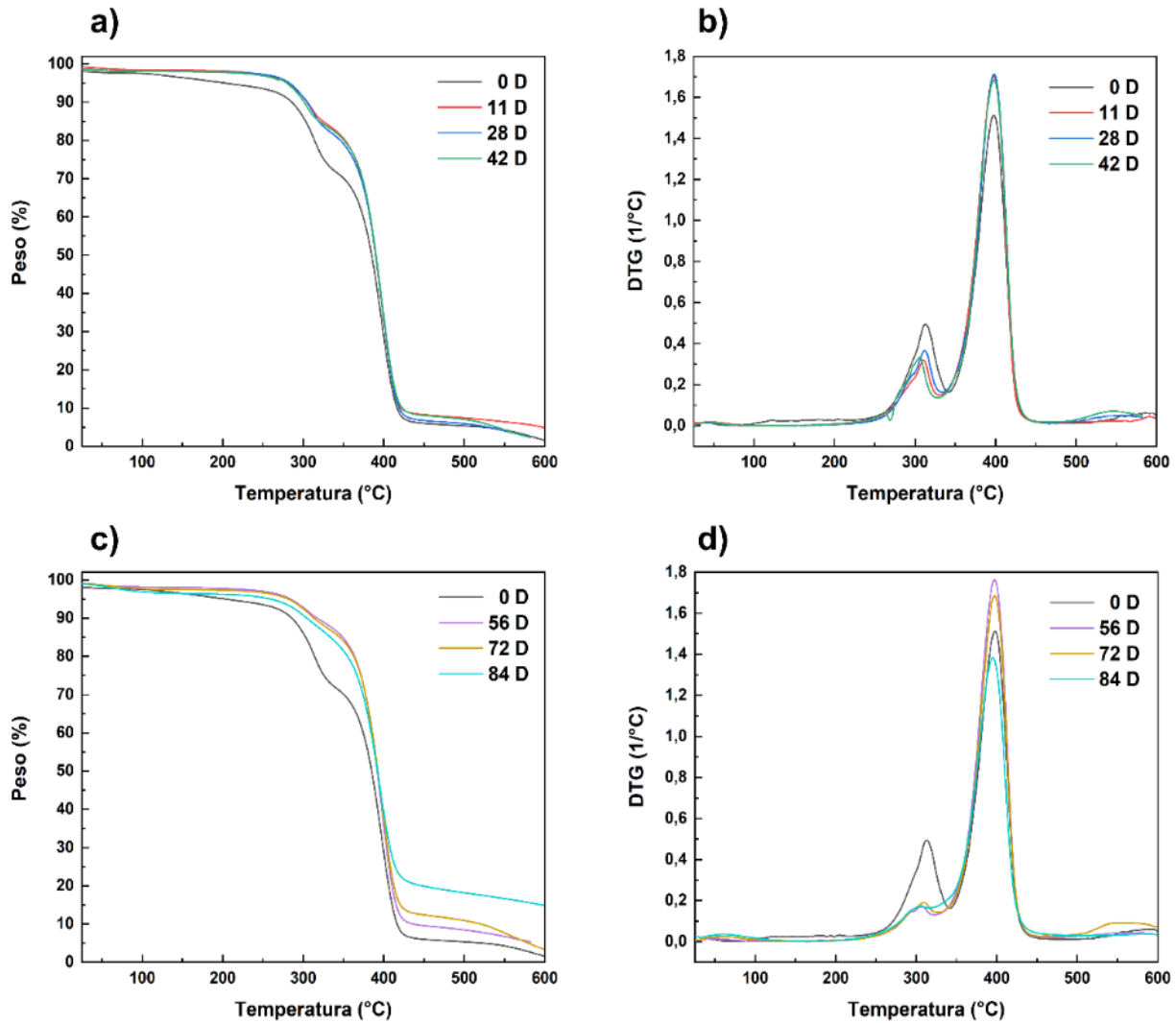


Figura 26. Termogramas de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón) a) TGA y b) DTG correspondientes a los días 0,11, 28 y 42 del proceso de compostaje; y c) TGA y d) DTG correspondientes a los días 0,56, 72 y 84 del proceso de compostaje.

5.4.5 Análisis de calorimetría de barrido diferencial (DSC)

El DSC se empleó para analizar cambios en la propiedades térmicas y comportamientos de cristalización y fusión en los biopolímeros causados por la degradación mediante el proceso de compostaje [67]. Las curvas de calentamiento DSC del PLA, en la Figura 27 a, presentaron el pico correspondiente al punto de fusión del PLA localizado entre 139 y 171 °C [38]. Este

resultado se obtuvo al inicio y después de 11 días del compostaje. El PLA es un polímero semicristalino [69], y como tal consta de una fase cristalina, una fase amorfa y moléculas enlazadas que aparecen en ambas fases, donde la cristalización y fusión corresponden a transiciones entre fases [76]. Después de 11 días de compostaje, la temperatura de fusión disminuyó 3,98 °C, pasando de 151,97 °C a 147,99 °C. Este resultado se presenta en la curva de calentamiento de la Figura 27 a.

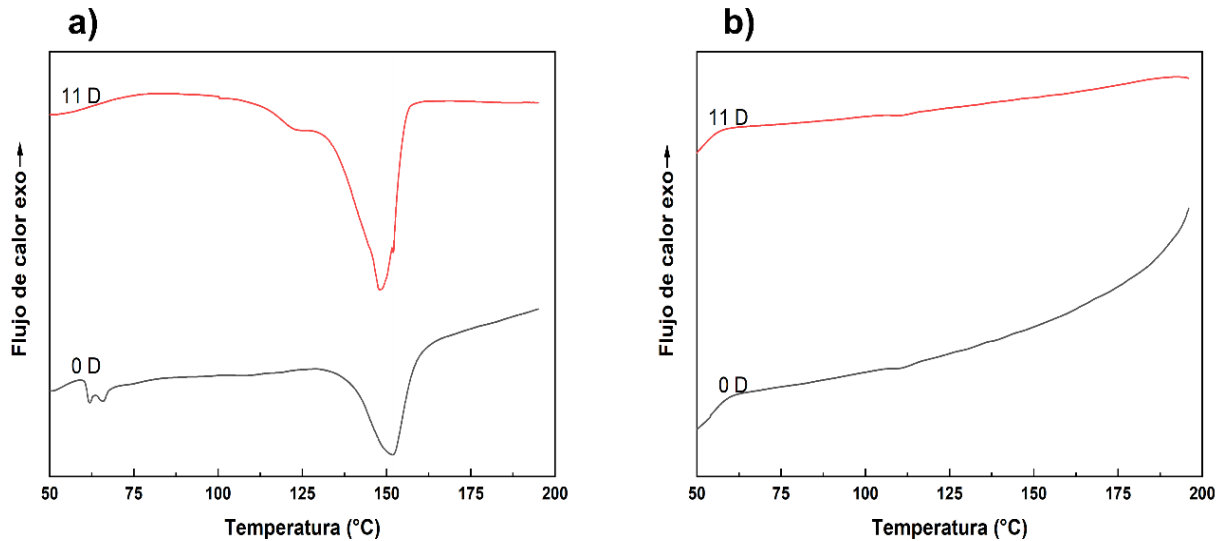


Figura 27. Termogramas DSC del polímero biodegradable PLA a) curvas de calentamiento y b) curvas de enfriamiento al inicio del compostaje y 11 días después.

Si el área del pico del punto de fusión disminuye indica una degradación del polímero [39], ya que esto significa que el PLA requiere menos energía para el movimiento molecular [77]. Sin embargo, la entalpía de fusión obtenida mediante la integración del área del pico de fusión muestra un aumento de 24,06 J/g, pasando de 21,93 J/g previo al proceso de compostaje (Figura 27 a, 0 D) a 45,99 J/g después de 11 días en compostaje (Figura 27 a, 11 D). Este aumento podría estar relacionado al compost adherido a las muestras de PLA analizadas, por esta razón el aumento en la entalpía de fusión no se considera al evaluar la degradación del PLA. Por lo tanto, considerando la disminución de la temperatura de fusión, cambio atribuido a la escisión de las cadenas poliméricas [78] y el análisis DSC, se podría indicar que el polímero biodegradable PLA se degradó durante el proceso de compostaje.

El presente estudio también reveló que el PLA podría estar combinado con otro componente ya que previo al proceso de compostaje para el registro de la temperatura de transición vítrea del

PLA (Figura 27 a, 0 D) ~ 60 °C [69], se presentan dos picos endotérmicos en 61,3 °C y 66 °C. Estos picos después de 11 días de compostaje no se registraron en el análisis DSC, dando a entender que dicho componente se degradó durante este periodo de tiempo. Otra evidencia de que el PLA, esta con combinación con otro material es que no registra el pico exotérmico, ni antes ni después del compostaje, correspondiente a la cristalización en frío entre 79-116 °C [38], tal como se aprecia en las curvas de enfriamiento, Figura 27 b, característico del PLA puro [30].

En cuanto a la mezcla de PBAT, PLA y almidón de maíz, sus propiedades térmicas se analizaron mediante DSC permitiendo determinar las interacciones entre los componentes, se sabe que las propiedades físicas dependen de la composición de la mezcla polimérica [79]. Las curvas de calentamiento DSC, Figura 28 a, muestran que la mezcla polimérica es casi amorfa. Los polímeros amorfos no pueden experimentar transiciones de cristalización y fusión [80], por esta razón en las curvas de calentamiento, Figura 28 a, no se observan picos exotérmicos de recristalización, ni picos endotérmicos que indiquen fusión del polímero; y las curvas de enfriamiento presentan una leve cristalización.

Los resultados DSC sugieren que los componentes de la mezcla polimérica analizada en el presente estudio son miscibles entre sí. Las curvas de calentamiento, Figura 28 a, no muestran picos característicos de los componentes que la conforman. Además, la inexistencia del punto de fusión característico del PLA, ocurre cuando un componente semicristalino (PLA) es miscible en un polímero amorfo (PBAT), lo cual confirmaría un alto grado de miscibilidad entre las mezclas [81]. Sin embargo, esta aparente miscibilidad se puede atribuir a que el contenido del PLA dentro de la mezcla es bajo, ya que entre mezclas poliméricas de PLA y PBAT, una mezcla rica en PBAT es más miscible que la mezcla rica en PLA [82]. Además, los resultados de TGA evidencian incompatibilidad entre el PBAT y el PLA porque la descomposición térmica ocurre en dos pasos. Adicionalmente, el poco porcentaje de PLA en la mezcla se corrobora con los resultados DSC, Figura 28 a, porque en las curvas de calentamiento no hay registro de los picos característicos del material y en las curvas de enfriamiento, Figura 28 b, se registra una leve cristalización, asociadas al PLA por registrarse entre el rango entre 120 °C y 152 °C [82].

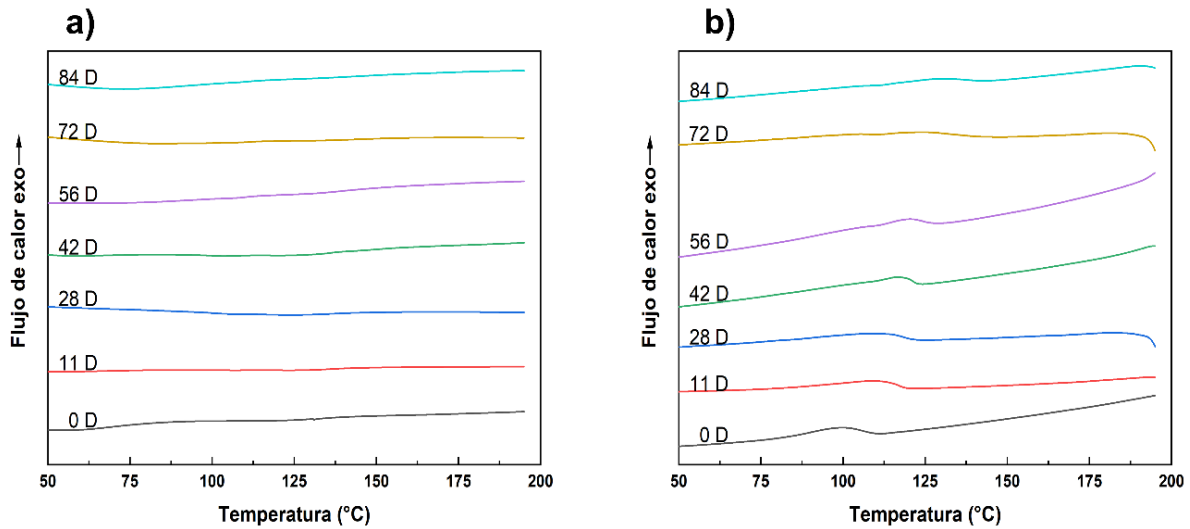


Figura 28. Termogramas DSC de la mezcla del polímero biodegradable PBAT (PBAT, PLA y almidón): a) curvas de calentamiento y b) curvas de enfriamiento para diferentes días de compostaje durante todo el proceso.

5.5 Efecto de la degradación de polímeros biodegradables en la composición del compost

Los indicadores de calidad son herramientas útiles para evaluar el estado de la fertilidad de un suelo [83] o compost. Por lo tanto, los resultados de la Tabla 14, fueron empleados para determinar si existe un efecto de la degradación de los polímeros biodegradables, en la composición del compost obtenido de los tres tratamientos (PLA, PBAT y Control) después de 12 semanas en compostaje. Además, analizar el cambio en la composición de los tratamientos respecto residuo sintético inicial (RS). Las propiedades químicas y fisicoquímicas evaluadas, Tabla 14, fueron: contenido de humedad (CH), pH, conductividad eléctrica (CE), carbono (C), materia orgánica (MO), relación carbono-nitrógeno (C/N), nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B). Los elementos nutrientes del abono orgánico, se clasifican en nutrientes principales (N, P y K), nutrientes secundarios (Ca, MG, sodio (Na) y S) y micronutrientes (B, cobalto (Co), Cu, Fe, Mn, molibdeno (Mo) y Zn) [84].

Tabla 14. Valores promedio de las propiedades químicas y fisicoquímicas obtenidos mediante análisis químico de abonos orgánicos.

Característica	Inicio (Día 0)	*Final (12 semanas después)		
	RS	PLA	PBAT	Control
CH (%)	55,05±0,07	53,80±0,06 ^a	53,60±0,21 ^a	52,70±0,32 ^a
pH (H ₂ O)	6,4±0,1	6,5±0,1 ^{a,b}	6,4±1,1 ^a	6,8±0,1 ^b
CE (mS/cm)	3,4±0,1	5,0±0,9 ^a	5,1±0,3 ^a	4,4±0,1 ^a
C (% masa)	43,60±0,16	36,58±0,08 ^a	36,08±0,72 ^a	37,25±1,18 ^a
MO	62,30±0,23	52,31±0,11 ^a	51,59±1,03 ^a	53,27±1,69 ^a
C/N	20,4±0,4	18,4±0,6 ^a	19,8±1,3 ^a	21,7±0,7 ^a
N (% masa)	2,14±0,06	1,99±0,07 ^a	1,82±0,10 ^a	1,73±0,06 ^a
P (% masa)	0,18±0,01	0,46±0,01 ^a	0,44±0,02 ^{a,b}	0,41±0,01 ^b
Ca (% masa)	0,42±0,03	1,28±0,03 ^a	1,24±0,05 ^a	1,18±0,02 ^a
Mg (% masa)	0,11±0,01	0,30±0,01 ^a	0,29±0,01 ^a	0,27±0,01 ^a
K (% masa)	0,42±0,03	1,16±0,02 ^a	1,11±0,03 ^{a,b}	1,06±0,02 ^b
S (% masa)	0,10±0,00	0,28±0,00 ^a	0,27±0,01 ^{a,b}	0,26±0,00 ^b
B (mg/kg)	8±1	18±0 ^a	17±1 ^{a,b}	16±0 ^b
Cu (mg/kg)	24±1	63±1 ^{a,b}	65±1 ^a	59±0 ^b
Fe (mg/kg)	3 887±301	13 345±582 ^a	12 457±1020 ^a	12 702±946 ^a
Mn (mg/kg)	126±16	359±12 ^a	351±13 ^a	332±18 ^a
Zn (mg/kg)	89±4	212±5 ^a	206±6 ^a	200±4 ^a

* A los tratamientos, después de 12 semanas de compostaje, se les aplicó un análisis de la varianza no paramétrica: Valores con letras iguales en la misma fila no son significativamente diferentes (prueba de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$).

El contenido de humedad recomendada por la FAO para un compost maduro después de 3 meses se encuentra entre 30 y 40% [62], el compost de los tres tratamientos en el día 84 presentaba una humedad aproximada de 38,5%, estando dentro del rango ideal, según la FAO. Sin embargo, luego del proceso de secado para la extracción de los polímeros, el compost se hidrató con agua destilada hasta alcanzar ~55% de humedad para igualar las condiciones de análisis de abonos orgánicos a las del residuo sintético (RS), Tabla 14.

Se determinó que el pH presentó diferencias significativas entre el tratamiento de PLA y el control, además experimentaron un aumento en el pH con respecto al RS, mientras que el PBAT reportó el mismo valor de pH del residuo sintético, Tabla 14. El aumento en el pH podría estar atribuido a la degradación y la mineralización de los compuestos orgánicos durante el proceso de compostaje. El rango óptimo de pH se encuentra entre 6,5 y 8,5 [62], y entre 5 y 8,5 según la

Norma Chilena de Compost NCh 2880 [85]. Considerando la desviación estándar de pH para el PBAT, se concluye que todos los tratamientos se encuentran dentro del rango óptimo.

El nivel de conductividad eléctrica (CE) no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (PLA, PBAT y Control), Tabla 14. La norma NCh 2880, realiza una clasificación según la CE en compost de Clase A con valores inferiores a 3 dS/m (equivalente a 3 mS/cm) y compost de Clase B con valores inferiores a 8 dS/m [85]. Todos los valores de CE de los tratamientos fueron superiores a 3 dS/m e inferiores a 8 dS/m; por lo tanto, clasificarían como compost clase B. La CE es un indicador relevante porque señala la concentración de sales presentes en el compost; y una alta concentración puede inhibir la germinación de las semillas o causar efectos nocivos en las plantas [26]. Además, se observa que hubo aumento en la CE de todos los tratamientos en comparación con el valor del RS. El aumento presentado fue de un 47,1% para el compost con PLA, 50% para el compost con PBAT y de 42,2% para el control. Estos aumentos evidencian la obtención de una mayor concentración de sales después del proceso de compostaje producto del progreso en la mineralización de la materia orgánica [86].

El carbono no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, Tabla 14. Sin embargo, en comparación con el carbono inicial presente en el residuo sintético (RS), si disminuyó en los tratamientos, determinándose una disminución de un 15,97% en promedio, Esta disminución podría estar relacionada a la oxidación del carbono producto del proceso de compostaje, que a la vez se traduce en una disminución en la relación carbono-nitrógeno (C/N) [87].

Los valores de materia orgánica (MO) de los tres tratamientos no presentan diferencias, Tabla 14, con un promedio de 52,39%. No obstante, en comparación con la MO del RS presentaron una disminución de un 15,97%, comportamiento típico del proceso de compostaje [88], asociado al proceso de mineralización de la MO [86]. La norma NCh 2880 [85], indica que el contenido de un compost de clase A, la mayor calidad, presenta una MO superior o igual a 45%.

La relación C/N no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, Tabla 14. Los valores se mantuvieron cercanos a la relación del RS previo al inicio del proceso de compostaje.

Sin embargo, el compost procedente de los tratamientos con polímeros exhibió una disminución de una C/N del RS de 20,4% a 18,4% para el tratamiento con PLA y de 19,8% para el tratamiento con PBAT. Lo anterior podría indicar que el material inicial (RS) sufrió degradación, puesto que la relación C/N es un indicador de madurez del compost y valores bajos indican mayor degradación del material inicial [89]. La norma chilena NCh 2880 indica que un compost de clase A, posee una relación C/N entre 10 y 25. En este rango se encuentra la relación C/N de todos los tratamientos. El nitrógeno no presentó diferencias entre los tratamientos y varía entre 1,73 a 1,99 % masa, cumpliendo con el parámetro establecido en la norma NCh 2880 [85], donde se indica que el contenido de nitrógeno total en el compost debe ser superior o igual a 0,5%.

Después del proceso de compostaje el fósforo presentó un aumento de 149,52% en promedio Tabla 14. Los tratamientos que presentaron diferencias fueron el PLA y el control con 0,46% y 0,41% respectivamente, sin embargo todos estuvieron cercanos a 0,5%, considerado como el valor óptimo [90].

Los macroelementos Ca (1,18 a 1,28%), K (1,06 a 1,16%), no muestran diferencias significativas entre los diferentes compost obtenidos de cada tratamiento, Tabla 14. Además, se evidencia que después del proceso de compostaje estos aumentaron en comparación al residuo sintético inicial (RS). La norma NCh 2880 [85] y la Norma Técnica Colombiana 5167 [91] exigen valores mayores a 1 % para estos indicadores, el Ca y K cumplen con este requisito.

El magnesio no mostró diferencias entre los tratamientos después del compostaje. Además, se registró un aumento promedio de 160,61% respecto al presente en el RS. El rango estándar del magnesio varía de 0,25 a 0,70% [92]. El porcentaje de los tres tratamientos varía entre 0,27 a 0,30% manteniéndose dentro del rango estándar.

El azufre presentó diferencias significativas entre el tratamiento de PLA y el control, además todos los tratamientos experimentaron un aumento respecto al azufre del RS, Tabla 14. El porcentaje de azufre aumentó en promedio 170% después del proceso de compostaje pasando de 0,1% a 0,27%, considerando el promedio de los tres tratamientos. El azufre debe ser superior a

0,25% para evitar una deficiencia de azufre en la planta [92], el compost procedente de los tres tratamientos cumplen con este parámetro.

Los requerimientos en cuanto a los micronutrientes varían dependiendo de la aplicación que se le dará al compost. La Tabla 15 muestra los valores necesarios de cada micronutriente según la aplicación. Todos los micronutrientes experimentaron un aumento respecto al residuo sintético (RS) después del proceso de compostaje. El boro aumentó en promedio un 113,3% siendo el valor más alto el de PLA con 18 mg/kg. Mientras que el cobre aumentó en promedio 165,2% con un valor máximo de 65,3 mg/kg para el PBAT. El hierro presentó un aumento promedio de 230,2% con un valor máximo de 13 344,7 mg/kg correspondiente al tratamiento de PLA. Del mismo modo el manganeso aumentó en promedio un 176,8% con un valor máximo 358,7 mg/kg correspondiente al PLA y finalmente el zinc aumentó en promedio un 131,2% con un valor máximo de 212 igualmente correspondiente al PLA.

Al comparar los valores obtenidos después del proceso de compostaje, Tabla 14, con los mostrados en la Tabla 15, se concluye que una de las aplicaciones óptimas para el compost obtenido en este estudio es el uso hortícola con aplicación al suelo. Todos los parámetros cumplen a excepción del boro, que sí requeriría ser ajustado para alcanzar 100 mg/kg. La mayoría de los micronutrientes presentaron el mayor aumento en el compost obtenido del tratamiento PLA. Concediendo con lo reportado por Mierzwa-Hersztek et al [93], quienes concluyeron que el compost procedente de la adición de polímeros compuestos sintéticos y derivados de materiales naturales, desintegrados durante el compostaje es una mezcla compuesta que puede utilizarse con éxito en la agricultura.

Tabla 15. Contenidos mínimos de micronutrientes, expresados en mg/kg, de abonos con nutrientes principales y/o secundarios, para diversas aplicaciones [84].

Micronutriente	En cultivos extensivos y pastos con aplicación al suelo	En fertirrigación o en uso hortícola con aplicación al suelo
Boro (B)	100	100
Cobalto (Co)	20	-
Cobre (Cu)	100	20
Hierro (Fe)	5000	200
Manganeso (Mn)	1000	100
Molibdeno (Mo)	10	10
Zinc (Zn)	100	20

Al finalizar el proceso de compostaje las propiedades químicas y fisicoquímicas evaluadas que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 14) fueron: CH, C, MO, C/N, N, Ca, Mg, Fe, Zn y Mn. Los indicadores CH, C, MO, C/N, N presentaron en promedio una disminución respecto al RS de 3,1%, 15,97%, 15,97%, 2,1% y 13,71 respectivamente, en la Figura 29 evidencia este comportamiento. Mientras que los indicadores Ca, Mg, Fe, Zn y Mn presentaron un aumento promedio respecto al RS de 193,65%, 160,61%, 230,2%, 131,2% y 176,8% respectivamente, la Figura 30 muestra los aumentos respectivos.

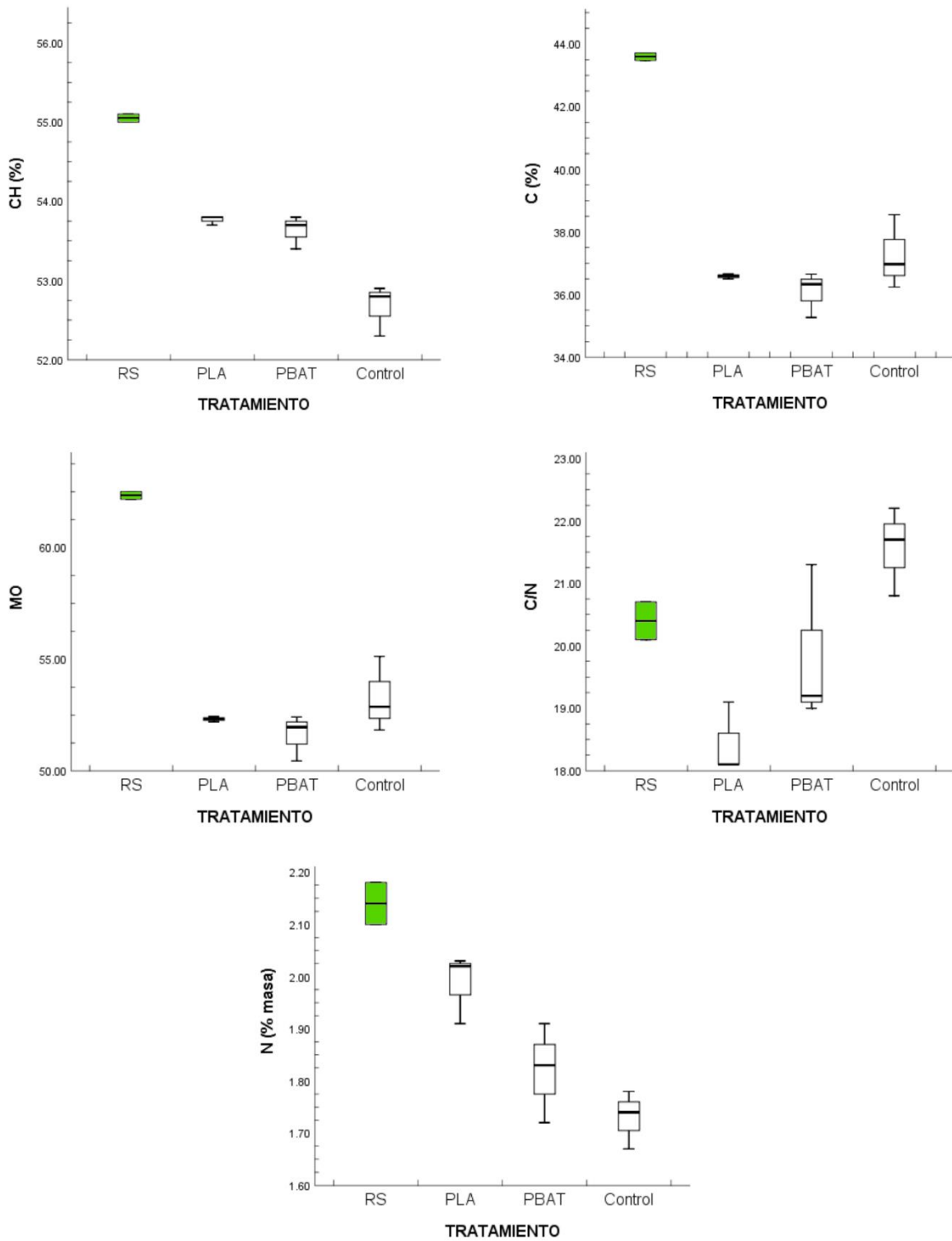


Figura 29. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (PLA, PBAT y Control) después del compostaje; y disminuyeron respecto a los valores iniciales del RS.

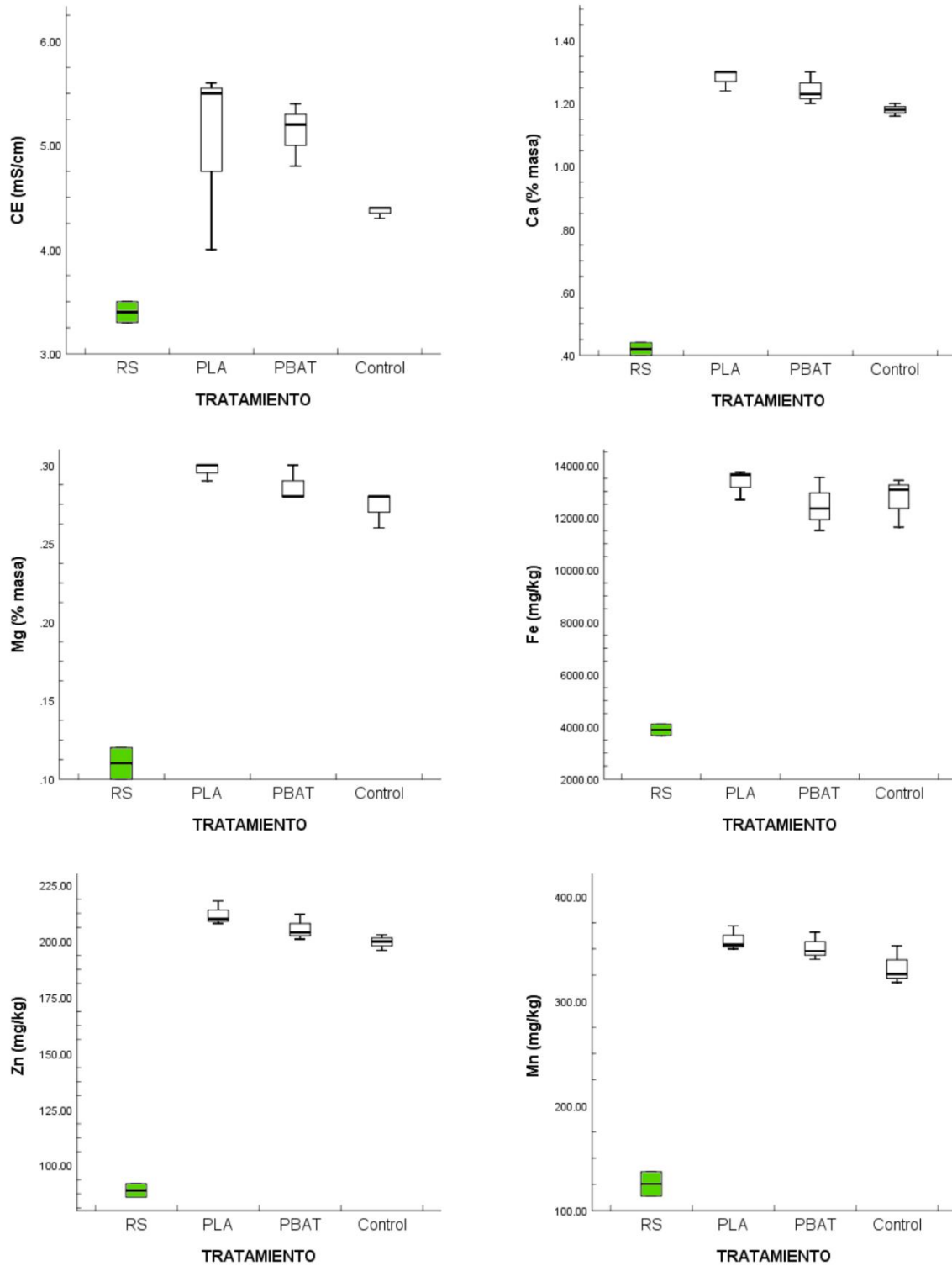


Figura 30. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (PLA, PBAT y Control) después del compostaje; y aumentaron respecto a los valores iniciales del RS.

Los indicadores de calidad del compost no presentaron diferencias significativas entre los polímeros biodegradables analizados PLA y PBAT, Tabla 14. Sin embargo, se registraron diferencias entre los polímeros y el tratamiento control. El PBAT difiere del tratamiento control en pH y Cu, Tabla 14, Figura 31. Mientras que el PLA difiere del tratamiento control en los indicadores CE, P, K, S y B Tabla 14, Figura 32.

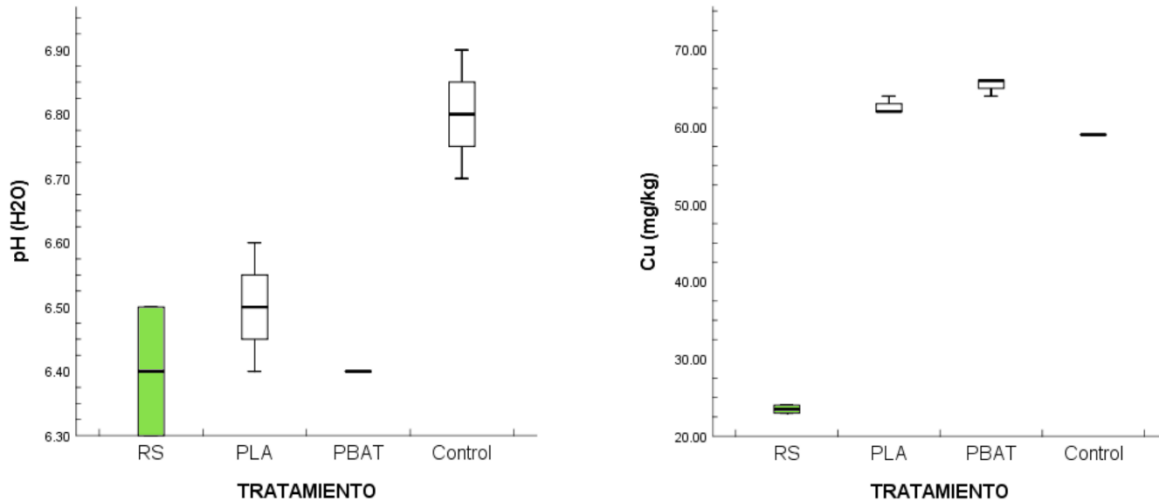


Figura 31. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que presentaron diferencias significativas entre PBAT y Control después del compostaje; y su cambio respecto a los valores iniciales del RS.

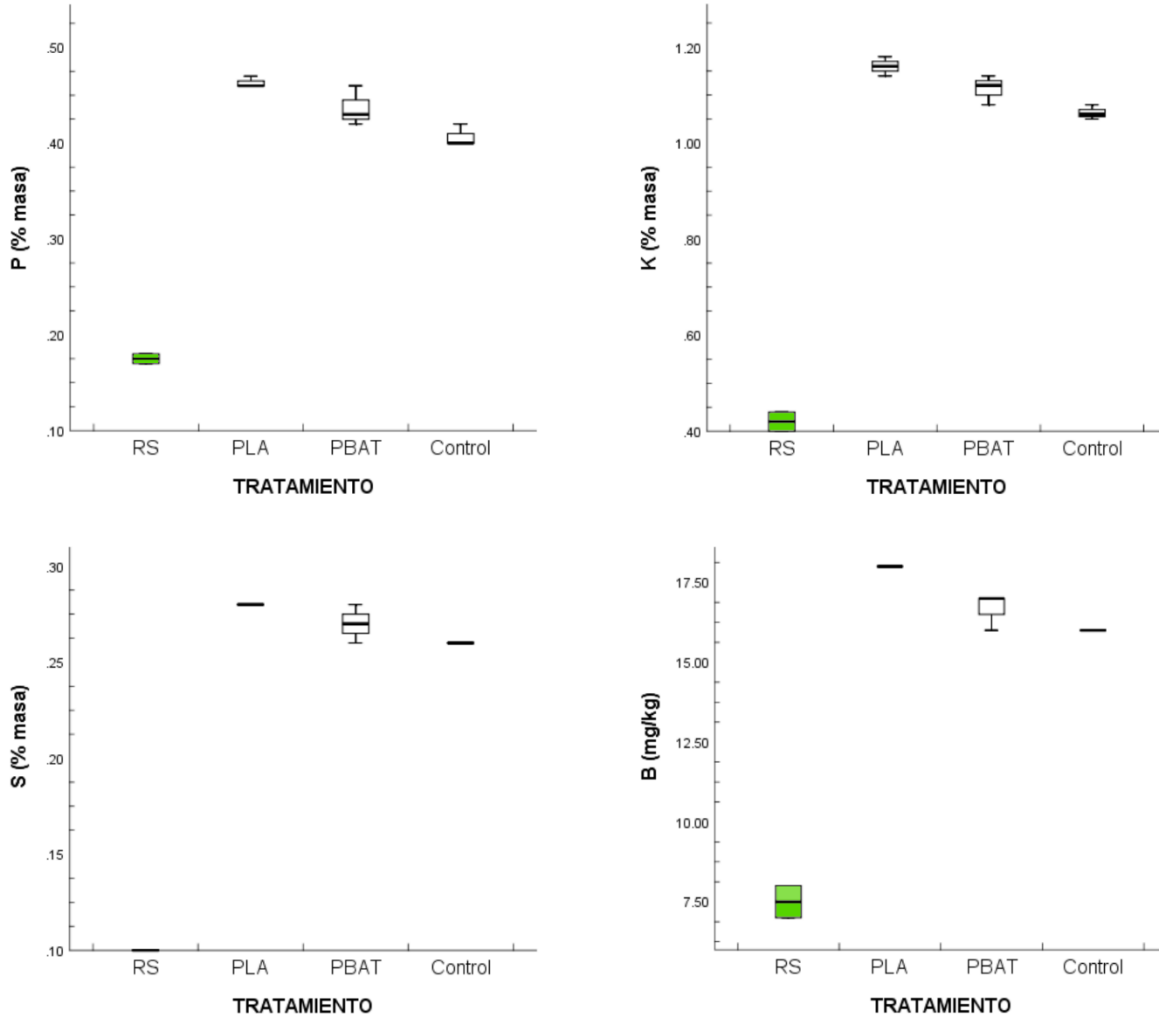


Figura 32. Gráficos de cajas de los valores de los indicadores de calidad del compost que presentaron diferencias significativas entre PLA y Control después del compostaje; y aumentaron respecto a los valores iniciales del RS.

El Reglamento Técnico de Costa Rica RTCR 485:2016 Sustancias Químicas, Fertilizantes y Enmiendas para uso agrícola, tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos contaminantes establece un criterio de caracterización de los elementos presentes en el compost (enmienda orgánica) en más de 0,5% expresados como concentraciones totales en peso seco. De acuerdo con los valores de la Tabla 14 y el RTCR 485:2016, el compost obtenido del ensayo de compostaje de biopolímeros debe reportar valores de N, P, Ca, Mg, K, S y Fe. El reporte de los resultados corresponde a:

- Compost-PLA 8% N; 1,5% P; 5% Ca; 1% Mg, 5% K; 0,5% S; 6% Fe.
- Compost-PBAT 8% N, 1,5% P; 5% Ca; 1% Mg; 5% K; 0,5% S; 6% Fe.
- Compost-Control 8% N, 1,5% P; 5% Ca; 1% Mg; 5% K; 0,5% S; 6% Fe.

El análisis estadístico muestra que existen diferencias significativas en los valores de algunos indicadores de calidad entre el compost obtenido del polímero biodegradable y el compost tratado con el control, como se muestra en la Figura 31 y la Figura 32. Sin embargo, la caracterización según el RTCR 485:2016 indica que el compost procedente de todos los tratamientos registra o debe reportarse con la misma composición de los indicadores de calidad N, P, Ca, Mg, K, S y Fe. Respecto a los demás indicadores, no deben reportarse por representar menos de 0,2% masa, límite mínimo para reportar un 0,5% según RTCR 485:2016. Considerando el factor comercial y aplicando la caracterización según el RTCR 485:2016, se concluye que no existe un efecto de la degradación de los polímeros biodegradables en la composición del compost obtenido de los tres tratamientos (PLA, PBAT y Control) después de 12 semanas en compostaje.

5.6 *Evaluación mediante ensayos de fitotoxicidad de la calidad del compost resultante de la biodegradación/desintegración de polímeros biodegradables*

5.6.1 **Número máximo de plantas germinadas y número final de plantas**

La calidad/toxicidad del compost obtenido de la desintegración de polímeros biodegradables, se evaluó siguiendo procedimientos adaptados según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005. Los cultivos lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L) se seleccionaron de acuerdo con su tolerancia a la toxicidad.

El invernadero estaba ubicado en Pavas, San José, durante el ensayo de fitotoxicidad la temperatura mínima promedio diaria de la zona varió entre 17 a 19 °C, y la temperatura máxima promedio entre 24 y 30 °C, según el sitio web meteorológico AccuWeather. El invernadero no contaba con regulador de temperatura y humedad relativa. La norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 recomienda que la temperatura debe variar entre 22±10°C, no obstante, durante el ensayo se registraron temperaturas superiores a 32 °C, llegando hasta 36,98 °C

(Anexo 3), superando el rango ideal en ~ 5 °C. Además, el rango de humedad relativa sugerido en la norma se encuentra entre 45 a 95% (Anexo 3), sin embargo, la humedad mínima registrada durante el ensayo fue de 41,79% y la máxima de 99,98%, superando el rango ideal en ~ 5 %.

Otros factores que la norma recomienda es un fotoperíodo mínimo de 16 horas de luz; considerando que en Costa Rica las horas de luz se encuentran entre 5:00 am y 6:00 pm, se contó con un fotoperíodo máximo de 13 horas de luz. Estas variaciones pudieron afectar el desarrollo de ambos cultivos. Los valores de temperatura, humedad relativa y horas de luz dentro del invernadero se deben a las condiciones ambientales de la zona donde se encontraba establecido. Las bandejas de germinación se cambiaron de posición periódicamente para minimizar la variabilidad en el crecimiento de las plantas (debido a las diferencias en las condiciones de ensayo que pudieran presentarse dentro de las instalaciones de cultivo).

El porcentaje de germinación de las semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.) fue de $89,58 \pm 2,66\%$ y de $80,56 \pm 5,07\%$ respectivamente, Anexo 4. En comparación con la tasa de germinación de 87% de ambas especies de plantas, reportadas según las especificaciones técnicas en el empaque, la lechuga presentó en promedio un 2,58% más, mientras que la cebolla un 6,44% menos. La norma establece que la emergencia de las plántulas del grupo de referencia o blanco (tierra comercial) debe ser de al menos el 70% y que la supervivencia media durante la duración del ensayo debe ser de al menos el 90% de este valor. Considerando los factores definidos por la norma y el porcentaje de germinación resultado de los ensayos de laboratorio, el número total de plantas germinadas debe ser superior o igual a 59 plantas de lechuga y 53 plantas de cebolla durante todo el ensayo. Estos valores se determinaron en base al total de las plantas germinadas en las bandejas con la tierra comercial. El total de plantas germinadas corresponde a 105 semillas.

La Tabla 16 muestra los valores promedio calculados de los datos de número de plantas máximas germinadas, número de plantas al final del ensayo y las pérdidas de plantas, del Anexo 5 y del Anexo 6. El número de plantas máximas germinadas corresponde a la máxima cantidad de plantas que germinaron durante el periodo de 21 días, después de germinado el 50% de las semillas del grupo control (TC) de cada especie de planta, posteriormente algunas plantas se marchitaron. De haber asegurado las condiciones óptimas la diferencia entre plantas máximas germinadas y plantas obtenidas al final del ensayo podría haber sido menor o nula, Tabla 16. El

promedio máximo de plantas de lechuga germinadas en la tierra comercial fue de 79 y al final del ensayo se recolectaron 77, reportando una pérdida de 2 plantas. Este resultado supera las 59 plantas de lechuga mínimas que se requieren según lo indicado en la norma. Mientras que las plantas de cebolla de la tierra comercial reportaron un número máximo de plantas germinadas de 52 plantas y al final del proceso se recolectaron 46 (Tabla 16) perdiendo 6 plantas en promedio. Este resultado es inferior al número de plantas mínimo de cebolla que se requiere según lo indicado en la norma y este valor corresponde a 53.

Las condiciones ideales para el cultivo de lechuga consideran una temperatura entre 18-20 °C y una humedad relativa óptima entre 60 y 80% [94]. El rango de temperatura puede oscilar entre 7 y 24 °C [95]. Las temperaturas superiores a 30 °C afectan negativamente la germinación y el desarrollo del cultivo de lechuga [96]. Mientras que la temperatura óptima para el desarrollo del cultivo de cebolla es 14 °C, con temperaturas máximas de 30 °C y mínimas de 7 °C [97]. La temperatura dentro del invernadero osciló entre 18,6 y 28,5 °C, sin embargo, también se reportaron temperaturas superiores a 32 °C, llegando hasta 36,98 °C (Anexo 3). Este factor que pudo repercutir en la germinación de ambas especies de plantas.

La conductividad eléctrica (CE) es otro factor que puede perjudicar la germinación y el desarrollo de las plantas (5). Los valores de CE del compost procedente de los tratamientos del proceso de compostaje de polímeros biodegradables (PLA, PBAT y Control) presentaron un valor de 5,0, 5,1 y 4,4 dS/m respectivamente, Tabla 14. La CE recomendada para el cultivo de lechuga debe ser menor de 3,5 dS/m [95], coincidiendo con lo especificado por la norma NCh 2880 [85], para un compost clase A, para el cultivo de cebolla se considerará este mismo límite de CE. No se determinó el valor de CE de cada mezcla de compost con tierra comercial, porque no se realizaron análisis de suelos para cada combinación, sin embargo se puede concluir que las mezclas con una proporción de 50/50 (compost:tierra comercial) presentaron una mayor CE que las mezclas con una proporción de 25/75 (compost:tierra comercial).

La permeabilidad es un factor determinante para el desarrollo de las plantas. Esta corresponde a la capacidad que tiene el suelo para permitir que el agua penetre a través de él sin cambiar su estructura, cuanto menor es el tamaño de las partículas del suelo, menos permeables son [98]. Este comportamiento se observó en el desarrollo del ensayo. Dado que tanto la tierra comercial como el compost procedente se tamizaron mediante un tamiz de 2 mm, el tamaño de partícula

pudo causar problemas de infiltración de agua, afectando el desarrollo de las plantas. La norma recomienda colocar una capa fina en la superficie de cada mezcla de un material inerte, como la perlita, sin embargo, es mejor mezclar la perlita para favorecer la permeabilidad. Lo anterior, ya que la perlita en el sustrato genera un aumento en la capacidad de aireación, retención de agua y nutrientes favoreciendo el crecimiento [99].

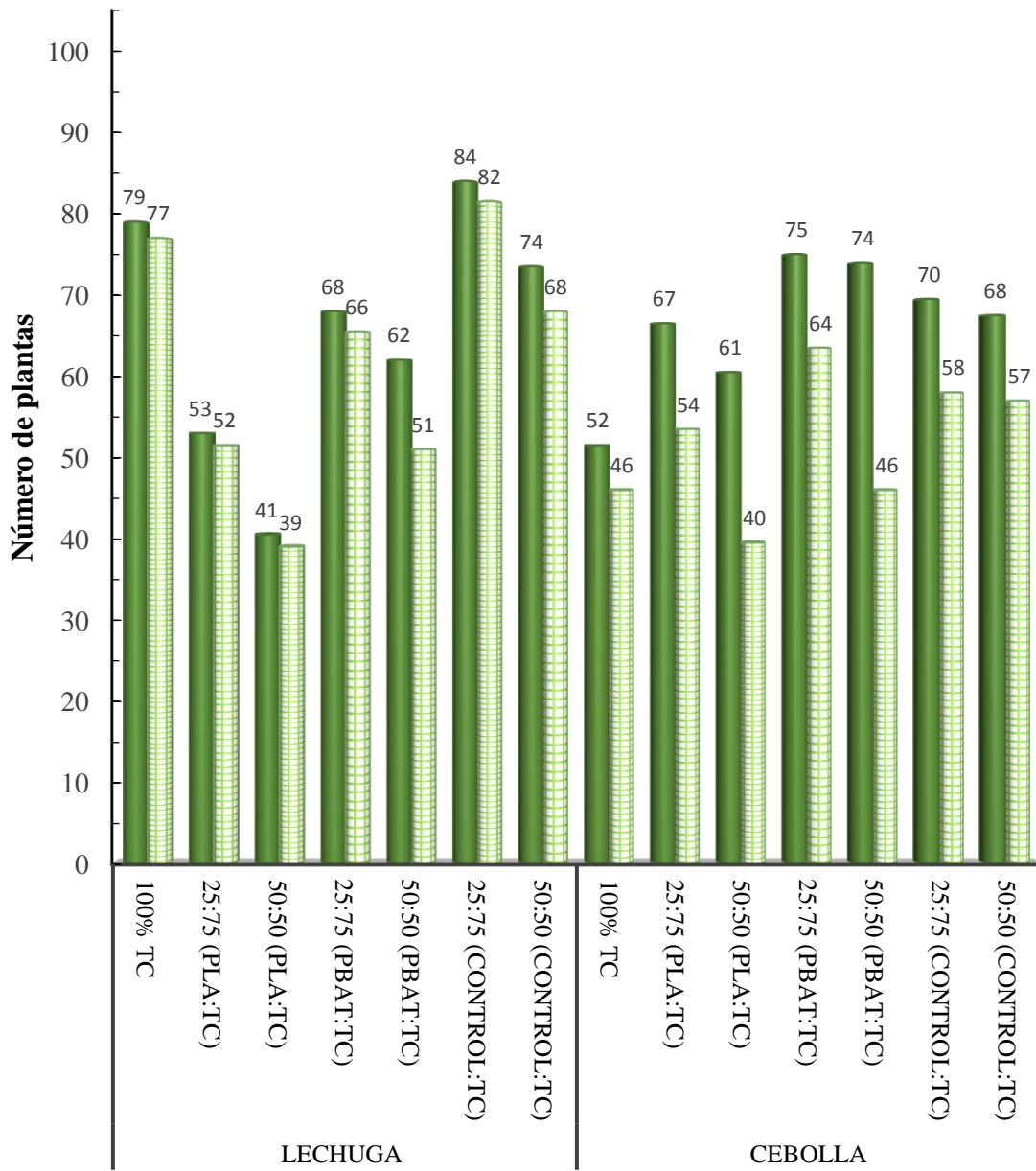
Tabla 16. Valor promedio del número de plantas máximas germinadas, plantas obtenidas al final del ensayo y el número de plantas pérdidas para cada combinación de la mezcla de abonos, correspondientes a cada especie de planta. La mezcla procede del compost de cada tratamiento (C_T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC).

Planta	Mezcla	Proporción de mezcla C _T : TC (% m/m)	Número máximo de plantas germinadas	Número de plantas al final del ensayo	Número plantas pérdidas
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	TC	0:100	79	77	2
	PLA:TC	25:75	53	52	1
		50:50	41	39	2
	PBAT:TC	25:75	68	66	2
		50:50	62	51	11
	Control:TC	25:75	84	82	2
		50:50	74	68	6
Cebolla (<i>Allium cepa</i> L.)	TC	0:100	52	46	6
	PLA:TC	25:75	67	54	13
		50:50	61	40	21
	PBAT:TC	25:75	75	64	11
		50:50	74	46	28
	Control:TC	25:75	70	58	12
		50:50	68	57	11

La Figura 33 representa los resultados de la Tabla 16. La Figura 34 muestra las diferencias porcentuales entre la germinación máxima y el número de plantas al final de ensayo (después de la germinación del 50% del grupo control de cada especie de planta) para las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la TC correspondiente. Los resultados de la germinación máxima y el número de plantas del TC de cada especie de planta se tomaron como punto de referencia (Tabla 16) y se le asignó el valor de cero.

En la Figura 33, se aprecia que el número de plantas de lechuga máximas germinadas y el número de plantas al final del ensayo fue de 79 y 77, respectivamente valores superiores a todas las plantas de lechuga obtenidas de todas las mezclas. Excepto la mezcla 25:75 (Control:TC) que presentó un aumento de 6% en ambos valores (número de plantas máximas germinadas y número de plantas al final de ensayo), respecto a la TC, Figura 34. Además, las combinaciones de mezcla que presentaron el menor porcentaje de germinación máxima respecto a los obtenidos para el TC fueron la mezcla 25:75 (PLA:TC) y la mezcla de 50:50 (PLA:TC) con 33% y 49% menos respectivamente, Figura 34.

Estos resultados evidencian que la adición de compost en esas proporciones de mezcla con la TC empleada afectan negativamente la germinación de las plantas de lechuga. Durante el desarrollo del ensayo no se registraron efectos fitotóxicos visibles como clorosis, deformaciones de hojas y deformaciones del tallo, sin embargo, del total de plantas de lechuga máximas germinadas de todas las mezclas, Tabla 16, de 461 plantas se marchitaron 26. Por esta razón se presenta una diferencia entre el número máximo de plantas germinadas y el número de plantas registrado al final del ensayo. Además, otros factores pudieron influir en el comportamiento del desarrollo de las plantas como la variación de temperatura y la humedad relativa dentro del invernadero, así como la frecuencia de riego. El marchitamiento no es un criterio concluyente sobre la fitotoxicidad del compost. El cultivo no se mantuvo siempre en las condiciones óptimas, por lo tanto, los resultados obtenidos no se pueden atribuir a un único factor. En consecuencia, no se podría afirmar que se presentó cierto grado de toxicidad.



■ Número de plantas máximas germinadas ▨ Número de plantas al final del ensayo

Figura 33. Valores promedio de la máxima germinación y el número de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.) al final de ensayo para cada una de las combinaciones de la mezcla de compost y TC.

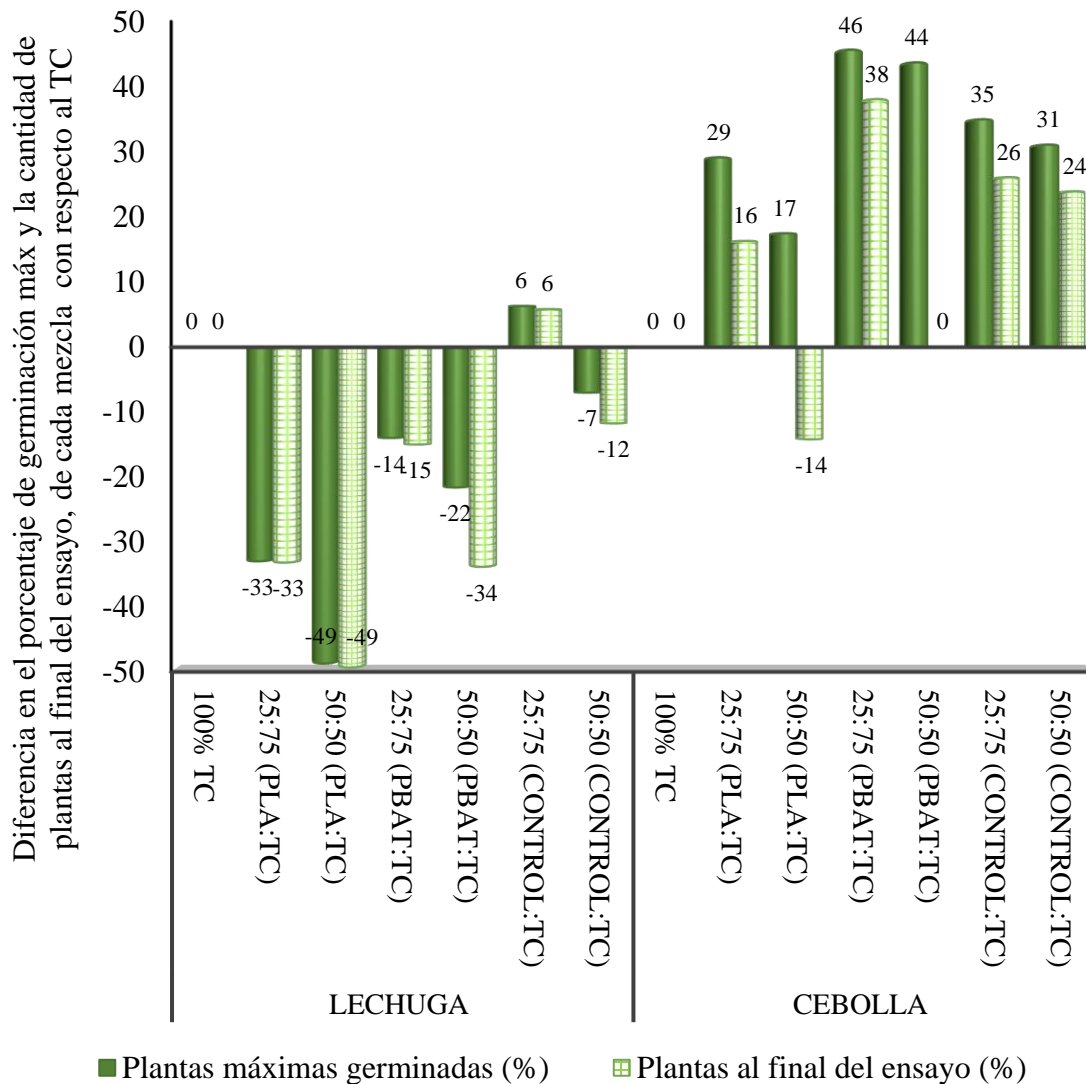


Figura 34. Diferencias porcentuales entre la germinación máxima y la cantidad de plantas al final de ensayo para las diferentes combinaciones de mezcla con respecto a los valores obtenidos para la tierra comercial (TC) para los cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), respectivamente.

En la Figura 33 se puede apreciar que para el cultivo de cebolla todas las combinaciones de la mezcla presentaron valores de germinación máxima superiores a los valores para la cebolla cosechada en TC. Según la Figura 34 las combinaciones de 25:75 (PBAT:TC) y 50:50 (PBAT:TC) registraron el mayor aumento en la germinación máxima con respecto a los resultados obtenidos de TC, con un 46 y 44%, respectivamente. En cuanto al número de plantas al final del ensayo todas presentaron una disminución en comparación con la germinación máxima de cada mezcla. No obstante, el número de plantas al final del ensayo de cada mezcla

fueron superiores al número final de plantas de TC, a excepción de la mezcla de 50:50 (PLA:PBAT) que registro una disminución del 14% respecto al TC (Figura 34).

Estos resultados evidencian que la adición de compost en esas proporciones de mezcla con la TC empleada, mejoran el porcentaje de germinación de la cebolla. Durante el ensayo no se registraron efectos fitotóxicos visibles como clorosis, deformaciones de hojas y deformaciones del tallo. Sin embargo, del total de plantas de cebolla máximas germinadas de todas las mezclas, Tabla 16, de 467 plantas se marchitaron 102. Este marchitamiento no es un criterio concluyente con respecto a la fitotoxicidad de la mezcla de compost y TC empleados. Lo anterior ya que el cultivo no se mantuvo en las condiciones óptimas de temperatura durante la totalidad del ensayo, por lo tanto, los resultados no se pueden atribuir a un único factor.

5.6.2 Apariencia visual de las bandejas de germinación

La Tabla 17 muestra la apariencia de las plantas de lechuga de las bandejas de germinación de cada mezcla al final del ensayo. En esta Tabla 17 se aprecia de forma visual que la germinación en la TC fue mayor a la de las demás mezclas. Además, se observó que en la relación (P) 25:75 de cada mezcla se obtuvo un mayor número de plantas que en la relación 50:50 de cada mezcla. Finalmente, se observó que las plantas en casi todas las mezclas tenían un mayor desarrollo que en las cultivadas en la TC. El fósforo (P) es un elemento indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Un exceso de P permite acelerar el desarrollo de las plantas en el semillero; sin embargo, se debe asegurar una nutrición balanceada durante esta etapa (formación del almacigo de lechuga) del crecimiento de las plantas, en esta no deben faltar el nitrógeno, fósforo y potasio [100]. Por lo tanto, el hecho de que de las plantas obtenidas de las mezclas de compost de cada tratamiento (CT), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC), presentaron un mayor desarrollo al de la TC, se puede atribuir al aporte de fósforo, nitrógeno y potasio que brindó el compost a la mezcla con TC. El porcentaje de masa de fósforo presente en el compost procedente de los tratamientos de PLA, PBAT y Control, es de 0,46, 0,44 y 0,41, respectivamente, Tabla 14. El porcentaje de masa de nitrógeno presente en el compost procedente de los tratamientos de PLA, PBAT y Control, fue de 1,99, 1,82 y 1,73, respectivamente y del potasio fue de 1,16, 1,11 y 1,06, Tabla 14.

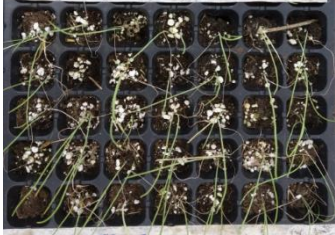






Tabla 17. Apariencia visual de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) de las bandejas de germinación, de una repetición, correspondientes a cada proporción (P) de mezcla. La mezcla procede del compost de cada tratamiento (C_T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC). Las fotografías corresponden al día de finalización del ensayo.

P (%m/m)	Mezcla		
100			
	TC		
25:75			
	PLA:TC	PBAT:TC	Control: TC
50:50			
	PLA:TC	PBAT:TC	Control: TC

La Tabla 18 muestra la apariencia de las plantas de cebolla en las bandejas de germinación de cada mezcla al final del ensayo. En esta se aprecia que el desarrollo de la cebolla en general no fue el óptimo, debido a las condiciones dentro del invernadero, a la poca capacidad de infiltración de agua en las mezclas, así como la frecuencia de riego.

En la Tabla 18 se aprecia visualmente que el desarrollo, longitud del tallo y hojas, en el TC fue mayor a la de las demás mezclas. Además, se observó que la relación (P) 25:75 de cada mezcla obtuvo un mayor número de plantas que la relación 50:50 de cada mezcla. Finalmente, se observó que las plantas en la mayoría de las mezclas tenían un mayor desarrollo que las plantas en la TC.

Tabla 18. Apariencia visual de las plantas de cebolla (*Allium cepa* L.) de las bandejas de germinación, de una repetición, correspondientes a cada proporción (P) de mezcla. Las fotografías corresponden al día de finalización del ensayo.

P (%m/m)	Mezcla		
100	 <p>TC</p>		
25:75	 <p>PLA:TC</p>	 <p>PBAT:TC</p>	 <p>Control: TC</p>
50:50	 <p>PLA:TC</p>	 <p>PBAT:TC</p>	 <p>Control: TC</p>

5.6.3 Biomasa húmeda

La Figura 35 muestra las diferencias porcentuales en la biomasa húmeda respecto a los valores obtenidos en la TC, Tabla 19. Las combinaciones de mezcla que presentaron la mayor disminución de la biomasa en las plantas de lechuga con respecto al TC fueron la mezcla 25:75 (PLA:TC) y la mezcla 50:50 (PLA:TC) con 12 y 42%, respectivamente, Tabla 19. La mayor diferencia de 42% de la mezcla 50:50 (PLA:TC), se debe a que al final del ensayo se obtuvieron 39 plantas, en comparación con 77 plantas obtenidas de la TC (Tabla 16). La biomasa de las plantas está relacionada con su desarrollo, un mayor desarrollo de la planta implica una mayor biomasa.

Tabla 19. Biomasa húmeda promedio del número plantas obtenidas al final del ensayo para cada combinación de la mezcla de abonos, correspondientes a cada especie de planta. La mezcla procede del compost de cada tratamiento (CT), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC).

Planta	Mezcla C _T : TC	Proporción de mezcla C _T : TC (% m/m)	Biomasa húmeda (g)
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	TC	0:100	4,2145±0,4317
	PLA:TC	25:75	3,7066±0,3108
		50:50	2,4292±0,6508
	PBAT:TC	25:75	4,1787±2,3313
		50:50	3,8931±2,1738
	Control:TC	25:75	4,1224±0,0797
50:50		3,9109±1,1112	
Cebolla (<i>Allium cepa</i> L.)	TC	0:100	2,4503±0,6378
	PLA:TC	25:75	1,6573±0,3714
		50:50	0,6827±0,2757
	PBAT:TC	25:75	1,5606±0,4204
		50:50	0,8927±0,2291
	Control:TC	25:75	1,7434±0,1839
50:50		1,4545±0,5648	

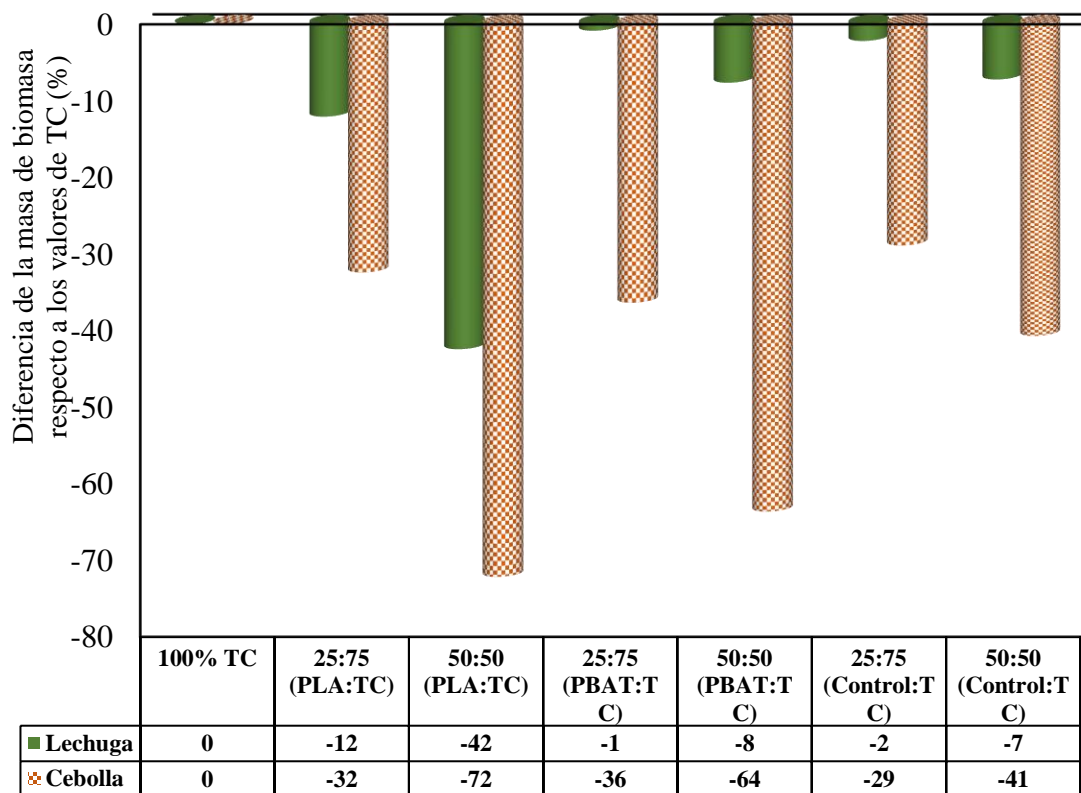


Figura 35. Diferencias porcentuales de la biomasa húmeda, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la TC para lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), respectivamente.

La biomasa húmeda de las plantas de cebolla registró una mayor disminución para todas las combinaciones de la mezcla respecto a la TC, Figura 35. Los valores de la biomasa húmeda del TC de cada especie de planta se tomaron como punto de referencia (Tabla 19). Si bien hubo mezclas que registraron mayor cantidad de plantas al finalizar el ensayo en comparación con las 46 plantas obtenidas de la TC, estas presentaron un menor desarrollo de la planta. Este comportamiento se presentó en las mezclas: 25:75 (PLA:TC), 25:75 (PBAT:TC), 25:75 (Control:TC) y 50:50 (Control:TC). Estos resultados se evidencian en la Figura 35 donde se observa el TC comparado con las otras mezclas.

5.6.4 Resultados en la longitud de la raíz, del tallo y las hojas para las plantas de cebolla y lechuga

Adicionalmente, la Tabla 20 muestra los valores promedio de la longitud de raíz, tallo y hojas de las plantas de lechuga y cebolla del Anexo 5 y Anexo 6. La longitud de la raíz y de las plantas de cebolla correspondiente a cada proporción de mezcla presentaron valores inferiores a los obtenidos de la TC, Tabla 20, evidenciando un menor desarrollo de las plantas. Este resultado también se puede asociar a la biomasa disponible.

Tabla 20. Promedio de la longitud de la raíz, tallo y hojas de las plantas después de 21 días de germinado el 50% del grupo control de cada especie de planta (lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.)) correspondiente a cada proporción de mezcla entre el compost procedente de cada tratamiento (C_T), (PLA, PBAT y Control), y la tierra comercial (TC).

Planta	Mezcla C _T : TC	Proporción de mezcla	Longitud de la	Longitud del tallo
		C _T : TC (% m/m)	raíz (cm)	y las hojas (cm)
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.)	TC	0:100	3,3±1,4 ^d	4,2±0,8 ^b
	PLA:TC	25:75	2,9±1,1 ^c	4,4±1,3 ^{b,c}
		50:50	2,2±0,8 ^a	5,0±1,7 ^{c,d}
	PBAT:TC	25:75	2,9±1,0 ^c	5,7±1,9 ^e
		50:50	2,5±1,1 ^b	5,4±1,9 ^{d,e}
	Control:TC	25:75	4,1±1,5 ^e	3,9±1,3 ^a
	50:50	3,6±1,6 ^d	5,0±2,3 ^{c,d}	
Cebolla (<i>Allium cepa</i> L.)	TC	0:100	2,8±1,4 ^d	11,0±2,7 ^d
	PLA:TC	25:75	2,1±1,2 ^c	7,6±3,3 ^b
		50:50	1,4±0,5 ^a	5,0±2,1 ^a
	PBAT:TC	25:75	1,9±0,9 ^{b,c}	7,5±2,6 ^b
		50:50	1,7±0,7 ^{a,b}	7,2±3,0 ^b
	Control:TC	25:75	2,2±1,2 ^c	8,8±2,7 ^c
50:50		1,9±0,7 ^{b,c}	7,0±2,9 ^b	

Valores con letras iguales en la misma columna correspondiente a cada especie de planta no presentan diferencias significativas (prueba de Kruskal-Wallis, p>0,05).

La Figura 36 muestra las diferencias porcentuales de los valores de la longitud de raíz de cada combinación de mezcla respecto a los resultados de la TC correspondiente a cada especie de planta. Los valores de la longitud de la raíz del TC de cada especie de planta se tomaron como cero (punto de referencia) Tabla 20. La longitud promedio de la raíz de las plantas de lechuga de las mezclas 25:75 (PLA:TC) y 25:75 (PBAT:TC), de 2,9±1,1 y 2,9±1,0 cm respectivamente, no presentaron diferencias significativas, mientras todas las demás proporciones de mezcla

presentaron diferencias, Tabla 20. Además, todas las proporciones de mezcla de PLA:TC y PBAT:TC presentaron disminución de la longitud de raíz con respecto a los valores de TC, Figura 36. La proporción de mezcla de 25:75 reportaron una menor disminución con 12 y 13% para 25:75 (PLA:TC) y 25:75 (PBAT:TC), respectivamente. Mientras que la proporción 50:50, reportó una disminución de 33% y 23% para 25:75 (PLA:TC) y 25:75 (PBAT:TC), respectivamente.

En contraste, la longitud de la raíz de las plantas de lechuga en las dos proporciones de mezcla de Control:TC presentaron un aumento de 25% en la mezcla 25:75 (Control:TC) y de 10% en la mezcla 50:50 (Control:TC), respecto a los valores de TC, Figura 36. No obstante, el aumento de 10% de la mezcla 50:50 (Control:TC) no es significativo en relación con el TC, Tabla 20. En consecuencia, se pudo determinar que a menor porcentaje de compost en la mezcla se produce una menor disminución de la longitud de la raíz para las combinaciones de mezcla de PLA:TC y PBAT:TC; y que un menor porcentaje de compost en la mezcla de (Control:TC), logra un mayor aumento en la longitud de raíz.

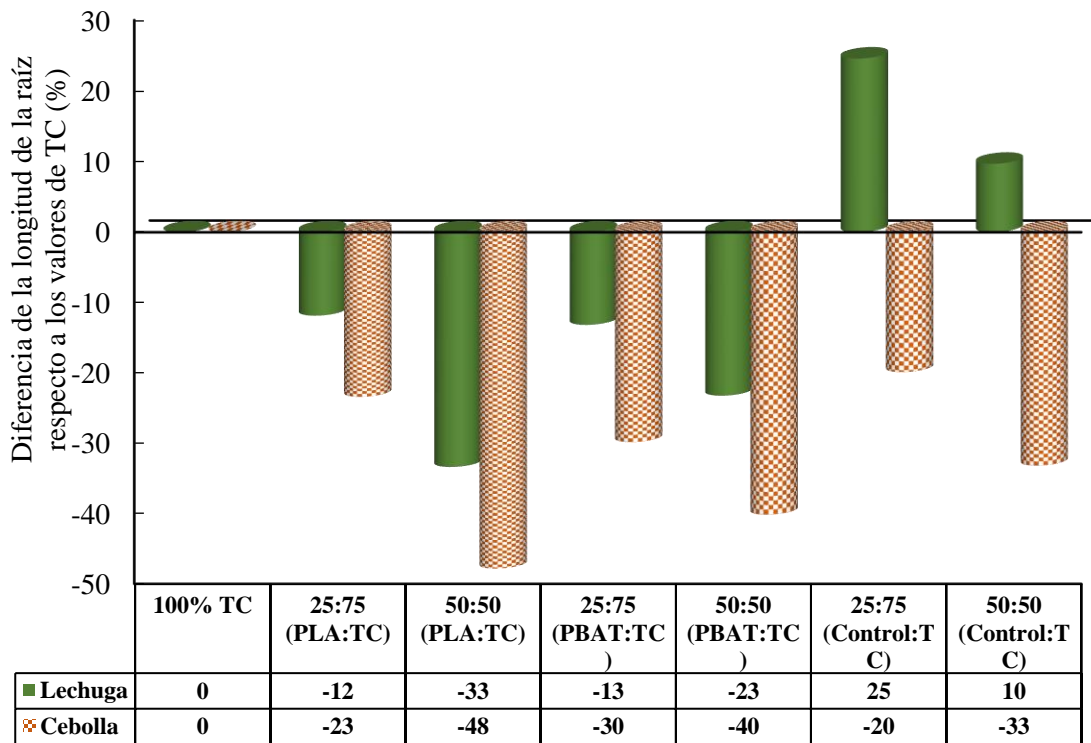


Figura 36. Diferencias porcentuales de la longitud de la raíz, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la TC para lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), respectivamente.

Además, se determinó que la longitud promedio de la raíz de las plantas de cebolla en contraste con los valores de TC presentan diferencias significativas. Las mezclas 50:50 (PLA:TC) y 50:50 (PBAT:TC) no presentan diferencias entre sí, Tabla 20, ambas disminuyeron respecto al TC en 48% y 40%, respectivamente, Figura 36. Además, la mezcla 50:50 (Control:TC), con una disminución de 33%, no difiere de la mezcla 50:50 (PBAT:TC). Las demás combinaciones de mezcla, 25:75 (PLA:TC), 25:75 (PBAT:TC), 25:75 (Control:TC), no son significativamente diferentes entre sí, Tabla 20, presentado una disminución entre 23 y 30%. Este comportamiento evidencia que, a menor porcentaje de compost en la mezcla con TC, se presenta una menor disminución de la longitud de la raíz de la cebolla respecto a los valores de TC.

La Figura 37 muestra las diferencias porcentuales de los valores de longitud de tallo y hojas de cada combinación de la mezcla respecto a los valores de TC correspondiente a cada especie de planta. Los valores de la longitud del tallo y hojas de la TC de cada especie de planta se tomaron como cero (punto de referencia) Tabla 20. La longitud del tallo y hojas de las plantas de lechuga en la mezcla 25:75 (Control:TC) fue la única que presentó una disminución respecto a la TC de 8% con un promedio de 3,9 cm, Figura 37, Tabla 20. Las demás combinaciones de mezcla presentaron valores superiores a la TC. La mezcla 25:75 (PLA:TC) no es significativamente diferente de la TC ya que su aumento fue de 4%, que corresponde a 0,2 cm (2 mm) respecto al TC.

Las mezclas 50:50 (PLA:TC), 50:50 (PBAT:TC) y 50:50 (Control:TC), no presentan diferencias significativas entre sí, con aumentos respecto a la TC de 18, 26 y 17%, respectivamente, Figura 37. La mezcla 25:75 (PBAT:TC) fue la que reportó la mayor longitud del tallo y hojas respecto a la TC, con un 34%, es decir 1,5 cm superior al promedio de la TC, Tabla 20. Sin embargo, la mezcla 25:75 (PBAT:TC) no presenta diferencias significativas con la mezcla 50:50 (PBAT:TC). En consecuencia, se puede afirmar que todas las mezclas favorecieron el desarrollo de la longitud del tallo y hojas de las plantas, a excepción de la mezcla 25:75 (Control:TC). Además, la proporción de 50:50 de las combinaciones de mezcla de PLA:TC y Control:TC dieron como resultado la mayor longitud del tallo y hojas en comparación con las mezclas con una proporción de 25:75.

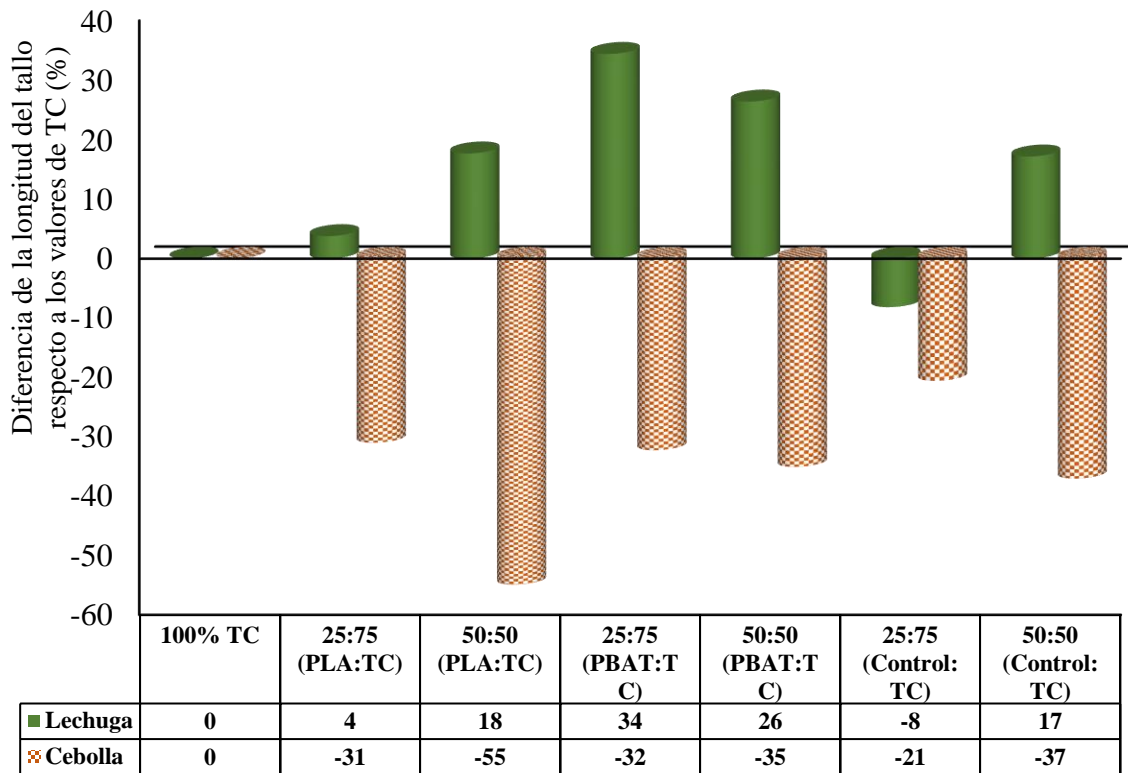


Figura 37. Diferencias porcentuales de la longitud del tallo y hojas, de las diferentes combinaciones de mezcla, respecto a los valores obtenidos de la tierra comercial (TC) para lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.), respectivamente.

Respecto a la longitud del tallo y hojas de las plantas de cebolla, todas las mezclas presentaron una disminución en comparación a los valores de la TC, Figura 37. La mezcla 50:50 (PLA:TC) presentó la mayor disminución respecto a los valores de TC con un 55%, siendo significativamente diferente de todas las demás mezclas. Las mezclas que no presentaron diferencias significativas entre ellas fueron 25:75 (PLA:TC), 25:75 (PBAT:TC), 50:50 (PBAT:TC) y 50:50 (Control:TC) Tabla 20, con una disminución respecto a la TC de 31,32, 35 y 37%, respectivamente. Finalmente, la mezcla 25:75 (Control:TC) fue significativamente diferente de todas las demás mezclas y presentó una disminución de 8%.

6. CONCLUSIONES

1. La lámina de PLA de 20 micras presentó una desintegración del 100% a las 12 semanas del proceso de compostaje en condiciones de laboratorio, desde el día 14 del proceso ya no se distinguían visualmente fragmentos de PLA en la matriz de compostaje. La lámina de PBAT (mezclado con PLA y almidón) presentó un grado de desintegración del 99,43% después de 12 semanas en compostaje. La presencia de sistemas microbianos, los componentes y las condiciones del método para obtener el compost, proporcionaron un entorno adecuado para la biodegradación/desintegración de los polímeros en estudio. Además, el proceso de compostaje obtuvo un producto higienizado.
2. La norma UNE-EN ISO 20200:2015 es aplicable a diferentes materiales, sin embargo, no se debe generalizar la biodegradabilidad de un material en específico ya que el proceso de desintegración depende de diversos factores como la composición inicial del compost, las condiciones de compostaje y las características del material.
3. Los resultados de los análisis cualitativos (SEM, FT-IR, TGA, DSC) de la biodegradación de los biopolímeros mediante compostaje, evidenciaron la biodegradación de ambos polímeros. El análisis SEM reveló cambios considerables en la rugosidad y formación de microorganismos en la superficie, demostrando que se había producido una degradación significativa de los polímeros. Además, se comprobó la formación de conglomerados poliméricos y que no presentaban el mismo grado de avance en la degradación, siendo la primera capa en contacto directo con el compost la que presenta el mayor desarrollo de microorganismos en la superficie y la mayor degradación.
4. Los análisis por FT-IR mostraron variación en la composición química, demostrando que hubo cambios en los grupos funcionales del material. En el PLA la degradación se evidencia en la disminución de intensidad de absorbancia en el pico localizado en la longitud de onda 1750 cm^{-1} , después de 11 días en compostaje. En el caso del PBAT, la disminución de absorbancia se presenta en los picos con números de onda 1262 cm^{-1} y 1168 cm^{-1} , el pico de carbonilo, en el número de onda 1715 cm^{-1} y el área de la banda del pico CH correspondiente al número de onda 1453 cm^{-1} , después de 84 días en compostaje.
5. El análisis de TGA muestra degradación de los polímeros biodegradables en estudio. Puesto que en el PLA la temperatura del inicio 5% de pérdida de masa, disminuyó en un 26% pasando de $293,8\text{ °C}$ a $217,5\text{ °C}$ después de 11 días de compostaje, esto implica una

disminución en la estabilidad térmica del material. En el caso de la mezcla polimérica de PBAT el pico de degradación del PLA se redujo de 312,56 °C a 305,23 °C; y el correspondiente a PBAT pasó de 398,09 a 394,97 °C, resultados que corroboran que la mezcla de PBAT, PLA y almidón de maíz, presentó degradación durante el compostaje.

6. Los análisis por DSC evidenciaron cambios en las propiedades térmicas del PLA después de 12 semanas de compostaje. Este análisis confirmó que el PLA es un polímero semicristalino, que presentó degradación durante el proceso porque la temperatura de fusión disminuyó de 151,97 °C a 147,99 °C. En el caso de la mezcla polimérica de PBAT, se determinó que la mezcla es casi amorfa, por lo tanto, no se muestran cambios en las curvas DSC, pero sí se confirmó la presencia de PLA y PBAT en la mezcla.
7. La caracterización de los polímeros debe realizarse mediante diversos análisis como SEM, FT-IR, TGA, DSC para no incurrir en errores de interpretación. Los resultados del análisis de DSC sugieren que los componentes de la mezcla polimérica (PBAT+ PLA+ almidón de maíz) eran miscibles, sin embargo, los resultados TGA de la mezcla polimérica evidencian incompatibilidad entre el PBAT y el PLA dado que la descomposición térmica ocurre en dos pasos. Esa aparente miscibilidad se atribuye a un bajo porcentaje de PLA en la mezcla.
8. El grosor de los polímeros biodegradables es un factor determinante para establecer el tiempo de compostaje requerido para lograr la biodegradación, se evidenció que los fragmentos de los polímeros que formaron conglomerados presentaban diferentes grados de degradación, siendo los que se encontraban en contacto directo con la matriz los que presentaban un mayor grado de degradación según los resultados de SEM.
9. Los polímeros analizados muestran un alto potencial para ser biodegradados en condiciones de compostaje industrial a temperaturas termofílicas de 58 °C. Por lo tanto, estos resultados sugieren que se podrían emplear sistemas de compostaje de pilas, ya que alcanzan temperaturas de ~60 °C.
10. La composición del compost obtenido de los tres tratamientos (PLA, PBAT y Control) después de 12 semanas en compostaje, según el RTCR 485:2016 contienen 8% N; 1,5% P; 5% Ca; 1% Mg, 5% K; 0,6% S y 6% Fe. Por lo tanto, no existe un efecto de la degradación de los polímeros biodegradables, en la composición del compost obtenido de los tres tratamientos (PLA, PBAT y Control) después de 12 semanas en compostaje.

11. El compost resultante de los tres tratamientos se puede emplear en fertirrigación o en uso hortícola con aplicación al suelo, sí se refuerza el boro hasta alcanzar 100 mg/kg.
12. En total 77 plantas de lechuga en la TC se mantuvieron durante todo el ensayo, superando las 59 plantas de lechuga que se requieren como mínimo según la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005. Contrario a las plantas de cebolla que al final del proceso se recolectaron 46, estando por debajo de las 53 plantas de cebolla que se requieren según lo indicado en la norma.
13. El marchitamiento de las plantas se puede atribuir a varios factores, por lo tanto, este no es un criterio concluyente en relación con la fitotoxicidad del compost.
14. Las mezclas de compost procedentes de la desintegración de polímeros biodegradables con tierra comercial (TC), sugiere un efecto negativo en la germinación máxima de las plantas de lechuga. A excepción de la mezcla 25:75 (Control:TC) que reportó una germinación máxima superior a la TC en un 6%. Varios factores pudieron influir en el comportamiento del desarrollo de las plantas como la variación de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero, y la permeabilidad del agua en el suelo. En consecuencia, no se podría afirmar que se debe solo a la composición de las mezclas.
15. Las plantas de cebolla reportaron una germinación máxima superior en todas las combinaciones de mezcla respecto a la TC. La germinación máxima reportada de las mezclas se encuentra entre 17% a 47%.
16. Un menor porcentaje de compost en la mezcla produjo una menor disminución de la longitud de la raíz de las plantas de lechuga para las combinaciones de mezcla de PLA:TC y PBAT:TC; mientras que un menor porcentaje de compost en la mezcla de (Control:TC), logra un mayor aumento en la longitud de raíz.
17. Las condiciones del compostaje industrial son un tema relevante en los sistemas de gestión de polímeros biodegradables para cerrar el ciclo de estos materiales, optando por la sostenibilidad ambiental mediante la aplicación del modelo de la económica circular. El compostaje de polímeros debe considerarse dentro del sistema integral de gestión de residuos en conjunto con la reutilización, el reciclaje y la recuperación de estos materiales.

7. RECOMENDACIONES

1. Una vez determinado el porcentaje de desintegración de los empaques fabricados de polímeros biodegradables mediante lo estipulado en la norma UNE-EN ISO 20200:2015, se recomienda estudiar la relación de cantidad de polímero en el residuo sintético inicial. Con el objetivo de determinar la cantidad máxima de polímeros que se puede agregar sin afectar el porcentaje de desintegración, aumentando la eficiencia del proceso.
2. El grosor de la lámina del polímero es un factor clave en próximos estudios para determinar el porcentaje de degradación que se obtendría bajo las mismas condiciones de este estudio.
3. Se recomienda estudiar la interacción de la combinación de dos o más materiales de empaques fabricados de polímeros en una misma matriz de compostaje, para analizar si se logra obtener el mismo grado de desintegración, que se obtuvo de forma individual.
4. Se recomienda realizar estudios de la desintegración de los polímeros analizados en el presente estudio mediante compostaje, sí los componentes de la matriz inicial de compostaje difieren del residuo sintético indicado en la norma UNE-EN ISO 20200:2015.
5. Para el compostaje industrial del PBAT se puede considerar la recirculación de los remanentes del polímero, retenidos mediante tratamientos físicos de refinado (como los procesos de cribado), incorporándolos a nuevos lotes de compostaje con la finalidad de optimizar el tiempo de compostaje.
6. El compost obtenido del compostaje de biopolímeros primero debe tamizarse con un tamiz de 2 mm según lo estipulado en la norma UNE-EN ISO 20200:2015 antes de utilizarlo.
7. Realizar un análisis de la comunidad y actividad microbiana de la matriz de compostaje durante el proceso, para evaluar de forma indirecta sí el polímero es empleado por los microorganismos como fuente de carbono.
8. Se recomienda investigar la formación de micro y nano fragmentos de polímeros que se puedan generar en el proceso de compostaje con el fin de monitorear cuidadosamente su destino y efectos sobre el medio ambiente y considerar su regulación a nivel nacional.
9. Es fundamental realizar análisis de compostaje de polímeros biodegradables de diferentes productos del mismo material, de venta a nivel nacional, para generar información de las condiciones de compostaje idóneas para cada uno.

10. Se recomienda el diseño de un ensayo que verifique la calidad de la semilla y que se controlen las variables que influyen en el desarrollo de los cultivos, como la temperatura, humedad relativa, horas de luz e intensidad a las que se expone el cultivo y el riego, con la finalidad de brindar las condiciones ideales para el desarrollo del o los cultivos en estudio, permitiendo determinar el efecto del compost en el desarrollo de las plantas.
11. Para el análisis de fitotoxicidad se recomienda realizar un análisis del suelo de las posibles combinaciones de mezcla, de compost procedente de la degradación de polímeros con tierra comercial, para asegurar valores de conductividad eléctrica óptimos para el desarrollo de los cultivos.
12. Si bien la norma UNE-EN 13432:2001/AC:2005 recomienda colocar una capa fina en la superficie de cada mezcla de un material inerte, como la perlita, se sugiere combinar la perlita con la mezcla para favorecer la permeabilidad del agua en el suelo. Lo anterior, permitiría propiciar un aumento en la capacidad de aireación y retención de agua, favoreciendo el desarrollo de las plantas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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, no. 3, pp. 255–277, 2007, doi: 10.1002/mabi.200600168.
- [2] M. Antonieta Riera y R. R. Palma, “Obtención de bioplásticos a partir de desechos agrícolas. Una revisión de las potencialidades en Ecuador,” *Av. en Química*, vol. 13, no. 3, pp. 69–78, Nov. 2018.
- [3] R. A. Sarria Villa y J. A. Gallo Corredor, “La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos,” *J. Cienc. e Ing.*, pp. 21–27, Aug. 2016.
- [4] United States Environmental Protection Agency (US EPA), “Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Tables and Figures ,” 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-11/documents/2018_tables_and_figures.pdf. [Accedido: 15-nov-2020].
- [5] D. Riquelme Moya, “Efectos de los plásticos convencionales y biodegradables en la estimulación de la respiración de suelos y sedimentos,” 2020. [En línea]. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/107580/1/EFFECTOS_DE_LOS_PLASTICOS_CONVENCIONALES_Y_BIODEGRADABLES_Riquelme_Moya_David.pdf. [Accedido: 15-nov-2020].
- [6] T. Mekonnen, P. Mussone, H. Khalil, y D. Bressler, “Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 1, no. 43, pp. 13379–13398, Nov. 2013, doi: 10.1039/c3ta12555f.
- [7] E. C. Brevik *et al.*, “The interdisciplinary nature of SOIL,” *Soil*, vol. 1, pp. 117–129, 2015, doi: 10.5194/soil-1-117-2015.
- [8] S. Soto Córdoba, “Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica,” *Inf. Estado la Nación en Desarro. Hum. Sosten.*, p. 32, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/7818>.

- [9] J. Herrera-Murillo, J. F. Rojas-Marín, y D. Anchía-Leitón, “Tasas De Generación Y Caracterización De Residuos Sólidos Ordinarios En Cuatro Municipios Del Área Metropolitana Costa Rica,” *Rev. Geográfica América Cent.*, vol. 2, no. 57, p. 235, 2016, doi: 10.15359/rgac.57-2.9.
- [10] C. Carolla, R. Sánchez, y v Montiel, “Modelo de superficie de respuesta que permite inferir concentración de nitrógeno en ‘compost’ producido a partir de desechos orgánicos,” *Rev. Ing. e Investig.*, vol. 29, no. 3, pp. 128–133, 2009.
- [11] A. Steinvorth Álvarez, “Residuos de alimentos: ¿problema u oportunidad?,” *CEGESTI*, vol. 2, Nov. 2014.
- [12] P. A. Melgarejo Mendivelso, “Evaluación de la remoción foto-catalítica de metano (CH₄) sobre películas de dióxido de titanio modificada con nanopartículas de planta bajo luz visible ,” Fundación Universidad de América, Bogotá, 2020.
- [13] MINSA, “Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021,” San José, 2016.
- [14] D. Hernández Villegas, “Propuesta socio-ambiental para el compostaje de los residuos sólidos orgánicos en la comunidad de Tortuguero,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2010.
- [15] J. Ansorena, E. Batalla, y D. Merino, “Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos,” *Laboratorio Agroambiental Fraisoro. Fraisoro Etxaldea*, 2015.
- [16] Ministerio de Salud, Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), “Estrategia nacional para sustituir el consumo de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables 2017-2021,” 2017.
- [17] N. Lucas, C. Bienaime, C. Belloy, M. Queneudec, F. Silvestre, y J.-E. Nava-Saucedo, “Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques,” *Quimiosfera*, vol. 73, no. 4, pp. 429–442, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.064.

- [18] D. Adamcová, J. Zloch, M. Brtnický, y M. D. Vaverková, “Biodegradation/Disintegration of Selected Range of Polymers: Impact on the Compost Quality,” *J. Polym. Environ.*, vol. 27, no. 4, pp. 892–899, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10924-019-01393-3.
- [19] U. Environmental Protection Agency, “Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet ,” 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-11/documents/2018_ff_fact_sheet.pdf. [Accedido: 16-nov-2020].
- [20] ONU, “Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles,” *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> [Accedido: 18-ene-2021].
- [21] ONU, “Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos,” *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> [Accedido: 18-ene-2021].
- [22] C. M. Rodríguez Echandi, “Informe de Labores mayo 2018 – agosto 2020 ,” *MINAE* , 2020.
- [23] Consejo Nacional Ambiental de Costa Rica, “I Plan Nacional de Compostaje 2020-2050,” 2020.
- [24] PROCOMER, “Industria plástica en Costa Rica: Alternativas amigables con el ambiente y de transformación productiva,” 2019.
- [25] J. Da Luz Castro, “Análisis de los requerimientos y características de materiales poliméricos de empaque en el sector de la industria de alimentos en Costa Rica,” Universidad de Costa Rica, San José, 2015.
- [26] M. Rivas y R. Silva, “Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*),” *Cienc. UNEMI*, vol. 13, no. 32, pp. 87–100, 2020.

- [27] 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, May 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125770.
- [28] S. Lv, Y. Zhang, J. Gu, y H. Tan, “Physicochemical evolutions of starch/poly (lactic acid) composite biodegraded in real soil,” *J. Environ. Manage.*, vol. 228, no. February, pp. 223–231, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.09.033.
- [29] W. Phetwarotai, P. Potiyaraj, y D. Aht-Ong, “Biodegradation of Polylactide and Gelatinized Starch Blend Films Under Controlled Soil Burial Conditions,” *J. Polym. Environ.*, vol. 21, no. 1, pp. 95–107, 2013, doi: 10.1007/s10924-012-0530-6.
- [30] P. A. Palsikowski, C. N. Kuchnier, I. F. Pinheiro, y A. R. Morales, “Biodegradation in Soil of PLA/PBAT Blends Compatibilized with Chain Extender,” *J. Polym. Environ.*, vol. 26, no. 1, pp. 330–341, 2018, doi: 10.1007/s10924-017-0951-3.
- [31] G. Solano, D. Rojas-Gätjens, K. Rojas-Jimenez, M. Chavarría, y R. M. Romero, “Biodegradation of plastics at home composting conditions,” *Environ. Challenges*, vol. 7, no. February, p. 100500, 2022, doi: 10.1016/j.envc.2022.100500.
- [32] Laboratorio de Diseño e Innovación para Cundinamarca and Artesanías de Colombia S.A, *Proyecto: Fomento a la actividad productiva artesanal del departamento de Cundinamarca*. Departamento de Cundinamarca, 2014.
- [33] R. Tijeras Martínez, “Cuantificación de bioplásticos en cianobacterias cultivadas en un sistema de depuración de agua residual,” La Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2017.
- [34] M. Karamanlioglu, R. Preziosi, y G. D. Robson, “Degradación ambiental abiótica y biótica del polímero bioplástico poli (ácido láctico): una revisión,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 137, pp. 122–130, 2017, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009.
- [35] A. De Campos, J. C. Marconato, y S. M. Martins-Franchetti, “Biodegradación de películas de mezcla PVA / PVC, PVA / PCL en suelo y suelo con lixiviado de vertedero,” *Brazilian*

- Arch. Biol. Technol.*, vol. 54, no. 6, pp. 1367–1378, 2011, doi: 10.1590/S1516-89132011000600024.
- [36] M. Niaounakis, *Biopolymers: reuse, recycling and disposal*, vol. 1. Oxford: Elsevier Inc, 2013.
- [37] S. L. Gómez Ayala y F. L. Yory Sanabria, “Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales,” *Ing. USBMed*, vol. 9, no. 1, pp. 69–74, 2018, doi: 10.21500/20275846.3008.
- [38] P. Brdlík, M. Borůvka, L. Běhálek, y P. Lenfeld, “Biodegradation of poly(Lactic acid) biocomposites under controlled composting conditions and freshwater biotope,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/polym13040594.
- [39] S. Muniyasamy, O. Ofosu, M. J. John, y R. D. Anandjiwala, “Mineralization of poly(lactic acid) (PLA), Poly(3-hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) and PLA/PHBV blend in compost and soil environments,” *J. Renew. Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 133–145, 2016, doi: 10.7569/JRM.2016.634104.
- [40] 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, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116231.
- [41] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, y D. Bürger, “Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 124, pp. 88–100, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013.
- [42] T. M. Piqué y A. Vázquez, “Uso de espectroscopía infraroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento,” *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 3, no. 2, pp. 62–71, 2012.
- [43] M. Hernández-López *et al.*, “Bio-based composite fibers from pine essential oil and PLA/PBAT polymer blend. Morphological, physicochemical, thermal and mechanical

- characterization,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 234, no. October 2018, pp. 345–353, 2019, doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.01.034.
- [44] S. P. Kumar Vangala, A. Chaudhary, P. Tiwari, y V. Katiyar, “Thermal Degradation Kinetics of Biopolymers and their Composites: Estimation of Appropriate Kinetic Parameter,” *J. Energy Environ. Sustain.*, vol. 3, no. September 2020, pp. 10–19, 2017, doi: 10.47469/jees.2017.v03.100025.
- [45] E. Rodríguez y E. Villegas, “Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico,” *Métodos y Mater.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–32, 2012, doi: 10.15517/mym.v2i1.13470.
- [46] 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.
- [47] J. W. Huancahuire Villanueva, “Evaluación de la degradación de mezclas de bioplásticos en compostaje a alta temperatura,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2016.
- [48] OECD, “OECD Test Guideline 208: Terrestrial Plant Test - Seedling Emergence and Seedling Growth Test,” *Guidel. Test. Chem. Terr. Plant Test Seedl. Emerg. Seedl. Growth Test*, vol. 227, pp. 1–21, 2006.
- [49] J. Schuster, “Focus on Plant Problems ,” *University of Illinois Extension*. [En línea]. Disponible en: <https://web.extension.illinois.edu/focus/index.cfm?problem=chlorosis>. [Accedido: 2-dic-2022].
- [50] J. M. Pezo Rios, “Rendimiento y calidad de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Great Lakes 659, al aplicar fertilizante orgánico y químico en el distrito de Lamas,” Universidad Nacional de San Martín Tarapoto-Perú, 2020.
- [51] MAPAMA, *Guía de gestión integrada de plagas Hortícolas de hoja: Espinaca, lechuga, acelga, escarola y borraja*. Madrid, 2017.

- [52] MAPAMA, *Guía de gestión integrada de plagas Liliáceas: Ajo, cebolla y puerro*. Madrid, 2017.
- [53] Organización Internacional de Normalización, “Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un laboratorio. (UNE-EN ISO 20200:2015).” 2015.
- [54] A. E. de Normalización, “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. (UNE-EN 13432:2001/AC:2005).” 2005.
- [55] B. Rodríguez Castro y F. Torres Moreno, “Evaluación de *Penicillium* sp como degradador de celulosa en el proceso de compostaje de residuos orgánicos de origen vegetal en la localidad 20 de Bogotá,” *Rev. la Fac. Agron.*, no. June, p. 10, 2018.
- [56] C. Graham, A. Adhikari, F. Malekian, K. Fontenot, M. L. Lewis Ivey, y W. B. Richardson, “Compostaje en la granja: las mejores prácticas para garantizar la inocuidad de los alimentos en granja,” *LSU AgCente*, [En línea]. Disponible en: www.LSUAgCenter.com. [Accedido: 26-oct-2022].
- [57] P. Nason, Y. Jia, C. Maurice, L. Alakangas, y B. Öhlander, “Biodegradation of Biosolids Under Aerobic Conditions: Implications for Cover Materials for Sulfide Mine Tailings Remediation,” *Mine Water Environ.*, vol. 35, no. 3, pp. 273–282, 2016, doi: 10.1007/s10230-015-0339-3.
- [58] L. M. Santillán Quiroga y L. P. Pacheco Paredes, “Remoción de ácido sulfhídrico por microorganismos sobre lodos activados en aguas residuales de la industria alimenticia,” *La Granja*, vol. 27, no. 1, pp. 112–123, 2018.
- [59] T. L. Alvarado Dávila y S. A. Rangel Zambrano, “Revisión de estrategias sostenibles para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las organizaciones,” vol. 7, no. 2, pp. 76–94, 2020.
- [60] A. W. G. Van der Wurff, J. G. Fuchs, M. Raviv, y A. J. Termorshuizen, Eds., *Handbook*

for Composting and Compost Use in Organic Horticulture. BioGreenhouse COST Action FA 1105, 2016.

- [61] H. Insam y M. de Bertoldi, “Microbiology of the composting process,” in *Compost Science and Technology*, 8th ed., L. F. Diaz, M. de Bertoldi, W. Bidlingmaier, y E. Stentiford, Eds. Elsevier, 2007, pp. 25–48.
- [62] P. Román, M. M. Martínez, y A. Pantoja, “Manual de compostaje del agricultor, experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Oficina Regional para América Latina y el Caribe,” Chile, 2013.
- [63] L. Chen, W. Li, Y. Zhao, Y. Zhou, S. Zhang, y L. Meng, “Effects of compound bacterial agent on gaseous emissions and compost maturity during sewage sludge composting,” *J. Clean. Prod.*, vol. 366, no. June, p. 133015, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133015.
- [64] A. I. Khalil, M. S. Hassouna, H. M. A. El-Ashqar, y M. Fawzi, “Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge,” *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 27, no. 10, pp. 2359–2369, Oct. 2011, doi: 10.1007/S11274-011-0704-8.
- [65] F. Ruggero *et al.*, “Degradation of Film y Rigid Bioplastics During the Thermophilic Phase and the Maturation Phase of Simulated Composting,” *J. Polym. Environ.*, vol. 29, no. 9, pp. 3015–3028, 2021, doi: 10.1007/s10924-021-02098-2.
- [66] A. Araújo, M. Oliveira, R. Oliveira, G. Botelho, y A. V. Machado, “Biodegradation assessment of PLA and its nanocomposites,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, no. 16, pp. 9477–9486, 2014, doi: 10.1007/s11356-013-2256-y.
- [67] L. Bo, T. Guan, G. Wu, F. Ye, y Y. Weng, “Biodegradation Behavior of Degradable Mulch with Poly (Butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT) and Poly (Butylene Succinate) (PBS) in Simulation Marine Environment,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/polym14081515.
- [68] 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, no. 9, 2022, doi: 10.3390/polym14091894.
- [69] L. M. Galera Manzano, M. Á. Ruz Cruz, N. M. Moo Tun, A. Valadez González, y J. H. Mina Hernandez, “Effect of cellulose and cellulose nanocrystal contents on the biodegradation, under composting conditions, of hierarchical pla biocomposites,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 11, 2021, doi: 10.3390/polym13111855.
- [70] R. Revati *et al.*, “Mechanical, thermal and morphological characterisation of 3D porous Pennisetum purpureum/PLA biocomposites scaffold,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 75, pp. 752–759, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.MSEC.2017.02.127.
- [71] W. Yang, E. Fortunati, F. Dominici, J. M. Kenny, y D. Puglia, “Effect of processing conditions and lignin content on thermal, mechanical and degradative behavior of lignin nanoparticles/poly(lactic acid) bionanocomposites prepared by melt extrusion and solvent casting,” *Eur. Polym. J.*, vol. 71, pp. 126–139, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.07.051.
- [72] M. Agarwal, K. W. Koelling, y J. J. Chalmers, “Characterization of the degradation of poly(lactic acid) polymer in a solid substrate environment,” *Biotechnol. Prog.*, vol. 14, no. 3, pp. 517–526, 1998, doi: 10.1021/bp980015p.
- [73] R. Scaffaro, A. Maio, F. Suter, E. ortunato Gulino, y M. Morreale, “Degradation and recycling of films based on biodegradable polymers: A short review,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 4, 2019, doi: 10.3390/polym11040651.
- [74] 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, 2019, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.04.004.
- [75] E. Petinakis *et al.*, “Biodegradation and thermal decomposition of poly(lactic acid)-based materials reinforced by hydrophilic fillers,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 95, no. 9, pp.

- 1704–1707, 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.027.
- [76] M. Arnoult, E. Dargent, y J. F. Mano, “Mobile amorphous phase fragility in semi-crystalline polymers: Comparison of PET and PLLA,” *Polymer (Guildf)*., vol. 48, no. 4, pp. 1012–1019, 2007, doi: 10.1016/j.polymer.2006.12.053.
- [77] O. Campaña, Guerrero, y V. Hugo, “Caracterización Mecánica y Térmica de Ácido Poliláctico (PLA) Reforzado con Polvo de Bambú (PB),” *Rev. Politécnica*, vol. 42, no. 1, p. 8, 2018, [En línea]. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v42n1/2477-8990-rpolit-42-01-00017.pdf>.
- [78] P. Pagès, F. Carrasco, J. Gámez-Pérez, O. O. Santana, y M. L. MasPOCH, “Processing of poly (lactic acid) (PLA) and PLA/montmorillonite nanocomposites in a pilot plant: A study of structural changes and thermal stability,” *Afinidad*, vol. 67, no. 546, pp. 107–113, 2010.
- [79] Fabio Zuluaga, “Algunas Aplicaciones del Ácido Poli-L-Láctico,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, vol. 37, N° 142, no. 0370-3908., pp. 125–142, 2013.
- [80] W. Zhou *et al.*, “Synthesis, physical properties and enzymatic degradation of bio-based poly(butylene adipate-co-butylene furandicarboxylate) copolyesters,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 98, no. 11, pp. 2177–2183, 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.08.025.
- [81] J. A. Medina Perilla y R. A. Mendoza Quiroga, “Propiedades adhesivas de mezclas de almidón de yuca termoplastificado y ácido poliláctico (TPS/PLA),” *Inge-Cuc*, vol. 7, no. 1, pp. 217–228, 2011.
- [82] S. Su, M. Duhme, y R. Kopitzky, “Uncompatibilized pbat/pla blends: Manufacturability, miscibility and properties,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 21, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/ma13214897.
- [83] I. R. Estrada-Herrera, C. Hidalgo-Moreno, R. Guzmán-Plazola, J. J. Almaraz Suárez, H. Navarro-Garza, y J. D. Etchevers-Barra, “Soil quality indicators to evaluate soil fertility,” *Agrociencia*, vol. 51, no. 8, pp. 813–831, 2017.

- [84] BOE, “Real Decreto 506/2013,” *Boletín Of. del Estado*, vol. 164, no. Sec. I, pp. 51119–51207, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>.
- [85] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh2880 Norma Chilena Oficial. Compost-Clasificación y requisito.” Santiago, Chile, 2005.
- [86] S. López Fernández, R. Serrato Cuevas, O. A. Castelán Ortega, y F. Avilés Nova, “Comparación entre dos métodos de ventilación en la composición química de compost de estiércoles pecuarios,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 34, no. 2, pp. 263–271, 2018, doi: 10.20937/RICA.2018.34.02.07.
- [87] E. L. Bravo, A. Javier, A. Rivera, M. H. Suárez, O. Gonzalez Cueto¹, y A. García De La Figal Costales³, “Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña,” *Rev. Cent. Agrícola*, vol. 44, no. 3, pp. 49–55, 2017, [En línea]. Disponible en: <http://cagricola.uclv.edu.cu>.
- [88] Sm. Soliva y M. López, “Calidad del compost : Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso,” *CENEAM/MIMAM*, pp. 1–20, 2004.
- [89] R. Tighe-Neira, G. Leonelli-Cantergiani, R. Montalba-Navarro, C. Cavieres-Acuña, y D. Morales-Ulloa, “Caracterización de compost a base de espinillo en relación a la Norma Chilena N°2880.,” *Agron. Mesoam.*, vol. 25, no. 2, pp. 347–355, 2014, doi: 10.15517/am.v25i2.15442.
- [90] M. Huamán Carranza, “Concentración de nitrógeno, fosforo, potasio y calcio en el compost producido a partir de residuos sólidos orgánicos de mercados populares y residencias de Huaraz-Ancash,” *Aporte Santiaguino*, 2019, doi: 10.32911/as.2019.v12.n2.647.
- [91] M. R. Bailón-Rojas y N. Florida-Rofner, “Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa-Huánuco,” *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.644.
- [92] D. M. Sullivan, A. I. Bary, R. O. Miller, y L. J. Brewer, “Interpreting Compost Analyses,” *OREGON STATE Univ. Ext. Serv. Interpret.*, vol. 14, no. 1, pp. 18–22, 2018, [En línea].

Disponible

en:

<https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em9217.pdf>.

- [93] M. MIERZWA-HERSZTEK *et al.*, “Soil micromorphological and physical properties after application of composts with polyethylene and biocomponent-derived polymers added during composting,” *Pedosphere*, vol. 31, no. 4, pp. 560–571, 2021, doi: 10.1016/S1002-0160(20)60046-7.
- [94] J. G. Vásquez Camacho, “Evaluación agronomica 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.,” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2015.
- [95] O. J. Rosa Villareal, “Cultivo de lechuga (*Lactuca saliva* L) bajo condiciones del valle del Rimac, Lima,” Universidad Agraria la Molina, 2015.
- [96] A. E. D. Goites, *Manual de Cultivos para la Huerta Orgánica Familiar. Buenos Aires: Inst. Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA*, Lit. II. 6. Buenos Aires: Huerta Orgánica. I., 2008.
- [97] G. Araya Umaña, *Manual de Recomendaciones para el cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.)*. San José, C.R. : MAG/INTA, 2012.
- [98] L. E. Cadengo López, “Capacidad de infiltración del suelo en función de la vegetación,” Universidad Autonoma de Aguascalientes, 2021.
- [99] C. M. Ighes, F. D. Carrasco, F. D. Balbi, y L. Silva, “Ensayo de 2 sustratos en plantines de lechuga en sistema de bandejas apoyadas. Municipio Valle Viejo, Catamarca.,” Argentina, 2020.
- [100] G. Saavedra, F. Corradini, A. Antúnez, S. Felmer, P. Estay, y P. Sepúlveda, “Manual de producción de Lechuga,” *Man. Prod. Lechuga Inst. Desarro. Agropecu. - Inst. Investig. Agropecu. Bol.*, 2017.

9. ANEXOS

Anexo 1. Temperatura máxima y mínima promedio por semana dentro de la incubadora (INCUCCELL, 404 – ECO) durante del proceso de compostaje.

Semana	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
S1	60,71 ± 0,74	60,26 ± 1,18
S2	58,53 ± 0,88	58,13 ± 0,98
S3	57,51 ± 0,98	57,26 ± 0,96
S4	57,75 ± 0,97	57,30 ± 0,86
S5	56,50 ± 0,53	56,20 ± 0,52
S6	57,39 ± 0,98	56,85 ± 2,85
S7	56,20 ± 1,80	55,74 ± 1,90
S8	57,82 ± 0,95	57,40 ± 1,34
S9	57,96 ± 0,99	57,57 ± 0,88
S10	57,55 ± 0,93	57,00 ± 1,5
S11	58,78 ± 1,53	58,27 ± 1,31
S12	58,45 ± 0,94	58,00 ± 1,27

Anexo 2. Temperatura de los reactores de compostaje de los reactores de compostaje de cada tratamiento durante 12 semanas del proceso de compostaje.

Semana	Fecha de registro	Día del proceso	Temperatura (°C)		
			PLA	PBAT	Control
1	01/02/2022	1	55	56	56
	02/02/2022	2	55	55	58
	03/02/2022	3	58	59	57
	04/02/2022	4	59	58	57
2	07/02/2022	7	57	54	52
	08/02/2022	8	55	55	52
	09/02/2022	9	56	55	53
	10/02/2022	10	58	54	52
	11/02/2022	11	56	55	53
3	14/02/2022	14	56	54	53
	16/02/2022	16	56	57	54
	18/02/2022	18	55	54	51
4	21/02/2022	21	55	54	51
	23/02/2022	23	56	54	51
	25/02/2022	25	55	54	50
5	28/02/2022	28	55	54	52
	02/03/2022	30	55	55	51
	04/03/2022	32	56	54	51
6	07/03/2022	35	55	53	50
	10/03/2022	38	55	53	51
7	14/03/2022	42	55	52	51
	17/03/2022	45	55	54	49
8	21/03/2022	49	56	55	52
	24/03/2022	52	55	56	51
9	28/03/2022	56	55	56	51
	31/03/2022	59	53	55	51
10	04/04/2022	63	54	55	50
	07/04/2022	66	53	55	50
11	13/04/2022	72	53	53	51
12	18/04/2022	77	54	55	52
	21/04/2022	80	54	56	51
	25/04/2022	84	54	55	51

ANEXO 3. Temperatura (T) y humedad relativa (HR) promedio semanal, según el horario del día (madrugada, mañana, tarde y noche). Registradas del 24 de mayo al 28 de junio de 2020, dentro del invernadero, ubicado en el LANOTEC, durante el ensayo de fitotoxicidad.

Semana	T (°C)	T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	HR (%)	HR máx (%)	HR mín (%)
(24 al 31 de mayo)						
Madrugada	18,58±0,65	19,43	16,90	99,37±0,75	99,98	97,91
Mañana	27,49±6,10	36,98	19,00	71,83±19,59	99,98	44,33
Tarde	28,50±5,10	36,59	20,55	66,74±18,20	96,18	41,79
Noche	20,39±1,25	23,46	18,70	94,85±5,24	99,95	80,05
(1 al 7 de junio)						
Madrugada	19,31±0,97	20,85	17,72	98,93±1,50	99,98	95,37
Mañana	26,25±5,33	34,79	19,43	75,59±18,82	99,98	44,36
Tarde	27,01±3,90	34,53	20,33	75,11±12,42	95,88	47,20
Noche	20,21±0,65	21,36	19,05	97,51±1,86	99,61	93,80
(8 al 15 de junio)						
Madrugada	18,56±1,00	20,37	17,07	99,31±1,27	99,98	95,13
Mañana	25,68±4,80	35,52	18,49	77,24±16,42	99,98	48,13
Tarde	27,20±5,42	36,55	20,50	72,78±18,67	99,03	44,14
Noche	19,41±0,52	20,93	18,53	98,39±1,94	99,98	91,40
(16 al 22 de junio)	22,16±5,09	35,05	17,11	89,89±16,26	99,98	47,56
Madrugada	18,32±0,62	19,17	17,11	99,98±1,28	99,98	99,98
Mañana	25,09±5,57	34,15	17,80	86,11±19,60	99,98	49,96
Tarde	26,06±5,10	35,05	19,60	76,08±17,33	98,42	47,56
Noche	18,99±0,33	19,43	18,49	99,04±1,50	99,98	95,13
(23 al 28 de junio)						
Madrugada	18,70±0,84	20,20	17,33	99,02±1,26	99,98	96,28
Mañana	26,43±5,68	36,68	18,23	74,77±20,34	99,98	43,13
Tarde	27,73±5,07	36,33	20,33	67,93±19,19	96,69	42,77
Noche	19,94±0,72	21,19	18,70	96,70±3,91	99,98	85,05

Anexo 4. Porcentaje de la prueba de germinación de las semillas empleadas en el análisis de fitotoxicidad, lechuga (*Lactuca sativa* L.) y cebolla (*Allium cepa* L.).

Planta	Repetición	Número de semillas	*Número de semillas germinadas	% germinación	% germinación
Lechuga	1	36	32	88,89	89,58±2,66
	2	36	33	91,67	
	3	36	31	86,11	
	4	36	33	91,67	
Cebolla	1	36	31	86,11	80,56±5,07
	2	36	28	77,78	
	3	36	27	75,00	
	4	36	30	83,33	

* Después de 10 días.

ANEXO 5. Cantidad de plantas máximas germinadas de lechuga, y cantidad de plantas al final del ensayo, su longitud de la raíz, del tallo y hojas, y biomasa húmeda total. Correspondiente a la repetición de cada proporción de mezcla entre el compost procedente de la biodegradación de polímeros (PLA, PBAT y Control) y la tierra comercial (TC).

Combinación de mezcla (% m/m)	Número de plantas máximas germinadas (%)	Número de plantas al final de ensayo	Longitud de la raíz (cm)	Longitud del tallo y las hojas (cm)	Biomasa húmeda (g)
100% TC					
Rep 1	75	74	2,5±1,1	4,3±0,8	3,9092
Rep 2	83	80	4,0±1,2	4,2±0,8	4,5197
PLA:TC					
25/75					
Rep 1	50	47	2,5±0,9	4,6±1,4	3,9264
Rep 2	56	56	3,3±1,1	4,2±1,2	3,4868
50/50					
Rep 1	33	31	2,5±0,8	5,6±1,5	1,9690
Rep 2	49	47	2,0±0,7	4,6±1,7	2,8893
PBAT: TC					
25/75					
Rep 1	85	85	3,1±0,8	6,3±1,9	5,8272
Rep 2	51	46	2,5±1,1	4,5±1,3	2,5302
50/50					
Rep 1	74	70	2,6±1,1	5,5±2,0	5,4302
Rep 2	50	32	2,3±1,0	5,0±1,4	2,3560
Control:TC					
25/75					
Rep 1	83	81	3,2±1,1	4,4±1,1	4,0661
Rep 2	85	82	5,0±1,2	3,4±1,3	4,1788
50/50					
Rep 1	77	76	3,0±1,5	6,2±2,1	4,6966
Rep 2	70	60	4,4±1,5	3,4±1,3	3,1251

ANEXO 6. Cantidad de plantas máximas germinadas de cebolla, y cantidad de plantas al final del ensayo, su longitud de la raíz y del tallo y hojas, y biomasa húmeda total. Correspondiente a la repetición de cada proporción de mezcla entre el compost procedente de la biodegradación de polímeros (PLA, PBAT y Control) y la tierra comercial (TC).

Combinación de mezcla (% m/m)	Número de plantas máximas germinadas (%)	Número de plantas al final de ensayo	Longitud de la raíz (cm)	Longitud del tallo y las hojas (cm)	Biomasa húmeda (g)
100% TC					
Rep 1	51	42	2,5±1,2	10,5±2,9	1,9993
Rep 2	52	50	3,0±1,4	11,5±2,5	2,9013
PLA:TC					
25/75					
Rep 1	63	53	2,6±1,2	8,5±3,7	1,9199
Rep 2	70	54	1,7±1,1	6,7±2,5	1,3946
50/50					
Rep 1	65	47	1,6±0,5	4,4±2,1	0,8776
Rep 2	56	32	1,2±0,5	5,8±1,8	0,4877
PBAT: TC					
25/75					
Rep 1	82	74	1,9±0,8	6,6±2,4	1,8578
Rep 2	68	53	2,0±1,0	8,6±2,2	1,2633
50/50					
Rep 1	79	51	1,6±0,7	7,1±3,6	1,0547
Rep 2	68	41	1,7±0,8	7,3±2,0	0,7307
Control:TC					
25/75					
Rep 1	68	54	2,1±1,1	8,6±2,4	1,6133
Rep 2	71	62	2,3±1,3	8,9±2,9	1,8734
50/50					
Rep 1	65	51	1,7±0,6	6,3±2,5	1,0551
Rep 2	70	63	1,9±0,7	7,5±3,2	1,8539