

**PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ESTADO DEL
ARTE SOBRE ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR EL COMPOSTAJE DE RESIDUOS
VERDES**

MARCELA REYES TORRES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA, SANTANDER
2017**

**PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ESTADO DEL
ARTE SOBRE ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR EL COMPOSTAJE DE RESIDUOS
VERDES**

MARCELA REYES TORRES

**Proyecto de grado en Modalidad Pasantía de Investigación para el optar el
título de Ingeniera Civil**

DIRECTOR

EDGAR RICARDO OVIEDO OCAÑA
Ingeniero Sanitario, MSc., PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA, SANTANDER

2017

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. METODOLOGÍA.....	15
1.1. Búsqueda bibliográfica.....	15
1.2. Filtrado de documentos y criterios de selección	15
1.3. Organización y estructura de los datos.....	17
1.4. Revisión y análisis de documentos.....	17
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
2.1. Revisión sistemática de literatura	18
2.1.1. Resultados de filtrado y selección	18
2.1.2. Evolución y estado actual de la información	20
2.2. Caracterización de los residuos verdes	23
2.2.1. Composición física de los residuos verdes	23
2.2.2. Propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes	24
2.3. Parámetros en el proceso de compostaje de residuos verdes	30
2.3.1. Variación de temperatura	30
2.3.2. Contenido de humedad	31
2.3.3. Suministro de oxígeno.....	32

2.3.4. Relación C/N.....	33
2.3.5. pH.....	34
2.3.6. Tiempo	36
2.4. Métodos de optimización del proceso de compostaje de residuos verdes	38
2.4.1. Aplicación de pre-tratamientos.....	38
2.4.2. Modificaciones en el sustrato	40
2.4.3. Modificaciones operativas	46
3. CONCLUSIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	60
ANEXOS.....	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencia de reporte de cada tipo de sustrato encontrado en la revisión	24
Tabla 2. Residuos verdes con diferente sustrato predominante en Vandecasteele et al.	25
Tabla 3. Resultados estadísticos de la revisión de propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes.	27
Tabla 4. Rangos de valores de cada propiedad encontrados en la revisión	29
Tabla 5. Ejemplos de contenido de humedad elegido para diferentes estudios de co-compostaje de residuos verdes con diferentes materiales	32
Tabla 6. Ejemplos de valores de pH en estudios de compostaje	35
Tabla 7. Duración del proceso en los tratamientos de diferentes estudios de compostaje de residuos verdes	37
Tabla 8. Ejemplos de trituración de residuos verdes previo al proceso de compostaje	39
Tabla 9. Ejemplos de aditivos utilizados en los estudios de compostaje de residuos verdes revisados	41
Tabla 10. Ejemplos de AI utilizados en estudios de compostaje de residuos verdes	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de filtrado.....	19
Figura 2. Esquema del proceso de revisión	20
Figura 3. Distribución de artículos encontrados (n=366) según año de publicación	21
Figura 4. Distribución de artículos seleccionados (n=38) por (a) país de estudio, (b) continente.....	22

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Tabla resumen de los estudios seleccionados	62
ANEXO 2. Composición física de los residuos verdes de cada estudio.	64
ANEXO 3. Rangos de valores de propiedades físicas	67
ANEXO 4. Rangos de valores de propiedades químicas	68
ANEXO 5. Rango de valores de macronutrientes.....	69
ANEXO 6. Rango de valores de concentración de celulosa, hemicelulosa y lignina	70
ANEXO 7. Rangos de valores de concentración de metales pesados	71
ANEXO 8. Parámetros iniciales de cada estudio.....	72
ANEXO 9. Resumen de los materiales de adición e inóculos reportados	77
ANEXO 10. Ficha resumen 1.....	82
ANEXO 11. Ficha resumen 2	83
ANEXO 12. Ficha resumen 3.....	84
ANEXO 13. Ficha resumen 4.....	85
ANEXO 14. Ficha resumen 5.....	86
ANEXO 15. Ficha resumen 6.....	87
ANEXO 16. Ficha resumen 7.....	88
ANEXO 17. Ficha resumen 8.....	89
ANEXO 18. Ficha resumen 9.....	90
ANEXO 19. Ficha resumen 10.....	91
ANEXO 20. Ficha resumen 11.....	92
ANEXO 21. Ficha resumen 12.....	93
ANEXO 22. Ficha resumen 13.....	94
ANEXO 23. Ficha resumen 14.....	95
ANEXO 24. Ficha resumen 15.....	96
ANEXO 25. Ficha resumen 16.....	97
ANEXO 26. Ficha resumen 17.....	98
ANEXO 27. Ficha resumen 18.....	99
ANEXO 28. Ficha resumen 19.....	100
ANEXO 29. Ficha resumen 20.....	101
ANEXO 30. Ficha resumen 21.....	102
ANEXO 31. Ficha resumen 22.....	103

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera principal a mi familia por brindarme siempre su apoyo incondicional, a mi director de proyecto Edgar Ricardo Oviedo y demás miembros del Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental, por su paciencia y dedicación durante el desarrollo del proyecto; y además, a cada una de las personas que permitieron que se llevara a cabo el proceso de investigación.

RESUMEN

TÍTULO:

PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE ESTRATEGIAS PARA OPTIMIZAR EL COMPOSTAJE DE RESIDUOS VERDES*

AUTOR:

MARCELA REYES TORRES**

PALABRAS CLAVE: Residuos verdes, Compostaje, Composición física, Propiedades físico-químicas, Estrategias de compostaje, Tiempo de compostaje, Calidad del producto final.

DESCRIPCIÓN:

El presente artículo analiza las características de la materia prima y las diferentes metodologías empleadas en el proceso de compostaje de residuos verdes, a través de una revisión sistemática de artículos científicos que se sometieron a un proceso de búsqueda, selección y análisis que dio como resultado un total de 38 artículos relevantes. Se encontró que los residuos verdes (GW), debido a su alto contenido lignocelulósico, requieren naturalmente mayores tiempos de compostaje, y que debido a la variabilidad en su composición es un material difícil de caracterizar, por lo que el seguimiento de la influencia de sus propiedades en el proceso sigue siendo un desafío. En cuanto a estrategias de optimización, autores provenientes principalmente de países de Asia y Europa están desarrollando estudios de compostaje de GW implementando métodos de optimización como la adición de materiales complementarios, la adición de inóculos microbianos como hongos de podredumbre blanca (e.g. *Phanerochaete chrysosporium*, *trametes versicolor*, *fomes fomentarius*) que aceleran la degradación de la lignocelulosa, la división del proceso de compostaje en dos etapas con el fin de alcanzar temperaturas termofílicas en dos momentos y la aplicación de pre-tratamientos físicos como la trituración del GW que permite unificar el tamaño de las partículas en la mezcla. Asimismo, se encontró que los estudios de compostaje que empleaban estratégicamente más de dos de las metodologías reportadas podían producir un compost maduro apto para el crecimiento de plantas reduciendo el tiempo de proceso a 3 – 4 semanas.

*Trabajo de Grado. Modalidad Pasantía de Investigación.

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: OVIEDO Ocaña, Edgar Ricardo. Ingeniero Sanitario, Msc., PhD.

ABSTRACT

TÍTULO:

RESEARCH INTERNSHIP ABOUT A STATE OF ART OF OPTIMIZATION STRATEGIES IN THE GREEN WASTE COMPOSTING PROCESS*

AUTHOR:

MARCELA REYES TORRES**

KEYWORDS: Green waste, Composting, Physical composition, Physic-chemical properties, Composting strategies, Composting time, End-product quality.

DESCRIPCIÓN:

The following article analyses the main characteristics of the green waste feedstock and the several composting strategies reported. Thirty-eight (38) scientific articles were selected throughout a complete process of searching, filtering and systematic analysis. It was found that green waste composting is a very time-consuming process due to the high contents of lignocellulose in the raw material (GW) and its variant composition that makes it a very difficult material to characterize. With regard to the optimization strategies, different authors mainly from Asian and European countries have been developing green waste composting trials applying several strategies. Some of them are: (a) the addition of complementary substrates or microbial inoculums like white-rot fungi species (e.g. *Phanerochaete chrysosporium*, *trametes versicolor*, *fomes fomentarius*) intended to accelerate the lignocellulose degradation; (b) the division of the process in two stages in order to get thermophilic temperatures twice and (c) the application of physical pre-treatments like GW shredding in order to standardize their initial particle size. Furthermore, it was found that applying strategically two or more of the reported strategies could produce a mature compost able to be used for plant-growth and reduce the composting time to 3 – 4 weeks.

*Degree draft. Research internship mode.

**Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: OVIEDO Ocaña, Edgar Ricardo. Sanitary Engineer, Msc., PhD.

INTRODUCCIÓN

Los residuos verdes, junto con los residuos de comida, corresponden a la mayor parte de los residuos sólidos orgánicos municipales en países desarrollados [1]–[3]. Pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios, incinerados o, en el mejor de los casos, sometidos a tratamientos para reducir efectos negativos al medio ambiente. La presente investigación se centra en los residuos verdes, los cuales son originados a partir de labores de mantenimiento de parques municipales, jardines y reservas naturales [4]. Su composición física puede variar dependiendo del lugar de origen y momento de la recolección [5], sin embargo, están constituidos generalmente por cortezas de árboles, recortes de arbustos, hojas verdes, hojas secas, residuos de pasto recién cortado, ramajes y tierra de macetas usadas [4], [6].

Debido a su alto contenido de materia orgánica biodegradable, los residuos verdes pueden ser sometidos a métodos de tratamiento biológico como el compostaje: una opción de manejo sustentable de residuos que consiste en un proceso bioquímico en el que una diversidad de microorganismos transforman la materia orgánica bajo condiciones de temperatura controlada [1], obteniéndose un producto de calidad (compost) para ser utilizado en mejoramiento de suelos y/o como agregado para horticulturas [2], [7]. Es importante resaltar que el proceso de compostaje debe ser realizado bajo condiciones que garanticen la eliminación de organismos patógenos presentes en los residuos y no representen un riesgo al permanecer en el compost final [8], [9].

El proceso de compostaje de residuos verdes se caracteriza por requerir mayor tiempo que otro tipo de residuos (i.e. generalmente de 90 a 270 días) para obtener un producto de calidad [10]. Esto debido su alto contenido de sustancias

lignocelulósicas (e.g. lignina, celulosa y hemicelulosa), cuya estructura compleja dificulta el proceso de asimilación del carbono orgánico por parte de los microorganismos presentes en el proceso [11].

Ante el impacto ambiental que pueden generar los residuos verdes al ser dispuestos en rellenos sanitarios sin tratar y la poca rentabilidad económica que genera el compostaje de los mismos al tratarse de períodos muy largos (i.e. mayores áreas de proceso y de actividades operativas), diversos autores de la comunidad científica han llevado a cabo estudios de compostaje de residuos verdes a diferentes escalas, donde recurren a métodos de optimización del proceso para reducir los tiempos sin afectar la calidad del producto final [5], [7], [12], [13]. Modificaciones en las etapas operativas, variaciones en las frecuencias de volteo, pre-tratamientos, adición de inóculos microbianos y el co-compostaje con materiales complementarios, son algunas de las alternativas de solución que han adoptado dichos autores y que han mostrado diferentes resultados de acuerdo a la elección de cada uno.

Esta investigación tiene como propósito presentar una revisión sistemática de literatura que permita (a) identificar la composición física y las propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes, y (b) caracterizar las estrategias más recientes y efectivas de compostaje de residuos verdes reportadas por la comunidad científica. Para lograrlo se llevó a cabo un proceso de búsqueda, selección, evaluación y análisis de artículos científicos basados en estudios de procesos de compostaje de residuos verdes realizados en los últimos 15 años cuyas estrategias pueden generar un efecto positivo en la reducción del tiempo de compostaje y en la calidad del producto final.

1. METODOLOGÍA

Para este trabajo de investigación se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura, la cual es una herramienta que permite identificar, evaluar y sintetizar toda la información existente relevante a una temática de interés, con el objetivo de proveer un marco de trabajo necesario para iniciar investigaciones futuras [14].

1.1. Búsqueda bibliográfica

El proceso de investigación inició definiendo un protocolo de búsqueda, a través de la identificación de términos clave y de fuentes de información disponible [14]. Como recursos de bases de datos, se utilizaron los buscadores académicos: Google Scholar, Science Direct, Scopus y Scielo, así como otras fuentes de información adicionales como la librería digital de la Universidad Industrial de Santander y documentos publicados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA).

La búsqueda se centró principalmente en artículos científicos publicados a partir del año 2002, que incluyeran en el título y/o resumen, por lo menos uno de los términos: “green waste”, “green waste composting”, “green waste characterization”, “yard waste”, “pruning waste”.

1.2. Filtrado de documentos y criterios de selección

Finalizado el proceso de búsqueda, se realizó un proceso de filtrado de la documentación adquirida, con el fin de identificar claramente los documentos relevantes a la temática de investigación. Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de selección:

- ❖ **Año de publicación:** Selección de documentos publicados en los últimos 15 años, por tanto, se tuvieron en cuenta del año 2002 al 2017.
- ❖ **Título:** Descarte de artículos cuyo título no expresaba relación con el compostaje y/o la caracterización de residuos verdes, a pesar de contener los términos de búsqueda o la combinación de ellos.
- ❖ **Resumen:** Lectura del resumen de cada artículo con el fin de seleccionar estudios relacionados con el compostaje de residuos verdes.
- ❖ **Contenido:** Lectura del contenido total del artículo en donde se identificaron estudios que presentaban la caracterización de diferentes tipos de residuos verdes y/o estrategias novedosas de compostaje de residuos verdes.
- ❖ **Documentos relacionados (referencias de artículos revisados):** Se incluyeron en el material de investigación aquellas referencias encontradas en la lectura del contenido de cada artículo.

Al final, quedaron seleccionados para análisis todos aquellos estudios que abordaran el tema de compostaje de residuos verdes y que incluyeran información de una o algunas de las siguientes temáticas:

- Análisis de la composición física y propiedades fisicoquímicas de residuos verdes para compostaje.
- Propuestas de alternativas de optimización en el proceso de compostaje de residuos verdes (i.e. evidenciando reducción en tiempos y/o efectos positivos en la calidad del producto final).

1.3. Organización y estructura de los datos

Para efectos de organización del material seleccionado, se utilizó la aplicación Mendeley para cargar toda la bibliografía, tener facilidad al momento realizar búsquedas por cualquier ítem (autores, revista, año de publicación, palabras clave, etc.) y, además, dividir la información en carpetas según su temática. Asimismo, se utilizó la herramienta X-Mind con el objetivo de crear mapas conceptuales con las categorías de las estrategias de compostaje y anclar a cada uno los archivos PDF de los artículos relacionados para facilidad de análisis.

1.4. Revisión y análisis de documentos

Para la revisión de los artículos con información de composición física y propiedades fisicoquímicas de residuos verdes, se extrajo la siguiente información de cada uno: autores, año de publicación, denominación para los residuos verdes, porcentajes de cada sustrato en la composición y, por último, valores para cada una de las propiedades reportadas por los mismos. Se tabuló la información extraída en hojas de Excel con el fin de realizar el respectivo tratamiento estadístico descriptivo: identificación de valores máximos y mínimos, cantidad de reportes (n), valor promedio y coeficiente de variación de los conjuntos de datos de cada variable (e.g. parámetros de calidad de los sustratos y productos).

En cuanto a la revisión de las estrategias, se realizó un nuevo proceso de filtrado, pues algunos de los artículos presentaban pruebas de compostaje con tiempos extensos, la cantidad de material de residuos verdes no era representativa, o los tratamientos no se replicaban. Los artículos definitivos, se tabularon en una hoja de Excel y se escribió una síntesis de cada uno teniendo en cuenta: las generalidades del estudio, las características de los materiales a compostar, el procedimiento de compostaje, el monitoreo de parámetros (temperatura, pH, humedad, oxígeno disuelto), la reducción en tiempos de proceso y las características del producto final.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Revisión sistemática de literatura

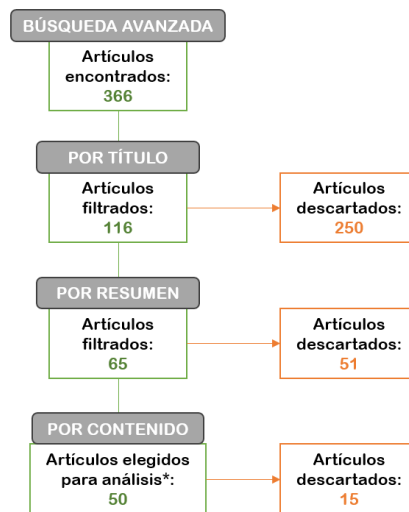
2.1.1. Resultados de filtrado y selección

Según el protocolo de búsqueda utilizado, por medio de las condiciones mencionadas en el numeral 2.1., se encontraron más de 9.000 artículos que, en su mayoría, no tenían relación con las temáticas de investigación. Es por esto, que se decidió realizar una búsqueda más específica que arrojó un resultado de 366 artículos relacionados. Los parámetros fueron los siguientes:

- Año de publicación entre 2002 y 2017.
- Términos “green waste” y “composting” incluido en el título y/o resumen.
- Documentos tipo artículo científico o revisión.
- Por lo menos uno de los términos “composting”, “green waste”, “yard waste”, “pruning waste” dentro de las palabras clave del artículo.

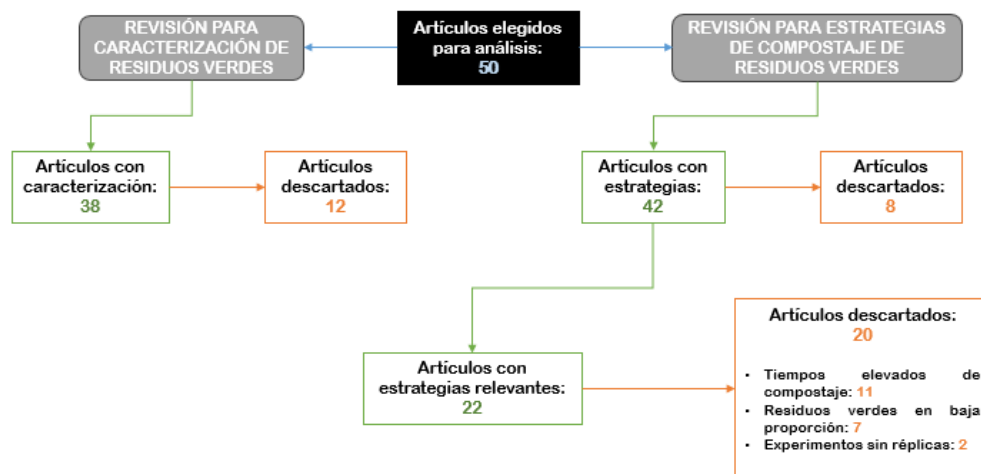
A partir de esta búsqueda, se inició el proceso de filtrado de documentos de acuerdo a los pasos expresados en el numeral 2.2., donde inicialmente se eligieron por título 116 de los 366 artículos encontrados; luego por resumen, se seleccionaron 65 y se descartaron los 51 restantes. Por último, tras la lectura del contenido total de los 65 artículos, se eligieron 50 para someterlos al proceso de análisis y se descartaron 15. El esquema del proceso de filtrado utilizado para esta investigación se encuentra representado en la Figura 1.

Figura 1. Esquema del proceso de filtrado.



Finalizado el proceso de filtrado, se realizó una clasificación de los 50 artículos; en primera instancia, aquellos que brindaran información completa sobre la composición física y propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes; lo cual se encontró en 38 artículos de los 50 totales. Luego, se revisaron de nuevo los 50 artículos para verificar que incluyeran estudios relevantes de procesos de compostaje de residuos verdes, lo cual llevó a un nuevo proceso de filtrado con un resultado de 22 artículos de estrategias de optimización de compostaje con residuos verdes como materia prima principal, tiempos reducidos de compostaje y tratamientos con réplicas suficientes (Anexo 1). El esquema del proceso de revisión de los 50 artículos elegidos se encuentra representado en la Figura 2.

Figura 2. Esquema del proceso de revisión.



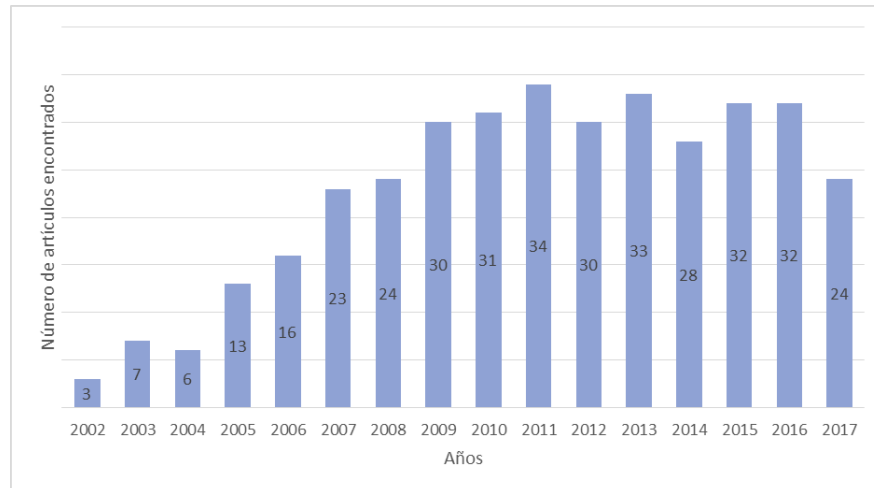
En definitiva, después de la revisión del contenido total de los artículos elegidos, se tuvieron en cuenta para la presente investigación un total de 38 artículos científicos, donde se usaron 16 para la caracterización de residuos verdes, 6 de estrategias de compostaje de residuos verdes, y otros 16 que se utilizaron para los dos ítems.

2.1.2. Evolución y estado actual de la información

A través de los procedimientos de búsqueda, filtrado y análisis realizados para esta investigación, fue posible conocer acerca de la evolución de la información que presenta la comunidad científica alrededor de la temática del aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos como los residuos verdes por medio de tratamientos como el compostaje. En cuanto a la documentación encontrada inicialmente, se notó un crecimiento progresivo de artículos publicados a través de los años (Figura 3). A partir del año 2007 empezó a ser más notable el crecimiento con 23 artículos, lo cual muestra que el material de investigación se ha intensificado gradualmente en los últimos 10 años. Se presenta la mayor cantidad de artículos en el año 2011 y es posible observar la gran cantidad de artículos (24 en total) publicados en los

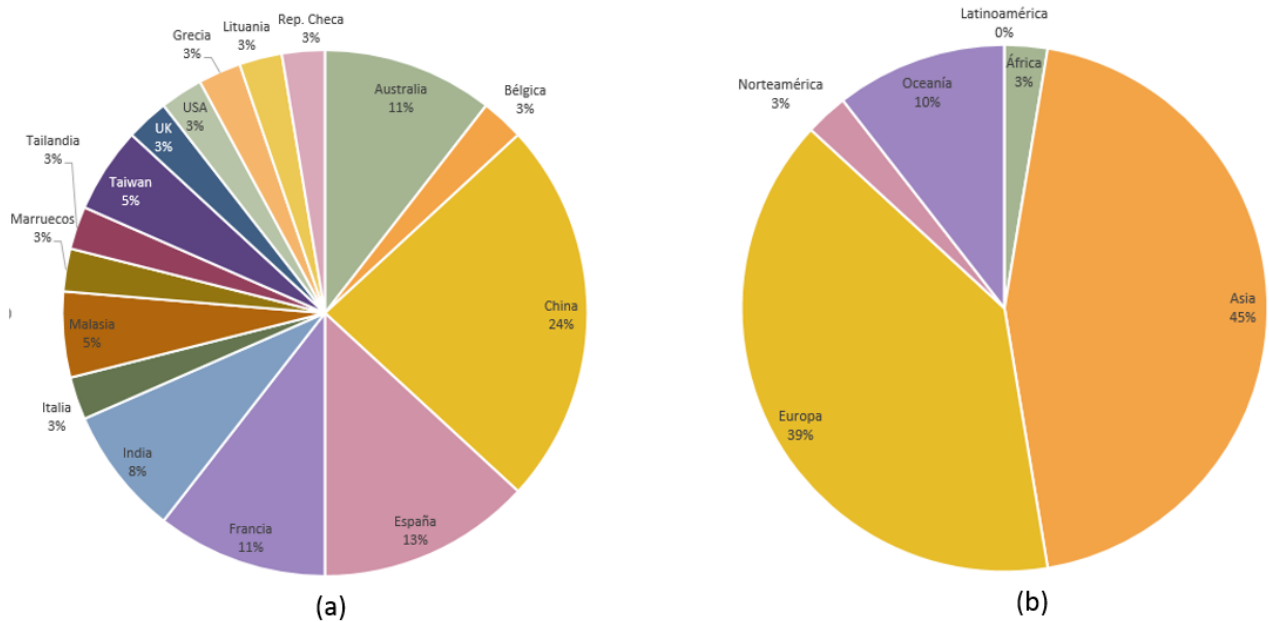
primeros cinco meses del presente año (2017), lo cual proyectaría un aumento significativo de estudios en los próximos años.

Figura 3. Distribución de artículos encontrados (n=366) según año de publicación.
(Búsqueda realizada en el mes de junio de 2017)



Sin embargo, los resultados del proceso de filtrado presentados en el numeral 3.1.1., evidencian que sólo una pequeña parte (38 artículos) de la totalidad de los artículos encontrados (366) se trataban de estudios enfocados en la optimización del proceso de compostaje de residuos verdes y/o en la caracterización de los mismos. La Figura 4 muestra la cantidad de artículos seleccionados por país y región (continente) en el que se llevaron a cabo los estudios de compostaje.

Figura 4. Distribución de artículos seleccionados (n=38) por (a) país de estudio, (b) continente.



Se puede apreciar que el interés por el aprovechamiento de residuos verdes a través del compostaje predomina en países asiáticos como China, y en países europeos como España y Francia. Esto puede deberse al crecimiento de entornos urbanos como parques y jardines en grandes ciudades como Beijing, que generan gran cantidad de residuos de labores de mantenimiento de los mismos (unas 6 millones de toneladas por año [15]) y que, ante el impacto ambiental que generan, pueden ser aprovechados para suelos a través del compostaje. Sin embargo, es notable la ausencia de estudios de compostaje de residuos verdes en países latinoamericanos, donde sigue siendo común que los residuos sólidos se depositen directamente en rellenos sanitarios sin ningún tipo de tratamiento.

La disposición de residuos sólidos orgánicos sin tratar genera emisiones representativas de gases contaminantes como el amoníaco (NH_3), y en reportes de la Agencia Europea para el Medio Ambiente (EEA), en el período de 2010-2013 diez países de la Unión Europea excedían los límites legales establecidos de emisión de

gases contaminantes como el NH_3 [16]. Es por esto que es importante que países como Francia y España (presentes en esa lista) se encuentren dentro de los países europeos con mayor cantidad de conocimiento científico en los últimos años en el aprovechamiento de los residuos a través del compostaje, evidenciando así que los países que afectan en gran parte, presentan normativas más restrictivas y están creando estrategias para contribuir a una reducción de las emisiones de amoníaco generadas mundialmente.

2.2. Caracterización de los residuos verdes

2.2.1. Composición física de los residuos verdes

La caracterización de los residuos verdes representa un desafío para la comunidad científica, debido a que el material que llega a las plantas de compostaje puede presentar una alta variabilidad en su composición por causa de diversos factores como las condiciones climáticas y geográficas del lugar de recolección (e.g. la abundancia de hojas secas en otoño y la escasez de pasto en invierno) [5], [17], [18]. En Hanc et al. [19], se reportó que los recortes de hierba (grass clippings) correspondían generalmente al sustrato predominante en los residuos verdes tanto en verano como en primavera, con un porcentaje de 71 y 45% respectivamente. El estudio de compostaje realizado por Vandecasteele et al [20] evidencia la influencia de las estaciones climáticas en las características del material y reporta mejores resultados en el compost basado en los residuos verdes recolectados en primavera.

A pesar de la variabilidad en su composición física, autores coinciden en sugerir que los residuos verdes cuando son recolectados de forma separada, se constituyen principalmente de hojas verdes, hojas secas, ramaje y recortes de hierba; y, en ocasiones de materia vegetal muerta, raíces y tierra de macetas [4]–[6]. Esto coincide con lo reportado en la presente revisión donde se aprecia claramente la predominancia de la mayoría de los mencionados sustratos en los artículos

consultados (Ver Tabla 1 y Anexo 2). Sin embargo, es importante indicar que son pocos los autores que especifican en su estudio la composición física del material utilizado, lo cual dificulta el seguimiento de la influencia de este parámetro en el proceso de compostaje de residuos verdes.

Tabla 1. Frecuencia de reporte de cada tipo de sustrato encontrado en la revisión.

Tipo de sustrato		Número de reportes ¹
Hojas	Leaves	26
Pasto / Recortes de hierba	Grass / Grass clippings	15
Ramas	Branches	12
Residuos de poda	Pruning waste	7
Recortes leñosos	Woody trimmings	5
Desechos de jardín	Yard trimmings	3
Flores / Plantas pequeñas	Flowers / Small plants	2
Malezas	Weeds	2
Residuos vegetales	Vegetable waste	1

¹Reporte basado en un total de 31 artículos revisados (Anexo 2) Fuente: Autor.

2.2.2. Propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes

Las proporciones en que se pueden encontrar los sustratos que componen los residuos verdes condicionan de manera significativa el proceso de compostaje, al ser cada uno de estos tan variado física y químicamente. Por ende, es importante el reporte de las propiedades físicas y químicas de la materia prima a compostar para lograr una mezcla en la que se complementen las características de cada

sustrato con el fin de crear las condiciones óptimas para el proceso y así, asegurar la calidad del producto final [20], [21].

Las diferencias entre valores de una misma propiedad se presentan debido a la variabilidad en la composición física de los residuos verdes. En estudios como en el de Vandecasteele et al [20] se evidencia lo anterior en algunas de las propiedades de la totalidad del material (GW) con diferentes sustratos predominantes (Tabla 2). Es por esta razón que al momento de consultar estudios referentes, es posible encontrar resultados muy variados entre sí.

Tabla 2. Residuos verdes con diferente sustrato predominante en Vandecasteele et al. [20]

Sustrato predominante en la materia prima		Propiedades fisicoquímicas para cada materia prima ¹			
		MO [%]	C/N	P [%]	K [%]
Residuos de poda	Pruning waste	72	45	0.12	0.63
Recortes de hierba	Grass clippings	53.4	25	0.22	1.56
Hojas	Leaves	64.9	40	0.13	0.57

¹**MO:** cantidad de materia orgánica; **C/N:** relación carbono/nitrógeno; todos los porcentajes basados en peso seco de residuos verdes. Fuente: Adaptado de Vandecasteele et al[20].

Para la presente revisión, se tuvieron en cuenta diferentes estudios que aportaran información de las propiedades fisicoquímicas del GW utilizado en el proceso de compostaje y se tabularon los datos de cada uno. Como resultado, se generó la Tabla 3, en la cual se evidencian los siguientes aspectos:

- La innegable heterogeneidad en los valores (coeficientes de variación superiores a 0.3) de la mayoría de las propiedades, lo cual coincide con lo expresado anteriormente sobre la variabilidad de los residuos verdes y lo difícil que resulta tipificarlos, impidiendo la posibilidad de afirmar que el rango de valores encontrado para cada propiedad corresponde al rango típico adecuado. Es por esto que, para las propiedades que presentaron mayor heterogeneidad en sus datos, se dividió el rango en intervalos con el fin de encontrar una tendencia en los mismos (Anexos 3 – 7).
- La escasa información disponible sobre reportes de propiedades importantes de las cuales se encontraron menos de 10 datos dentro de los artículos consultados. Principalmente, en parámetros como el contenido de diferentes metales pesados y la concentración de celulosa, hemicelulosa y lignina; estas últimas esenciales de monitorear en un proceso de compostaje debido a su significativa presencia en este tipo de residuos y su difícil degradación.
- Se observó que los parámetros más reportados en los estudios corresponden, en su mayoría, a aquellos que influyen directamente en la eficiencia del proceso de compostaje y en la calidad del producto final, como el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de humedad y sólidos volátiles, la relación carbono/nitrógeno (C/N), el contenido de carbono orgánico total (COT) y el contenido de macronutrientes como nitrógeno total (N_{Total}), fósforo total (P_{Total}) y potasio total (K_{Total}).

Tabla 3. Resultados estadísticos de la revisión de propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes.

PROPIEDAD [unidad]¹	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio	n	Coefficiente de variación
Propiedades físicas					
Densidad aparente [g/cm³]	0.188	0.977	0.605	12	0.5353
Tamaño de partícula [mm]	5.0	50.0	16.3	14	0.7876
Contenido de humedad [%]	21.1	67.9	46.1	17	0.2952
Capacidad de retención de agua [%]	48.1	52.3	50.2	3	0.0422
Sólidos volátiles [%]	30.0	98.9	64.6	17	0.2997
Propiedades químicas					
pH	5.4	8.2	6.9	33	0.1072
Conductividad eléctrica [mS/cm]	0.46	3.00	1.53	20	0.4694
Capacidad de intercambio de cationes [cmol/kg]	20.3	35.8	29.1	3	0.2732
Relación C/N	13.5	79.0	35.3	33	0.4448

COT [%]	21.60	56.31	40.89	31	0.2443
Celulosa [%]	18.00	50.04	33.32	7	0.3466
Hemicelulosa [%]	9.75	52.29	24.32	7	0.7121
Lignina [%]	19.50	82.33	36.22	7	0.5694
Macronutrientes y micronutrientes					
N total [%]	0.41	3.40	1.29	33	0.4814
P total [%]	0.04	0.38	0.14	16	0.6141
K total [%]	0.26	1.56	0.58	15	0.5680
Ca [%]	0.15	3.00	1.06	15	0.7454
Mg [%]	0.10	0.75	0.38	13	0.5558
S [%]	0.12	6.13	2.23	11	1.1903
Fe [10⁻³%]	7.1	670	182.3	9	1.5299
Mn [10⁻³%]	3.4	13.1	6.6	6	0.5173
Mo [10⁻³%]	0.3	1.3	0.6	4	0.8162
Metales pesados					
Cu [10⁻³%]	0.10	3.80	1.60	9	0.8511
Pb[10⁻³%]	0.15	2.79	1.65	4	0.6640
Cr [10⁻³%]	0.65	2.64	1.64	4	0.5472
Ni [10⁻³%]	0.36	6.30	2.21	4	1.2532
B [10⁻³%]	0.82	1.57	1.11	6	0.2417
Zn [10⁻³%]	0.70	8.70	3.95	10	0.8702

¹[%] y [10⁻³%]: porcentaje basado en peso seco de residuos verdes.

Fuente: Autor.

A pesar de la heterogeneidad reportada y la falta de información sobre estos parámetros en la documentación, es importante resaltar los rangos de valores en

que se pueden encontrar las propiedades fisicoquímicas de los residuos verdes que más influyen en la efectividad del proceso de compostaje (Tabla 4).

Tabla 4. Rangos de valores de cada propiedad encontrados en la revisión.

Propiedad¹	n/N²	Rango de valores encontrado en la revisión³
Tamaño de partícula predominante [mm]	9/14	10 – 30
Contenido de humedad [%]	9/17	40 – 55
pH	15/33	6.5 – 7.5
Relación C/N	8/33	20 – 25
C [%]	12/31	40 – 50
N total [%]	10/33	0.9 – 1.2
P total [%]	8/16	0.1 – 0.2
K total [%]	8/15	0.4 – 0.8

¹Todos los porcentajes son basados en peso seco de residuos verdes. ²n: reportes dentro del rango especificado; N: número total de reportes de la propiedad. ³Valores correspondientes al intervalo de mayor frecuencia en los anexos (Anexo 3 – 7). Fuente: Autor.

A partir de lo reportado, se puede afirmar que los residuos verdes, a pesar de poderse encontrar en múltiples proporciones de sustratos que condicionan sus propiedades, se caracterizan por:

- Un alto contenido de materia orgánica (MO) disponible que al ser tratada funciona como fuente de energía o como material de estabilización de suelos y/o abono orgánico para horticulturas.

- Contar con un bajo contenido de humedad y ser de naturaleza hidrofóbica, lo que lo hace un material que funciona dando estructura a la mezcla y evitando la sobre-compactación del material, especialmente cuando en su composición física predominan sustratos como cortezas de árboles y ramajes (denominado material leñoso).
- Ser ricos en carbono y generalmente, contar con bajo contenido de nutrientes esenciales como el N, P y K, razón por la cual en múltiples ocasiones es utilizado para compostaje en conjunto con materiales ricos en nutrientes como los residuos de comida y/o desechos animales.
- Valores altos en la relación carbono-nitrógeno. Según la revisión realizada, el rango con mayor frecuencia fue de 20 – 25 (8 de 33). Sin embargo, cabe resaltar que la mayoría de los datos se encontraron en rangos mayores a 25 (22 de 33), lo cual coincide con lo reportado en la documentación sobre la tendencia del GW a aumentar los valores de este parámetro.

2.3. Parámetros en el proceso de compostaje de residuos verdes

Las propiedades de los materiales y las condiciones ambientales del sitio de compostaje son los factores determinantes en la eficiencia del proceso, por lo que precisan ser monitoreados constantemente (Anexo 8).

2.3.1. Variación de temperatura

La temperatura es uno de los principales factores que se deben monitorear en un proceso de compostaje, ya que define los tipos de microorganismos presentes en cada etapa del proceso y la eficiencia en la estabilización de la materia orgánica. La temperatura aumenta de acuerdo al crecimiento de la actividad microbiana y a la tasa de transferencia de calor que puede alcanzar el sustrato [8], [22]. Por medio de este parámetro es posible identificar las cuatro fases del proceso de compostaje: la

primera etapa mesofílica con temperaturas entre 25 y 40°C, luego la termofílica (i.e. la de mayor tasa de degradación de MO y de eliminación de sustancias tóxicas) con temperaturas entre 45 – 65°C, la segunda etapa mesofílica y por último, la fase de maduración que termina cuando el compost se estabiliza alcanzando la temperatura ambiente [11], [23].

Estudios de compostaje de residuos verdes han reportado altos incrementos de temperatura en los primeros días del proceso, alcanzando valores de grado termofílico (45 – 65°C) incluso en el primer día [5], [15], [22], [23]. De acuerdo a Zhang & Sun [24], una etapa termofílica de mínimo tres días con temperaturas que superan los 55°C puede garantizar un compost libre de semillas de maleza y elementos patógenos. Sin embargo, es importante controlar este parámetro durante el proceso, ya que temperaturas por encima de 70°C pueden generar calor excesivo que afecta la vida de los microorganismos presentes [25]. Un proceso de compostaje de residuos verdes típico se caracteriza por iniciar la fase termofílica en los dos primeros días (debido a su gran contenido de carbono orgánico) con cortos períodos de tiempo en dicha fase (menos de 4 días) y largos períodos de maduración (más de 2-3 meses) [10], [12].

2.3.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad en una mezcla de materiales a compostar permite la movilización de nutrientes disueltos requeridos en las actividades metabólicas y fisiológicas de los microorganismos encargados de la degradación de MO [1]. La mayoría de autores reportan que el contenido de humedad óptimo para compostaje depende de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de sustratos [26], [27]. Por lo tanto, cuando la humedad de los materiales es inferior a la requerida en el proceso es necesario ajustarla a través de la adición de agua por sistemas de riego; y cuando es superior a la requerida, es necesaria la adición de materiales que brinden estructura a la mezcla.

En el caso del compostaje de residuos verdes, múltiples autores sugieren ajustar el contenido de humedad a 60 – 70% al inicio y mantenerlo en estos valores a lo largo del proceso [13], [23], [24], [28]. Sin embargo, es posible encontrar pequeñas variaciones en este rango de acuerdo a los requerimientos de cada autor (Tabla 5).

Tabla 5. Ejemplos de contenido de humedad elegido para diferentes estudios de co-compostaje de residuos verdes con diferentes materiales.

Contenido de humedad elegido [%]¹	Materiales de compostaje²	Referencia
60 – 70	GW + cenizas volátiles de carbón	[13]
60	GW + algas marinas + bentonita	[15]
60 – 65	GW + virutas de madera + compost de GW	[22]
50 – 70	GW + NaOH + cenizas volátiles	[11]
55 – 65	GW + roca fosfórica + azufre elemental	[5]

¹Porcentajes basados en peso seco de residuos verdes. ²GW: residuos verdes.

Fuente: Autor.

2.3.3. Suministro de oxígeno

Otro de los principales factores que afectan el proceso de compostaje es la tasa de aireación o tasa de suministro de oxígeno. Una tasa de aireación insuficiente puede conducir a que se presenten condiciones anaerobias debido a la falta de oxígeno, mientras que una aireación excesiva puede impedir las condiciones termofílicas necesarias para el proceso de degradación de MO, generando altas tasas de volatilización del nitrógeno en las que se pierden nutrientes esenciales para el producto final [27], [29]. Existen diferentes formas de mantener las cantidades de

oxígeno adecuadas durante el proceso, la más común es el volteo periódico del material. Vandecasteele et al [20] afirma que requerir una alta frecuencia de volteo se deriva en altos costos operacionales, mas puede llegar a optimizar el proceso de compostaje (i.e. reducir los tiempos y disminuir las áreas requeridas), lo cual compensaría los costos.

Diferentes frecuencias de volteo han sido reportadas por diferentes autores: Karnchanawong et al [11] usaron una frecuencia de volteo alta (una vez al día) con una duración corta de cinco minutos de forma manual en su estudio de compostaje de residuos verdes de árboles. En los estudios de compostaje de residuos verdes con diferentes aditivos de Zhang & Sun [12], [22], [24], [30], se realizó proceso de volteo manual de las hileras con ayuda de mini-excavadoras por cuarenta minutos cada tres días. Otro mecanismo de aireación es a través del bombeo de aire (i.e. aireación forzada) en el contenedor/sitio de compostaje, el cual puede beneficiar las condiciones para la retención de nutrientes y la oxidación del carbono orgánico a CO₂ (i.e. tasa de respiración de los microorganismos) [31]. Francou et al [32] en su estudio de compostaje de GW con bioresiduos, aplicó la inyección de aire atmosférico a los reactores como método de suministro de oxígeno comenzando con una tasa de 400 L/hora que disminuía gradualmente hasta alcanzar la tasa de 60 L/hora a los 84 días de compostaje, mientras que autores como Kumar et al [1] optan por combinar la acción de un agitador en espiral que mezcla periódicamente los materiales con el suministro a través de una bomba de aire a una tasa 10 L/min en el co-compostaje de residuos verdes con residuos de comida. Zhang & Sun [7], [22] afirman que una tasa de aireación en el rango de 0.2 a 0.6 L/min por cada kg de M.O. logra mejoras significativas en la reducción de las emisiones de NH₃, en la reducción de la relación C/N y en la madurez del compost final.

2.3.4. Relación C/N

La relación C/N es uno de los parámetros más reportados en los estudios de compostaje debido a la importancia del carbono como fuente de energía para los

microorganismos durante el proceso y del nitrógeno como nutriente esencial para el producto final [33], [34]. Una relación C/N muy alta indica déficit de nitrógeno que afecta el crecimiento de la actividad microbiana y una relación C/N muy baja indica exceso de nitrógeno que se volatiliza en forma de amoníaco. Por lo tanto, como regla general, se considera óptimo iniciar el proceso de compostaje con una relación C/N entre 25 y 30 [35].

Cuando la materia prima a compostar cuenta con una relación C/N diferente a 25 – 30 (como suele suceder con los residuos verdes que son ricos en carbono), autores recurren a la adición de materiales ricos en nitrógeno y demás nutrientes como los desechos de animales, compost estabilizado, lodos residuales, residuos de comida, entre otros. Así mismo, Zhang & Sun reportan en varios de sus estudios de compostaje de residuos verdes la adición de urea como método de ajuste de la relación C/N de la mezcla inicial [12], [22], [24], [30]. No obstante, autores han evaluado la efectividad de llevar a cabo procesos de compostaje de diferentes sustratos con una relación C/N inicial baja [25], [36], [37]. Kumar et al [1] en su estudio de compostaje de residuos verdes y residuos de comida con una relación C/N inicial de 19.6 (tratamiento óptimo) logró obtener un compost de calidad apto para mejoramiento de suelos en 12 días.

2.3.5. pH

El grado de acidez o alcalinidad del material orgánico, medido a través del pH, puede afectar la actividad microbiana durante el proceso de compostaje: valores muy bajos (acidificación) pueden impedir que el material alcance temperaturas de grado termofílico, y valores muy altos (alcalinización) pueden aumentar las pérdidas de nitrógeno por volatilización [7], [35], [38], [39]. Según Cooperband [35], las bacterias requieren un pH entre 6.0 – 7.5 y los hongos un pH entre 5.5 – 8.0 para favorecer su crecimiento y metabolismo.

El comportamiento de este parámetro en el compostaje puede variar de acuerdo a la temperatura: ante temperaturas de grado termofílico y con el aumento de la

volatilización de N, el pH tiende a aumentar; y ante temperaturas menores (fases mesofílicas y de maduración), la actividad microbiana disminuye naturalmente y, en consecuencia el valor del pH en la muestra disminuye estabilizándose de nuevo [30]. En estudios de compostaje de residuos verdes generalmente se ha determinado óptimo que el pH varíe a lo largo del procedimiento dentro del rango de 7.5 – 8.5 [7], [22]. Karnchanawong et al [11] en su estudio de compostaje de residuos verdes (i.e. compuestos por hojas verdes y ramaje) recurrieron a la aplicación de un pre-tratamiento alcalino con diferentes adiciones de hidróxido de sodio (NaOH) (i.e. 1%, 2% y 3%), lo cual pudo ajustar el pH inicial (6.2) de la materia prima a valores cercanos a 8, logrando así reducir dos veces la cantidad de lignina comparado con el tratamiento control al final de los 105 días del proceso de compostaje. Asimismo, el pH es un parámetro también relacionado a la estabilidad y madurez del compost final: según Karak et al [40] el índice de pH en un compost maduro se encuentra en un rango de 6.5 – 7.5. En la Tabla 6 se muestran algunos ejemplos de valores iniciales y finales de pH de diferentes estudios de compostaje de residuos verdes.

Tabla 6. Ejemplos de valores de pH en estudios de compostaje.

Materiales de compostaje	pH inicial (mezcla)	pH final (compost)	Referencia
GW + bagazo de caña de azúcar + orujo de uva	7.01	6.62	[7]
GW	7.33	7.00	[30]
GW + cal	11.21	7.36	[41]
GW + roca fosfórica + azufre elemental	6.70	7.50	[5]
GW + zeolita + lombrices	7.00	6.61	[42]

Fuente: Autor.

2.3.6. Tiempo

La duración total de un proceso de compostaje depende principalmente de las características de la materia prima, el método utilizado y las condiciones del sitio de compostaje [8]. El proceso se considera terminado cuando el producto alcanza las características requeridas para su uso: un compost se considera “terminado” o estabilizado (CE) cuando el material ya no se encuentra en estado de descomposición y un compost se considera maduro (CM) cuando el material presenta cierto grado de humificación (i.e. son más resistentes a la acción de los microorganismos) [35].

El tiempo requerido de compostaje tradicional para los residuos verdes es especialmente extenso a comparación de otro tipo de residuos debido a que generalmente contienen cerca de un 75% de sustancias lignocelulósicas, que tardan más tiempo en degradar [30], [43], [44]. Según Tai & He [45], el proceso de compostaje de materiales de naturaleza lignocelulósica (como hojas, gramaje y virutas de madera) podría tardar hasta 24 meses en madurar si no se emplean estrategias para acelerar los procesos. En la Tabla 7 se muestran algunos estudios de compostaje de GW que demuestran reducción en los tiempos de compostaje por medio de la aplicación de diferentes tipos de estrategias que se describen en el numeral 3.4.

Tabla 7. Duración del proceso en los tratamientos de diferentes estudios de compostaje de residuos verdes.

Materiales de compostaje	Estrategias empleadas ¹					Duración del proceso (control) [días]	Duración del proceso (óptimo) [días] ³	Referencia
	MS	ME	AI	MOP	PT			
GW						-- ²	220	[10]
GW + NaOH + cenizas volátiles		x			x	--	105	[11]
GW			x	x		135	75	[45]
GW				x	x	175 – 210	70	[20]
GW + biosólidos		x				--	42	[13]
GW + ramnolípidos	x		x	x	x	30	24	[30]
GW + algas marinas + bentonita	x	x	x	x	x	30	21	[15]

¹MS: adición de materiales de soporte; ME: adición de materiales de enmienda; AI: adición de inóculos; MOP: modificaciones operativas; PT: aplicación de pretratamientos. ²Tratamiento control interrumpido al mismo tiempo de los demás tratamientos. ³Duración del tratamiento con mejores resultados presentados en el estudio en términos de calidad del producto y/o reducción de tiempos. Fuente: Autor

2.4. Métodos de optimización del proceso de compostaje de residuos verdes

De acuerdo a lo expresado en el numeral 3.2.2., los residuos verdes están constituidos por altas concentraciones de compuestos de difícil degradación como la celulosa, hemicelulosa y lignina [46]. Ante esta condición, el proceso de compostaje de este tipo de residuos puede tardar hasta más de 270 días, requerir grandes áreas de manejo, producir emisiones contaminantes y generar productos de baja calidad [15], [23].

Es por esto que con el fin de cumplir los objetivos del proceso (i.e. producto final de calidad en el menor tiempo posible), se han implementado estrategias de optimización para lograrlo (Anexos 10 – 31). Reportes de estudios de compostaje de residuos verdes aplicando diferentes estrategias son presentados en el presente capítulo.

2.4.1. Aplicación de pre-tratamientos

Diversos factores tanto internos como externos pueden afectar el proceso de compostaje, tal como fue expresado en el numeral 3.3. de la presente revisión. Uno de ellos es la definición de los tratamientos físicos que se le realizan a la materia prima principal previo al proceso de compostaje [47]. El tratamiento más común que la mayoría de autores utilizan para uniformizar los residuos verdes es la trituración del material a compostar con el objetivo de obtener un tamaño de partícula predeterminado para toda la composición del material (GW). En la Tabla 8 se pueden observar ejemplos de diferentes tamaños de partícula que eligieron algunos autores para su estudio.

Tabla 8. Ejemplos de trituración de residuos verdes previo al proceso de compostaje.

Denominación de residuos verdes	Tamaño de partícula seleccionado [mm]	Método de trituración del material	Referencia
Green waste	10	Mecánicamente con trituradora	[7], [12], [22]
Municipal green waste	5		[13], [28]
Green plant waste	30		[48]
Tree green waste	25	Con molino de cuchillas	[11]

Fuente: Autor.

La distribución del tamaño de las partículas en el sustrato influye de manera significativa en mantener la porosidad y el grado de compactación adecuado que favorezcan la aireación del material. Partículas muy pequeñas tienden a formar una masa que dificulta la formación de poros y partículas muy grandes afectan la generación de calor en el sustrato, por lo que se degradan más lento [26], [49], [50]. Zhang & Sun [30] evaluaron los efectos de elegir diferentes tamaños de partículas (i.e. 10, 15 y 25 mm) en el estudio de co-compostaje de residuos verdes con ramnolípidos. El estudio reveló un aumento en el contenido de nitrógeno en el compost final cuando el tamaño de las partículas de GW fueron ajustadas a 15 mm (un 3.58% de N_{Total} comparado con 3.09% en el tratamiento control que fue triturado a 10 mm) y una reducción en la relación C/N menor (6.16) comparada con el tratamiento control (10.27). Asimismo, resaltan la importancia de seleccionar el adecuado tamaño de partículas en la reducción de sustancias de difícil degradación como la celulosa, ya que la exposición del interior de las partículas puede ayudar en la degradación de la misma, reduciendo tiempos de proceso. A partir de lo

reportado, es importante resaltar la necesidad de triturar previamente los residuos verdes a compostar, ya que es necesaria para (a) uniformizar y reducir el volumen del material, y (b) aumentar el área superficial de los sustratos para favorecer la degradación de sustancias complejas.

Por otra parte, existen estudios de compostaje que modifican físicamente la materia prima a través de la extracción y separación de partes del material. En el caso del GW, cuando la relación C/N es muy alta (mayor de 50 – 60) suele deberse a la presencia de grandes proporciones de material leñoso en su composición (i.e. ramas y cortezas de árboles), lo cual puede limitar la mineralización del nitrógeno y producir compost inmaduro [4]. Es por esto que Vandecasteele et al [20] estudió los efectos de la separación parcial del material leñoso de la materia prima a través de un proceso de tamizado donde se separó el material con partículas mayores a 40 mm. De acuerdo a este estudio, la calidad del compost producto del tratamiento en el que el material leñoso fue separado antes del compostaje no tuvo diferencias significativas con el compost producto del tratamiento control (material leñoso presente en el sustrato), y que en este último actuó como material de soporte de la mezcla reduciendo el tiempo del proceso (de 210 a 70 días). Sin embargo, esto podría variar de acuerdo a las propiedades de la materia prima correspondiente a cada estudio (GW).

2.4.2. Modificaciones en el sustrato

Con el fin de obtener un proceso efectivo de compostaje, es necesario que las características del material a compostar permitan crear las condiciones óptimas necesarias para obtener un producto de calidad [21], lo cual es complicado de lograr con los residuos verdes como único sustrato. Es por esta razón que diversos estudios de compostaje proponen la adición de materiales y/o microorganismos que complementen las características del GW. En el Anexo 9 se encuentran descritos todos los aditivos utilizados en los estudios revisados en la presente investigación.

Reportes de diferentes estudios de co-compostaje de residuos verdes con materiales y/o organismos complementarios son presentados a continuación.

❖ Adición de materiales complementarios

Una de las formas de modificar el sustrato es a través de la adición de diferentes tipos de materiales. Para los residuos verdes, usualmente se trata de mezclas de materiales ricos en nutrientes esenciales, de formas de carbono fácilmente disponible o de compuestos reguladores de pH que tienen como objetivo favorecer la actividad microbiana al entrar en contacto con el material a compostar [41], [51]. En la Tabla 9 se muestran algunos ejemplos de materiales de adición utilizados en diferentes estudios de compostaje de residuos verdes y el efecto de éstos, en la duración del proceso y en la calidad del producto final.

Tabla 9. Ejemplos de aditivos utilizados en los estudios de compostaje de residuos verdes revisados.

Aditivo	Tipo ¹	[%] ²	SCL ³	Tiempo [días]	Efecto en la C/N del producto		Ref.
					Tratamiento control	Tratamiento con el MS/ME	
Roca fosfórica	ME	15	N.R.	22	44.6	7.9	[23]
Cenizas volátiles	MS	5	LAB	21	14.0	13.0	[41]
Azufre	ME	0.5	N.R.	120	15.0	10.0	[5]
Bio-carbono	MS	20	N.R.	24	25.0	8.3	[24]
Panela	ME	5	LAB	21	14.0	10.0	[41]

Bio-sólidos	ME	50	N.R.	60	25.0	9.0	[28]
Virutas de madera	MS	15	N.R.	22	20.8	3.1	[22]

¹ME: material de enmienda; MS: material de soporte. ²Proporción del aditivo en el tratamiento óptimo del estudio. Porcentaje basado en peso seco de residuos verdes. ³Escala del proceso de compostaje; N.R.: no reporta escala utilizada; LAB: Escala de laboratorio. Fuente: Autor.

Ante la naturaleza de los residuos verdes (i.e. alto contenido de MO con déficit de macronutrientes), es común la adición de materiales de enmienda (ME) con contenido significativo en nutrientes que los complementen. Los efectos de la adición de ME en el proceso de compostaje de GW como materia prima principal han sido estudiados por diversos autores de la comunidad científica en los últimos años [1], [5], [28], [32], [41], [52]. Belyaeva et al [28] en su estudio de co-compostaje de GW con biosólidos (i.e. residuos orgánicos del procesamiento de aguas residuales en una planta de tratamiento) encontraron que la adición de los mismos produjo resultados positivos en la reducción de la relación C/N en el compost final: valores de 7 y 12 para los tratamientos con 50 y 25% de biosólidos, comparado con un valor de 25 para el compost del tratamiento control (sólo GW). Así mismo, en los tratamientos con adición de biosólidos en el mismo estudio se reportó mejorías en la capacidad de retención de agua y en el equilibrio de las condiciones de pH en la mezcla durante el proceso, lo cual permitió una rápida degradación de MO para los 60 días de compostaje.

Estudios han reportado que adiciones ricas en azúcares pueden incrementar la tasa de degradación de compuestos complejos y promover el crecimiento de los microorganismos generando efectos positivos en la reducción de los tiempos de

compostaje [12]. Según Gabhane et al [41], la panela actúa como fuente de energía calórica para los microorganismos presentes. En su estudio de compostaje de residuos verdes con adiciones del 5% de diferentes materiales (i.e. cal, yeso fosforado, poli-etilenglicol, panela y cenizas volátiles), resaltó el comportamiento óptimo del tratamiento con panela, el cual obtuvo el compost de mejor calidad (menor relación C/N de 10) entre todos los aditivos evaluados en el proceso en el mismo tiempo de compostaje (21 días).

Con el objetivo de ajustar la porosidad del material, se suelen adicionar materiales de soporte (MS) a la mezcla de compostaje. Los MS aumentan la disponibilidad del carbono a ser degradado y regulan el contenido de agua en el sustrato, lo cual puede derivarse en el incremento de la actividad microbiana [22], [53], [54]. Para estudios de compostaje de diferentes sustratos como residuos de animales y lodos residuales, se ha utilizado GW como MS [55]–[57]. Sin embargo, en algunos estudios donde el sustrato principal es el GW se ha demostrado que el proceso de compostaje resulta más efectivo ante la adición de MS como aserrín o cáscaras de arroz [22], [50]. Zhang & Sun [22] estudiaron el co-compostaje de residuos verdes con adiciones de 15 y 25% de virutas de madera como MS con el objetivo de asegurar el adecuado intercambio de gases y prevenir la sobre-compactación de los materiales. Reportaron que la alta capacidad de adsorción y área superficial que proveen las virutas de madera contribuyeron a disminuir la emisión de N en forma de NH_3 durante el proceso, lo cual facilitó la reducción de 8 días en el tiempo de compostaje (i.e. en uno de los tratamientos con 15% de virutas de madera tuvo 22 días mientras que en el tratamiento sin adiciones fue de 30 días). En otro estudio de los mismos autores, se resalta la utilización del biocarbono como MS, donde diferentes adiciones de este material (20 y 30%) actuaron como fuente de energía calórica y lograron acelerar el proceso de degradación de materia orgánica alcanzando mayores tiempos con temperaturas de grado termofílico (de 10 a 12 días comparado con 4 días totales en el tratamiento de sólo GW) [24].

Existen materiales que, debido a sus características, pueden funcionar tanto aportando nutrientes (ME) como dando estructura al material (MS). Un ejemplo es la roca fosfórica, un recurso natural de fósforo que es capaz de solubilizarse a través de tratamientos como el compostaje y que a su vez, cuenta con alta porosidad que provee área superficial a los sustratos [5]. Bustamante et al [5] revelaron que el co-compostaje de residuos verdes con una adición de 2.3% de roca fosfórica es una alternativa para reducir las pérdidas por volatilización de N y para la obtención de un compost rico en fósforo. Por otra parte, Zhang & Sun [23] resaltaron en uno de sus estudios el aumento en la generación de calor en la mezcla al contar con una adición del 15% de roca fosfórica, la cual gracias a su porosidad equilibró la cantidad de oxígeno disponible manteniendo las condiciones aeróbicas para los microorganismos.

❖ **Adición de agentes inoculantes**

A pesar de que el compostaje es un proceso biológico en el que naturalmente se desarrollan organismos encargados de la estabilización del material, se ha reportado que la adición de agentes inoculantes (AI) puede influir en el aumento de la tasa de degradación de MO, en mayor duración de la etapa termofílica y reducciones en el tiempo total del proceso [9], [38], [58]. Puede ser adicionada una especie, un consorcio de varias especies o utilizar compost maduro. En la Tabla 10 se encuentran algunos ejemplos de AI utilizados en diferentes estudios de compostaje de GW y los resultados en los tiempos del proceso y en la calidad del compost final.

Tabla 10. Ejemplos de AI utilizados en estudios de compostaje de residuos verdes.

Agente inoculante	Tipo ¹	Tiempo con el AI [días]	Calidad del compost final ²	Efecto de inóculos en la C/N del producto final		Ref.
				Tratamiento control	Tratamiento con el AI	
Phanerochaete chrysosporium	F	86	CM	11.8	10.5	[59]
Trametes versicolor	F	86	CM	11.8	11	[59]
Compost de GW	CP	22	CM	21	10	[22]
Microorganismos efectivos de residuos de fruta	CB	49	CM	16	13	[9]
Phanerochaete chrysosporium						
Trametes versicolor	CF	86	CM	11.8	11	[59]
Fomes fomentarius						

¹B: especie bacteriana; F: especie fúngica; CB: consorcio bacteriano; CF: consorcio fúngico; CP: compost. ²CM: compost maduro; CE: compost estable. Fuente: Autor.

Considerando la presencia de sustancias lignocelulósicas en los residuos verdes, algunos autores han usado microorganismos degradadores de lignocelulosa como AI en sus estudios con el fin de facilitar su degradación [15], [59]. Los hongos de podredumbre blanca son conocidos como los microorganismos degradadores de lignocelulosa más eficientes. La especie *Phanerochaete chrysosporium* es la más estudiada en procesos de compostaje de diferentes tipos de residuos

lignocelulósicos [60], y ha sido utilizada en varios estudios de compostaje de GW individualmente y en consorcios fúngicos [7], [42], [59]. En varios estudios de los autores Zhang & Sun [15], [23], [42] se adicionaron 5mL por kg seco de GW de consorcio fúngico de dos especies de estos hongos (60% de *Trichoderma* s.p. y 40% de *Phanerochaete chrysosporium*) revelando resultados positivos en la tasa de reducción de celulosa (30-60%), hemicelulosa (50-80%) y lignina (20-40%) en cortos períodos de tiempo de compostaje (21 – 24 días).

Diversos autores han reportado que la adición de compost maduro puede causar varios efectos en el proceso de compostaje: provee y mantiene la diversidad microbiana, reduce los tiempos de compostaje, aumenta las tasas de degradación de MO y mejora los índices de madurez del producto final [45], [61]. Esto coincide con lo reportado en el estudio de Zhang & Sun [22] donde la adición del 25 y 35% de compost maduro de GW mejoró las condiciones del proceso de co-compostaje de GW y virutas de madera, obteniendo un compost con valores de índice de germinación (90 – 160%) y relación C/N (4 – 11) dentro de los rangos óptimos (i.e. mayor a 80% para índice de germinación y menor a 15 para relación C/N) en cortos tiempos de compostaje (22 – 24 días).

2.4.3. Modificaciones operativas

Otra forma de optimizar el proceso de compostaje de residuos verdes con el objetivo de obtener mejores resultados es alterando el proceso típico, ya sea empleando alternativas de control de parámetros, adicionando sustancias periódicamente o innovando en tecnologías de compostaje. Parámetros como la tasa de aireación deben ser controlados a lo largo del proceso de compostaje, tal como se describe en el numeral 3.3. Diversos autores han evaluado los efectos de distintos sistemas de aireación en la eficiencia del proceso de compostaje de diferentes materiales: Guo et al [27] evaluó diferentes tasas de aireación (i.e. 0.24 – 0.72 L/min por kg de peso seco) para el co-compostaje de desechos de cerdo y tallos de maíz, Cayuela et al [62] estudió los efectos de dos diferentes sistemas de aireación (i.e. volteo

mecánico y aireación forzada) en los parámetros del proceso de compostaje de residuos de la producción del aceite de oliva. No obstante, poco se ha documentado en el compostaje de residuos verdes: Vandecasteele et al [20] aplicaron diferentes frecuencias de volteo (i.e. semanal, quincenal, mensual) para dos métodos de compostaje (i.e. en pilas y en hileras) con GW como materia prima. De acuerdo a las condiciones de este estudio, un volteo semanal es suficiente para el compostaje en hileras y un volteo quincenal mínimo es suficiente para el compostaje en pilas de GW.

Una alternativa que reúne varias técnicas de optimización es dividir el compostaje en dos etapas, la cual es una propuesta implementada por los autores Zhang & Sun en sus actuales estudios de co-compostaje de residuos verdes con diferentes tipos de aditivos [7], [12], [15], [22]–[24], [30], [42]. El método consiste básicamente en: la primera etapa (compostaje primario) inicia con la adición del material a compostar (i.e. GW previamente triturado, materiales de adición, inóculo microbiano y agua) a contenedores descubiertos de cemento con sistema automático de riego y volteo. Se considera terminada esta etapa cuando la temperatura medida en el centro de la mezcla alcanza temperaturas entre 45 y 55°C. Luego, maquinaria pesada es utilizada para trasladar las mezclas de cada tratamiento y formar hileras de compostaje para dar inicio a la segunda etapa (compostaje secundario). Para favorecer la aireación, las hileras se voltean mecánicamente cada tres días mientras se esparce agua para regular el contenido de humedad (60 – 70%). El proceso se considera completo cuando la temperatura en el centro de la pila se mantiene constante a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente [12]. Estos autores han demostrado en cada uno de sus estudios que con este método es posible alcanzar temperaturas de grado termofílico (55 – 65°C) dos veces durante todo el proceso y que los períodos pueden ser más largos que en el proceso convencional (entre 4 y 5 días para cada etapa). Y como consecuencia, lograron obtener compost maduro entre 21 y 30 días, comparado con los 90 – 270 días requeridos para el

método tradicional de compostaje de residuos verdes (i.e. compostaje tradicional de una etapa en pilas de compostaje) [15], [42].

Kalamdhad et al [63] en su estudio de compostaje por tambor rotatorio de GW, residuos vegetales y desechos de animales evaluó dos métodos para aplicar por 20 días en la etapa de maduración del proceso: compostaje en hileras (WC) y vermicomposting (i.e. VC: compostaje con lombrices). Los resultados demostraron que ambos métodos pueden producir compost de buena calidad en el período de tiempo elegido: relación C/N menores de 10 y un contenido nutricional significativo: P_{Total} de 0.71% para VC y de 0.68% para WC.

Adicional al compostaje en dos etapas, Zhang & Sun implementaron en sus estudios la adición periódica (i.e. en la primera etapa cuando se registran temperaturas de 60°C y en la segunda etapa cada 6 días) de 2mL de vinagre de bambú diluido en 2L de agua en el proceso de compostaje de residuos verdes con el fin de controlar las emisiones de amoníaco cuando las temperaturas empiezan a ser excesivas. Esta estrategia ha mostrado resultados positivos en el contenido de nitrógeno mineral en el compost final (relación C/N en los compost final con valores entre 5 – 15), lo cual garantiza la calidad necesaria de los mismos para ser utilizados en horticulturas [12].

3. CONCLUSIONES

El crecimiento de las áreas verdes urbanas en los últimos años en países desarrollados y en vía de desarrollo ha traído consigo el aumento de la generación de residuos orgánicos (i.e. residuos verdes) producto de las labores de mantenimiento de dichos espacios, los cuales en general son dispuestos directamente en rellenos sanitarios, lo cual genera un impacto ambiental importante (e.g. emisiones de gases contaminantes como el amoníaco). Ante la falta de información disponible sobre estrategias de tratamiento de residuos orgánicos como el GW y la escasez casi nula de países latinoamericanos y del Caribe en los que se aplican, es importante incentivar en los gobiernos la creación de normativas ambientales más rigurosas que exijan la realización de tratamientos previos a la disposición de los residuos sólidos orgánicos, lo cual requeriría un aumento significativo en material de investigación sobre propuestas de metodologías de tratamiento.

Pese a que poco se ha documentado sobre estrategias de compostaje de residuos verdes, la presente revisión evidenció que los residuos verdes suelen conformarse de diferentes sustratos a muy variadas proporciones que dependen de diferentes factores como el tipo de vegetación, las condiciones climáticas y de recolección. Se constituyen de grandes proporciones de hojas verdes, hojas secas y recortes de hierba (i.e. “green fraction”) y, usualmente de menores proporciones de ramas, raíces y cortezas de árboles (i.e. “brown fraction”). La revisión realizada reveló que los residuos verdes suelen presentar alto contenido de materia orgánica en forma de carbono orgánico (40 – 50%) con déficit de macronutrientes esenciales como el nitrógeno (0.5 – 1.5%), fósforo (0.1 – 0.2%) y potasio (0.4 – 0.8%) y son de naturaleza hidrofóbica. Adicionalmente, los residuos verdes son considerados

materiales lignocelulósicos (i.e. contienen cerca del 75% de compuestos como la lignina, la celulosa y la hemicelulosa) lo que lo convierten en un material de difícil degradación que extiende los procesos de compostaje a más de seis meses y que genera productos de baja calidad.

El control de parámetros que influyen el proceso y la aplicación de estrategias que optimizan el proceso de compostaje de residuos verdes en términos de reducción de tiempo y mejoras en la calidad del producto, fueron analizados en esta investigación. Los datos presentados evidencian las múltiples metodologías reportadas por la comunidad científica para optimizar el proceso de compostaje de residuos verdes en cuanto a la adición estratégica de materiales u organismos complementarios, sin embargo, es poco lo que se ha reportado en cuanto a variaciones en los procesos y sistemas de control de parámetros como la aireación, el contenido de humedad y la temperatura, los cuales condicionan de manera importante el rendimiento del proceso. Implementar estratégicamente más de dos metodologías presentadas en la revisión puede llegar a reducir los tiempos de meses a 3 – 4 semanas sin afectar la calidad del compost final, por lo cual es recomendable: triturar el material previo al proceso de compostaje definiendo un tamaño de partícula específico + adicionar un material que complemente las propiedades de la materia prima (i.e. ya sea un ME que proporcione nutrientes a los microorganismos, un MS que brinde estructura cuando el GW carece de material leñoso o una fuente de carbono de rápida degradación que acelere el proceso) + adicionar un inóculo microbiano que mejore la diversidad microbiana + modificar el proceso con el fin de alcanzar dos picos de temperatura compostando en dos etapas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUMAR, Mathava; OU, Yan Liang y LIN, Jih Gaw. M. "Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio". *Waste Management*. 2010. Vol. 30, no. 4, pp. 602–609.
- [2] WEI, Yunmei, *et al.* "Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review". *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 122, pp. 51–65.
- [3] U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010". 2010. pp. 1–12.
- [4] HAYNES, R. J.; BELYAEVA, O. N. y ZHOU, Y. F. "Particle size fractionation as a method for characterizing the nutrient content of municipal green waste used for composting". *Waste Management*. 2015. Vol. 35, pp. 48–54.
- [5] BUSTAMANTE, M. A. *et al.* "Phosphorus availability from rock phosphate: Combined effect of green waste composting and sulfur addition". *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 182, pp. 557–563.
- [6] VASAREVIČIUS, Saulius; BALTRENAS, Pranas y BALTRENAITE, Edita. "Investigation and evaluation of green waste composting parameters". *Polish Journal of Environmental Studies*. 2011. Vol. 20, no. 6, pp. 1603–1609.
- [7] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. "Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc". *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 218, pp. 335–343.
- [8] HUBBE, Martin A.; NAZHAD, Mousa y SÁNCHEZ, Carmen. "Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: A review". *BioResources*. 2010. Vol. 5, no. 4, pp. 2808–2854.

- [9] MAT SAAD, Nur Fatin, *et al.* “Composting of mixed yard and food wastes with effective microbes”. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*. 2013. Vol. 65, no. 2, pp. 89–95.
- [10] KHALIL, A.; DOMEIZEL, M. y PRUDENT, P. “Monitoring of green waste composting process based on redox potential”. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 14, pp. 6037–6045.
- [11] KARNCHANAWONG, Somjai; MONGKONTEP, Trinapat y PRAPHUNSRI, Kornvipat. “Effect of green waste pretreatment by sodium hydroxide and biomass fly ash on composting process”. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 146, pp. 14–19.
- [12] ZHANG, Lu, *et al.* “Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste”. *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 131, pp. 68–75.
- [13] BELYAEVA, O. N. y HAYNES, R. J. “Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash”. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, no. 21, pp. 5203–5209.
- [14] CARO GUTIÉRREZ, María Angélica, *et al.* “Análisis y revisión de la literatura en el contexto de proyectos de fin de carrera: Una propuesta”. *Revista Electrónica de la Sociedad Chilena de Ciencia de la Computación*. 2005. Vol. 6, no. 1.
- [15] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Addition of seaweed and bentonite accelerates the two-stage composting of green waste”. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 233, pp. 116–126.
- [16] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. “Many European countries’ air pollutant emissions above legal limits”. [En línea]. 2015. (Recuperado en 30 de junio de 2017.) Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/highlights/many-european-countries2019-air-pollutant/#parent-fieldname-title>.

- [17] INGHELIS, Dirk; DULLAERT, Wout y BLOEMHOF, Jacqueline. "A model for improving sustainable green waste recovery". *Resources, Conservation and Recycling*. 2016. Vol. 110, pp. 61–73.
- [18] BENITO, Marta, *et al.* "Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability". *Bioresource Technology*. 2006. Vol. 97, no. 16, pp. 2071–2076.
- [19] HANC, Ales, *et al.* "Composition and parameters of household bio-waste in four seasons". *Waste Management*. 2011. Vol. 31, no. 7, pp. 1450–1460.
- [20] VANDECASTEELE, Bart; BOOGAERTS, Christophe y VANDAELE, Elke. "Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality". *Waste Management*. 2016. Vol. 58, pp. 169–180.
- [21] EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "Composting Yard Trimmings and Composting of yard Trimmings and Municipal solid Waste". 1994. No. May, p. 141.
- [22] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. "Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste". *Waste Management*. 2016. Vol. 48, pp. 115–126.
- [23] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. "Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of green waste". *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 233, pp. 116–126.
- [24] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. "Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar". *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 171, no. 1, pp. 274–284.
- [25] HUANG, G. F. *et al.* "Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust". *Waste Management*. 2004. Vol. 24, no. 8, pp. 805–813.

- [26] ONWOSI, Chukwudi O., *et al.* “Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects”. *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 190, pp. 140–157.
- [27] GUO, Rui, *et al.* “Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost”. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 112, pp. 171–178.
- [28] BELYAEVA, O. N.; HAYNES, R. J. y STURM, E. C. “Chemical, physical and microbial properties and microbial diversity in manufactured soils produced from co-composting green waste and biosolids”. *Waste Management*. 2012. Vol. 32, no. 12, pp. 2248–2257.
- [29] GAO, Mengchun, *et al.* “The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust”. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 6, pp. 1899–1903.
- [30] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste”. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 163, pp. 112–122.
- [31] BIAŁOBRZEWSKI, I., *et al.* “Model of the sewage sludge-straw composting process integrating different heat generation capacities of mesophilic and thermophilic microorganisms”. *Waste Management*. 2015. Vol. 43, no. Supplement C, pp. 72–83.
- [32] FRANCOU, Cédric, *et al.* “Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting”. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 18, pp. 8926–8934.
- [33] IQBAL, Muhammad Khalid, *et al.* “Optimization of process parameters for kitchen waste composting by response surface methodology”. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 12, no. 5, pp. 1759–1768.

- [34] CHEN, L., *et al.* "The composting process". University of Idaho Extension. 2009.
- [35] COOPERBAND, Leslie. "The Art and Science of Composting: A resource for farmers and compost producers". University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems. 2002. pp. 1–14.
- [36] OGUNWANDE, G. A., *et al.* "Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency". *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 16, pp. 7495–7503.
- [37] ZHU, Nengwu. "Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw". *Bioresource Technology*. 2007. Vol. 98, no. 1, pp. 9–13.
- [38] KARNCHANAWONG, Somjai y NISSAIKLA, Siriwan. "Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin". *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2014. Vol. 3, no. 4, pp. 113–119.
- [39] PARADELO, Remigio; MOLDES, Ana Belén y BARRAL, María Teresa. "Evolution of organic matter during the mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes". *Journal of Environmental Management*. 2013. Vol. 116, no. Supplement C, pp. 18–26.
- [40] KARAK, Tanmoy, *et al.* "Evaluation of Composts from Agricultural Wastes with Fish Pond Sediment as Bulking Agent to Improve Compost Quality". *CLEAN - Soil, Air, Water*. 2013. Vol. 41, no. 7, pp. 711–723.
- [41] GABHANE, Jagdish, *et al.* "Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost". *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 114, pp. 382–388.
- [42] ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. "Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste". *Waste Management*. 2015. Vol. 39, pp. 119–129.

- [43] SHI, Jin Gang, *et al.* “The stimulatory effects of surfactants on composting of waste rich in cellulose”. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2006. Vol. 22, no. 11, pp. 1121–1127.
- [44] LIU, Jia, *et al.* “Effect of biosurfactant on cellulase and xylanase production by *Trichoderma viride* in solid substrate fermentation”. *Process Biochemistry*. 2006. Vol. 41, no. 11, pp. 2347–2351.
- [45] TAI, Hua Shan y HE, Wei Hsiung. “A novel composting process for plant wastes in Taiwan military barracks”. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007. Vol. 51, no. 2, pp. 408–417.
- [46] FERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, A. “Application of compost of two-phase olive mill waste on olive grove: Effects on soil, olive fruit and olive oil quality”. *Waste Management*. 2014. Vol. 34, no. 7, pp. 1139–1147.
- [47] BARRINGTON, Suzelle, *et al.* “Compost convective airflow under passive aeration”. *Bioresource Technology*. 2003. Vol. 86, no. 3, pp. 259–266.
- [48] KEJUN, Sun, *et al.* “Accelerating the degradation of green plant waste with chemical decomposition agents”. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, no. 10, pp. 2708–2713.
- [49] BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A. y MORAL, R. “Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review”. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, no. 22, pp. 5444–5453.
- [50] ZHOU, H. B., *et al.* “Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting”. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 152, pp. 329–336.
- [51] HIMANEN, Marina y HÄNNINEN, Kari. “Effect of commercial mineral-based additives on composting and compost quality”. *Waste Management*. 2009. Vol. 29, pp. 2265–2273.

- [52] DZULKURNAIN, Zulnaim, *et al.* “Co-composting of Municipal Sewage Sludge and Landscaping Waste: A Pilot Scale Study”. *Waste and Biomass Valorization*. 2017. Vol. 8, no. 3, pp. 695–705.
- [53] DOUBLET, J. *et al.* “Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability”. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, no. 2, pp. 1298–1307.
- [54] IQBAL, Muhammad Khalid; SHAFIQ, Tahira y AHMED, Khurshed. “Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost”. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 6, pp. 1913–1919.
- [55] NEUGEBAUER, Maciej y SOŁOWIEJ, Piotr. “The use of green waste to overcome the difficulty in small-scale composting of organic household waste”. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 156, pp. 865–875.
- [56] JOURAIPHY, Abdelmajid, *et al.* “Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste,” *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 56, no. 2, pp. 101–108, 2005.
- [57] MORETTI, Sarah Mello Leite; BERTONCINI, Edna Ivani y ABREU-JUNIOR, Cassio Hamilton. “Composting sewage sludge with green waste from tree pruning”. *Scientia Agricola*. 2015. Vol. 72, no. 5, pp. 432–439.
- [58] CERDA, Alejandra, *et al.* “Composting of food wastes: Status and challenges”. *Bioresource Technology*. 2017.
- [59] VOBĚRKOVÁ, Stanislava, *et al.* “Effect of inoculation with white-rot fungi and fungal consortium on the composting efficiency of municipal solid waste”. *Waste Management*. 2017. Vol. 61, pp. 157–164.

- [60] LÓPEZ, M. J., *et al.* “The effect of aeration on the biotransformation of lignocellulosic wastes by white-rot fungi”. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 81, no. 2, pp. 123–129.
- [61] KATO, Kotaro y MIURA, Nobuaki. “Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost”. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 9, pp. 3372–3380.
- [62] CAYUELA, M. L.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. y ROIG, A. “Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes”. *Process Biochemistry*. 2006. Vol. 41, no. 3, pp. 616–623.
- [63] KALAMDHAD, Ajai S., *et al.* “Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves”. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, no. 24, pp. 6442–6450.
- [64] MANU, M. K.; KUMAR, Rakesh y GARG, Anurag. “Performance assessment of improved composting system for food waste with varying aeration and use of microbial inoculum”. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 234, pp. 167–177.
- [65] ARIAS, O., *et al.* “Composting of pig manure and forest green waste amended with industrial sludge”. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 586, pp. 1228–1236.
- [66] ZHU-BARKER, Xia; DOANE, Timothy A. y HORWATH, William R. “Role of green waste compost in the production of N₂O from agricultural soils”. *Soil Biology and Biochemistry*. 2015. Vol. 83, pp. 57–65.
- [67] YU, Chaowei, *et al.* “Nitrogen amendment of green waste impacts microbial community, enzyme secretion and potential for lignocellulose decomposition”. *Process Biochemistry*. 2017. Vol. 52, pp. 214–222.
- [68] EZZARIAL, Amine, *et al.* “Evaluation of the antibiotics effects on the physical and chemical parameters during the co-composting of sewage sludge with palm wastes in a bioreactor”. *Waste Management*. 2017.

- [69] MATTEI, Paola, *et al.* "Evaluation of dredged sediment co-composted with green waste as plant growing media assessed by eco-toxicological tests, plant growth and microbial community structure". *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 333, pp. 144–153.
- [70] CÁCERES, Rafaela, *et al.* "Evolution of process control parameters during extended co-composting of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media". *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 179, pp. 398–406.
- [71] ESTÉVEZ-SCHWARZ, Iris, *et al.* "Production and Characterization of Compost Made from Garden and Other Waste". *Polish Journal of Environmental Studies*. 2012. Vol. 21, no. 4, pp. 855–864.
- [72] BENITO, Marta, *et al.* "Dynamics of pruning waste and spent horse litter co-composting as determined by chemical parameters". *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100, no. 1, pp. 497–500, 2009.
- [73] ROBERTS, Paula; EDWARDS-JONES, Gareth y JONES, David L. "In-Vessel Cocomposting of Green Waste With Biosolids and Paper Waste". *Compost Science & Utilization*. 2007. Vol. 15, no. 4, pp. 272–282.

BIBLIOGRAFÍA

CARO GUTIÉRREZ, María Angélica, *et al.* “Análisis y revisión de la literatura en el contexto de proyectos de fin de carrera: Una propuesta”. *Revista Electrónica de la Sociedad Chilena de Ciencia de la Computación*. 2005. Vol. 6, no. 1.

COOPERBAND, Leslie. “The Art and Science of Composting: A resource for farmers and compost producers”. University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems. 2002. pp. 1–14.

GABHANE, Jagdish, *et al.* “Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost”. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 114, pp. 382–388.

HAYNES, R. J.; BELYAEVA, O. N. y ZHOU, Y. F. “Particle size fractionation as a method for characterizing the nutrient content of municipal green waste used for composting”. *Waste Management*. 2015. Vol. 35, pp. 48–54.

LÓPEZ, M. J., *et al.* “The effect of aeration on the biotransformation of lignocellulosic wastes by white-rot fungi”. *Bioresource Technology*. 2002. Vol. 81, no. 2, pp. 123–129.

VANDECASTEELE, Bart; BOOGAERTS, Christophe y VANDAELE, Elke. “Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality”. *Waste Management*. 2016. Vol. 58, pp. 169–180.

VOBĚRKOVÁ, Stanislava, *et al.* “Effect of inoculation with white-rot fungi and fungal consortium on the composting efficiency of municipal solid waste”. *Waste Management*. 2017. Vol. 61, pp. 157–164.

ZHANG, Lu, *et al.* “Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste”. *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 131, pp. 68–75.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of green waste”. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 233, pp. 116–126.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Addition of seaweed and bentonite accelerates the two-stage composting of green waste”. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 233, pp. 116–126.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar”. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 171, no. 1, pp. 274–284.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste”. *Waste Management*. 2015. Vol. 39, pp. 119–129.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste”. *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 163, pp. 112–122.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc”. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 218, pp. 335–343.

ZHANG, Lu y SUN, Xiangyang. “Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste”. *Waste Management*. 2016. Vol. 48, pp. 115–126.

ANEXOS

ANEXO 1. Tabla resumen de los estudios seleccionados.

#	Autores	Año	País	STR ¹	Tiempo [días]	CCF ²	Ref.
1	Belyaeva & Haynes.	2009	Australia	MOS	42	CM	[13]
2	Belyaeva et al.	2012	Australia	MOS	60	CM	[28]
3	Bustamante et al.	2016	Italia	MOS	120	CM	[5]
4	Doublet et al.	2011	Francia	MOS	84	CM	[53]
5	Francou et al.	2008	Francia	MOS	84	CM	[32]
6	Gabhane et al.	2012	India	MOS	21	CM	[41]
7	Haynes et al.	2015	Australia	PT	100	CM	[4]
8	Kalamdhad et al.	2009	India	MOP	27	CM	[63]
9	Karnchana wong et al.	2017	Tailandia	MOS	105	CM	[11]
10	Kumar et al.	2010	Taiwán	MOS	12	CE	[1]
11	Mat Saad et al.	2013	Malasia	MOS, MOP	49	CM	[9]

12	Tai & He.	2007	Taiwán	MOS	75	CM	[45]
13	Vandecasteele et al.	2016	Bélgica	MOP, PT	70	CM	[20]
14	Voberkova et al.	2017	República Checa	MOS	86	CM	[59]
15	Zhang et al.	2013	China	MOS, MOP	30	CM	[12]
16	Zhang & Sun.	2014	China	MOS, MOP	24	CM	[24]
17	Zhang & Sun.	2014	China	MOS, MOP, PT	24	CM	[30]
18	Zhang & Sun.	2015	China	MOS, MOP	21	CM	[42]
19	Zhang & Sun.	2016	China	MOS, MOP	21	CM	[7]
20	Zhang & Sun.	2016	China	MOS, MOP	22	CM	[22]
21	Zhang & Sun.	2017	China	MOS, MOP	22	CM	[23]
22	Zhang & Sun.	2017	China	MOS, MOP	21	CM	[15]

¹Tipo de estrategia empleada. MOS: modificaciones en el sustrato; MOP: modificaciones operativas en el proceso; PT: aplicación de pre tratamientos al sustrato. ²Calidad del compost final de acuerdo al estado reportado en el artículo del tratamiento óptimo: CM: compost maduro; CE: compost estable. Fuente: Autor.

ANEXO 2. Composición física de los residuos verdes de cada estudio.

#	Año	Autores	Término de los residuos verdes	Sustratos [%] ¹									Ref.
				HJ	RM	RH	RP	RL	ML	F	DJ	RV	
1	2017	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[23]
2	2017	Manu et al.	Garden waste	C	--	C	--	--	--	C	--	--	[64]
3	2017	Karnchanawong et al.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[11]
4	2017	Arias et al.	Forest green waste	21	5	--	--	--	74	--	--	--	[65]
5	2017	Zhu-Barker et al.	Green waste	--	10	90	--	--	--	--	--	--	[66]
6	2017	Chaowei et al.	Green waste	24.6	8.4	28.8	38.2	--	--	--	--	--	[67]
7	2017	Ezzariai et al.	Green waste	58	--	42	--	--	--	--	--	--	[68]
8	2017	Ezzariai et al.	Green waste	61	--	39	--	--	--	--	--	--	
9	2017	Ezzariai et al.	Green waste	85	--	15	--	--	--	--	--	--	
10	2016	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	C	--	--	--	--	--	--	[22]
11	2016	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[7]
12	2016	Bustamante et al.	Green waste	--	--	35	65	--	--	--	--	--	[5]
13	2016	Mattei et al.	Green waste	--	C	--	--	--	--	--	--	--	[69]
14	2015	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[42]

15	2015	Cáceres et al.	Green waste	C	--	--	--	C	--	--	C	--	[70]
16	2014	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[30]
17	2014	Zhang & Sun.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[24]
18	2013	Zhang et al.	Green waste	C	C	--	--	--	--	--	--	--	[12]
19	2012	Gabhane et al.	Green waste	--	--	--	--	--	--	--	50	50	[41]
20	2012	Estévez-Schwarz et al.	Garden waste	25	--	--	75	--	--	--	--	--	[71]
21	2012	Estévez-Schwarz et al.	Garden waste	33.3	--	--	66.7	--	--	--	--	--	
22	2012	Estévez-Schwarz et al.	Garden waste	37.5	--	--	62.5	--	--	--	--	--	
23	2012	Estévez-Schwarz et al.	Garden waste	43	--	--	57	--	--	--	--	--	
24	2011	Vasarevicius et al.	Green waste	50	--	50	--	--	--	--	--	--	[6]
25	2011	Vasarevicius et al.	Green waste	45	--	45	--	10	--	--	--	--	
26	2011	Vasarevicius et al.	Green waste	37.5	--	37.5	--	25	--	--	--	--	
27	2011	Vasarevicius et al.	Green waste	25	--	25	--	50	--	--	--	--	

28	2010	Kumar et al.	Green waste	C	--	C	--	--	--	--	--	--	[1]
29	2009	Benito et al.	Pruning waste	10	--	20	70	--	--	--	--	--	[72]
30	2007	Tai & He.	Plant waste	39	--	--	--	--	60	1	--	--	[45]
31	2007	Roberts et al.	Green waste	C	--	C	--	C	--	--	C	--	[73]
TOTAL REPORTES				26	12	15	7	5	2	2	3	1	

¹**C**: Sustrato presente en la composición del material sin registro de cantidad; **[%]**: porcentaje basado en peso seco de residuos verdes; HJ: hojas; RM: ramas; RH: recortes de hierba; RP: recortes de poda; RL: recortes leñosos; ML: malezas; F: flores y plantas pequeñas; DJ: desechos de jardín; RV: residuos vegetales. Fuente: Autor.

ANEXO 3. Rangos de valores de propiedades físicas.

Densidad aparente [g/cm³]		Tamaño de partícula [mm]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
0.15 – 0.40	5	<10	2
0.40 – 0.75	1	10 - 30	9
0.75 – 1.00	6	30 - 50	3
TOTAL	12	TOTAL	14

Contenido de humedad [%]		Sólidos volátiles [%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
<25	1	30 - 50	5
25 - 40	3	50 - 70	4
40 - 55	9	70 - 90	6
55 - 70	4	90 - 100	2
TOTAL	17	TOTAL	17

Fuente: Autor.

ANEXO 4. Rangos de valores de propiedades químicas.

PH		Conductividad eléctrica [mS/cm]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
<5,5	1	<0,5	1
5.5 – 6.5	10	0.5 – 1.5	7
6.5 – 7.5	15	1.5 – 2.5	10
7.5 – 8.5	7	2.5 – 3.5	2
TOTAL	33	TOTAL	20

Relación C/N		C [%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
10 - 15	2	20 - 30	5
15 - 20	1	30 - 40	7
20 - 25	8	40 - 50	12
25 - 30	5	50 - 60	7
30 - 40	5	TOTAL	31
40 - 50	6		
>=50	6		
TOTAL	33		

Fuente: Autor.

ANEXO 5. Rango de valores de macronutrientes.

K [%]		Ca [%]		S [%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
0.2 – 0.4	5	<0.25	1	<0.5	5
0.4 – 0.8	8	0.25 – 1.25	10	0.5 – 2.5	2
0.8 – 1.2	1	1.25 – 2.25	2	2.5 – 4.5	1
1.2 – 1.6	1	2.25 – 3.25	2	4.5 – 6.5	3
TOTAL	15	TOTAL	15	TOTAL	11

N [%]	
Intervalo	Frecuencia
<0.5	1
0.5 – 0.9	6
0.9 – 1.2	12
1.2 – 1.5	5
1.5 – 1.8	3
1.8 – 2.1	3
2.1 – 2.5	1
2.5 – 3.5	2
TOTAL	33

P [%]	
Intervalo	Frecuencia
<0.05	1
0.05 – 0.1	4
0.1 – 0.2	8
0.2 – 0.3	2
>=0.3	1
TOTAL	16

ANEXO 6. Rango de valores de concentración de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Celulosa [%]		Hemicelulosa [%]		Lignina [%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
<20	1	<10	1	<20	1
20 - 30	2	10 - 30	4	20 - 40	5
30 - 40	2	30 - 50	1	40 - 60	0
40 - 50	1	50 - 60	1	60 - 80	1
TOTAL	7	TOTAL	7	TOTAL	7

Fuente: Autor.

ANEXO 7. Rangos de valores de concentración de metales pesados.

Cu [10⁻³%]		Zn [10⁻³%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
<0.25	2	<1	3
0.25 - 1	2	1 - 3	3
1 - 2	1	3 - 5	0
2 - 3	2	5 - 7	1
3 - 4	2	7 - 9	3
TOTAL	9	TOTAL	10

Pb [10⁻³%]		Cr [10⁻³%]	
Intervalo	Frecuencia	Intervalo	Frecuencia
<1	1	<1	1
1 - 2	2	1 - 2	1
2 - 3	1	2 - 3	2
TOTAL	4	TOTAL	4

Fuente: Autor.

ANEXO 8. Parámetros iniciales de cada estudio.

#	Sustrato	MTD	SCL	CH [%]	C/N	AIR	TC [d]	Ref.
1	GW + cenizas volátiles de carbón	Contenedor de plástico	N.R.	60 – 70	23	Volteo mecánico c/7 días	42	[13]
2	GW + biosólidos	Contenedor de plástico	N.R.	60 – 70	25	Volteo mecánico c/7 días	60	[28]
3	GW + roca fosfórica + azufre elemental	Compostaje en hileras	N.R.	55 – 65	20 25	Volteo mecánico diario	120	[5]
4	Lodos residuales + compost de GW + recortes de hierba + ramajes	Reactores de compostaje (in-vessel)	Piloto	--	14 26	Aireación forzada + volteo c/2 semanas	84	[53]
5	GW + bio-residuos + papel y cartón	Reactores cilíndricos de PVC	Piloto	N. R.	20 65	Aireación forzada	84	[32]

6	GW + diferentes aditivos	Cajas termo- Estáticas	Lab.	60	16 18	N.R.	21	[41]
7	GW	Contenedor de plástico	Lab.	70	30	N.R.	100	[4]
8	Hojas de árboles + residuos vegetales	Tambor rotatorio + vermi-composting o hileras	Semi-industrial	73 – 74	6 – 9	Volteo auto-mático (motor)	27	[63]
9	GW + NaOH + cenizas volátiles	Cajas termo-estáticas de poli-estireno	Lab.	80	50 55	Volteo manual diario	105	[11]
10	GW + residuos de comida	Reactores de acero de compostaje (in-vessel)	Lab.	45 – 75	14 20	Agitador + bomba de aire	12	[1]
11	Residuos de jardín + residuos de fruta	Barril de compostaje o en tambor rotatorio	N.R.	40 – 70	N.R.	Volteo manual / mecánico	49	[9]
12	GW + residuos de comida + aserrín +	Compostaje en hileras	N.R.	50 – 60	30	Volteo manual	75	[45]

	cáscaras de arroz + residuos de soya							
13	GW	Compostaje en pilas estáticas o en hileras	N.R.	--	21 – 49	Volteo mecánico	210 – 70	[20]
14	Residuos de jardín + hojas + residuos de comida	Pilas de compostaje	Industrial	--	32	Volteo mecánico c/7 días	86	[59]
15	GW + azúcar morena + superfosfato de calcio	Contenedores de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	60	Volteo automático / mecánico	30	[12]
16	GW + biocarbono + compost de champiñones	Contenedores de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	42 – 32	Volteo automático / mecánico	24 – 30	[24]

17	GW + ramnolípi dos	Contenedor es de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	43	Volteo automátic o / mecánico	24 – 30	[30]
18	GW + zeolita + lombrices de tierra	Contenedor es de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	25 – 30	Volteo automátic o / mecánico	21 – 30	[42]
19	GW + bagazo de caña de azúcar + orujo de uva	Contenedor es de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	25 – 30	Volteo automátic o / mecánico	21 – 30	[7]
20	GW + compost de GW + virutas de madera	Contenedor de concreto + en hileras	N.R.	60 – 65	25 30	Volteo auto- mático / mecánico	22 30	[22]
21	GW + sediment o de estanque de peces + roca fosfórica	Contenedor de concreto + en hileras	N.R.	60 – 70	25 30	Volteo automátic o / mecánico	22 30	[23]
22	GW + algas	Contenedor es de	N.R.	60	25 30	Volteo auto-	21 30	[15]

	marinas + bentonita	concreto + en hileras				mático / mecánico		
--	------------------------	--------------------------	--	--	--	----------------------	--	--

Fuente: Autor.

ANEXO 9. Resumen de los materiales de adición e inóculos reportados y sus efectos.

#	Aditivo/ Inóculo	[%] ¹	Tipo ²	Efecto del aditivo/inóculo en el estudio de compostaje	Tiempo [días]	CCF ₃	Ref.
1	Cenizas volátiles	25	MS	Aporte en la porosidad y capacidad de retención de agua de la mezcla de compostaje.	42	CM	[13]
		5	ME	Aporte de nutrientes vitales para el crecimiento microbiano.	21	CM	[41]
		6.2	AA	Aumento en la proporción de finos en la distribución de partículas del compost final.	105	CM	[11]
2	Biosólidos	50	ME	Llenaron los macro-poros del GW reduciendo la densidad aparente de la mezcla.	60	CM	[28]
3	Roca fosfórica	2.3	ME, MS	Aumento en la cantidad de fósforo en el compost final.	120	CM	[5]
		15	ME, MS	Mejora en las condiciones de porosidad que mantuvieron aeróbico el proceso.	22	CM	[23]
4	Azufre elemental	0.5	ME	Mejora en la solubilización de nutrientes insolubles como P y K.	120	CM	[5]
5	Yeso fosforado	5	MS	Disminución del pH debido a su naturaleza ácida.	21	CM	[41]

6	Cal	5	ME	Aporte en la evolución del CO ₂ sin afectar la actividad microbiana.	21	CM	[41]
7	Panela	5	ME	Funcionó como fuente de energía calórica que acelera el proceso de degradación de M.O.	21	CM	[41]
8	Poli-etil-englicol	5	ME	Aumento en la tasa de degradación de la celulosa.	21	CM	[41]
9	NaOH	1 - 2	AA	Aumento de la conductividad eléctrica en el compost.	105	CM	[11]
10	Takakura EM	--	AI	Aumento de la diversidad microbiana e incremento en la actividad enzimática.	49	CM	[9]
11	Residuo de fruta EM	--	AI		49	CM	[9]
12	Compost maduro	5	AI	Reducción de los tiempos de compostaje ante la rápida degradación de M.O.	60 - 90	CM	[45]
		35	AI	La comunidad microbiana presente en el aditivo permitió la rápida reducción de la M.O.	22	CM	[22]
		35	AI, ME	Aporte en la reducción de M.O. de fácil degradación y en la generación de calor en la mezcla.	24	CM	[24]
13		--	AI		86	CE	[59]

	Phanerochaete chrysosporium	--	AI	Aceleración de la degradación de las sustancias lignocelulósicas.	21 – 30	CM	[7], [12], [15], [22]–[24], [30], [42]
14	Trametes versicolor	--	AI	Permitieron una tasa de degradación más alta y un mejor grado de madurez en el compost.	86	CM	[59]
15	Fomes fomentarius	--	AI		86	CM	[59]
16	Zeolita	25	MS	Aporte en la absorción de las sustancias húmicas y la retención del nitrógeno en el compost gracias a su área superficial.	21	CM	[42]

17	Lombrices de tierra	0.3	AI, ME	Su contenido de enzimas permitió acelerar el proceso de humificación en el compost.	21	CM	[42]
18	Algas marinas	35	ME, MS	Aporte en aumento de la porosidad y en la disminución de la densidad aparente	21	CM	[15]

				de la mezcla. Su contenido de enzimas nitrificadoras permitió la retención de N en el compost.			
19	Bentonita	4.5	MS	Permitió la obtención de un producto con la distribución de tamaño de partículas adecuada y con buena estructura.	21	CM	[15]
20	Sedimentos de estanque de peces	25	ME	Aporte en el aumento del contenido de N en la mezcla, lo cual aceleró la degradación de M.O.	22	CM	[23]
21	Virutas de madera	15	MS	Mejora en la adsorción de N durante el compostaje gracias a su gran área superficial.	22	CM	[22]
22	Bagazo de caña de azúcar	15	MS	Aporte en el aumento de la capacidad de retención de agua en el compost final.	21	CM	[7]
23	Orujo de uva	20	ME	Su contenido de nutrientes pudo acelerar la retención de N en la mezcla.	21	CM	[7]
24	Biocarbono	20	MS	Aceleró el proceso aumentando el área superficial disponible y la capacidad de retención de agua. Actuó como fuente de energía calórica.	24	CM	[24]

25	Ramnolípidos	0.15	MS	Mejora en la penetración del agua en los poros de las partículas de GW. Fuente de carbono y energía para los microorganismos.	24	CM	[30]
26	Azúcar morena	0.5	ME	Aumento en la actividad microbiana y ajuste del pH en la mezcla de levemente ácido a levemente alcalino.	30	CM	[12]
27	Superfosfato de calcio	6	ME	Aumento en el contenido de P y Ca en el compost.	30	CM	[12]
28	Urea	--	ME	Ajuste de la relación C/N a 25 – 30 en la mezcla de GW, aditivos e inóculos al inicio del proceso de compostaje.	21 – 30	CM	[7], [12], [15], [22]–[24], [30], [42]
29	Trichoderma s.p.	--	AI	Aporte en el aumento de la tasa de degradación de las sustancias lignocelulósicas.	21 – 30	CM	[7], [12], [15], [22]–[24], [30], [42]

¹Porcentajes basados en peso seco de residuos verdes. ²MS: material de soporte; ME: material de enmienda; AA: agente alcalino; AI: agente inoculante. ³CM: compost maduro; CE: compost estable. Fuente: Autor.

ANEXO 10. Ficha resumen 1

Título:	Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash				
Autores:	Belyaeva, O. N.; Haynes, R. J.		Referencia:	[13]	
Año de publicación:	2009	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala.	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Cenizas volátiles de carbón
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje de cenizas volantes de carbón con residuos verdes municipales para producir material de mejoramiento de suelos utilizando contenedores de plástico de 250 L de capacidad envueltos en fibra de vidrio para reducir emisiones.				
Tratamiento óptimo:	GW (75%) + Cenizas volátiles de carbón (25%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	42

ANEXO 11. Ficha resumen 2

Título:	Chemical, physical and microbial properties and microbial diversity in manufactured soils produced from co-composting green waste and biosolids				
Autores:	Belyaeva, O. N.; Haynes, R. J.; Sturm, E. C.		Referencia:	[28]	
Año de publicación:	2012	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	No reporta escala.	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Biosólidos
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje de residuos verdes con dos diferentes adiciones de biosólidos como material de enmienda utilizando contenedores de plástico de 250 L de capacidad envueltos en fibra de vidrio para reducir emisiones.				
Tratamiento óptimo:	GW (50%) + Biosólidos (50%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	60

ANEXO 12. Ficha resumen 3.

Título:	Phosphorus availability from rock phosphate: Combined effect of green waste composting and sulfur addition				
Autores:	Bustamante, M. A.; Ceglie, F. G.; Aly, A.; Mihreteab, H. T.; Ciaccia, C.; Tittarelli, F.	Referencia:	[5]		
Año de publicación:	2016	Revista:	Journal of Environmental Management		
Escala del compostaje:	No reporta escala.	Materia prima principal:	GW: Recortes de palma (32%), Recortes de hierba (35%), Recortes de olivos y coníferas (33%)	Adiciones:	Roca fosfórica, Azufre elemental
Descripción de la metodología empleada:	Co-compostaje en hileras trapezoidales de la combinación de diferentes sustratos de residuos verdes (recortes de palma, recortes de hierba y una mezcla 1:1 de recortes de olivos y coníferas) con adición de roca fosfórica y azufre elemental, para producir compost rico en fósforo.				
Tratamiento óptimo:	GW + Roca fosfórica (2.3%) + Azufre (0.5%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	120

ANEXO 13. Ficha resumen 4.

Título:	Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability				
Autores:	Doublet, J.; Francou, C.; Poitrenaud, M.; Houot, S.			Referencia:	[53]
Año de publicación:	2011	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	Piloto	Materia prima principal:	Lodos residuales (12 – 14%, 20%)	Adiciones:	GW compost, GW, tallos de maíz.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de co-compostaje de 12 semanas de lodos residuales con diferentes sustratos de GW (ramas, recortes de hierba, material leñoso y cortezas de árboles), compost de GW y tallos de maíz, a través de reactores de compostaje de 170 L.				
Tratamiento óptimo:	Lodos residuales (12%), GW (34%), GW compost (54%).	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	84

ANEXO 14. Ficha resumen 5.

Título:	Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting				
Autores:	Francou, Cédric; Linères, Monique; Derenne, Sylvie; Villio-Poitrenaud, Maelenn Le; Houot, Sabine	Referencia:	[32]		
Año de publicación:	2008	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	Piloto	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Bioresiduos, Mezcla de papel + cartón
Descripción de la metodología empleada:	Compostaje en reactores de escala piloto de diferentes combinaciones de residuos municipales: residuos verdes provenientes de jardines públicos y privados, bioresiduos (frutas y vegetales) y papel-cartón. Los sustratos fueron triturados previo al proceso de compostaje: bioresiduos a partículas de 50 mm, GW a 20 mm y la combinación de papel-cartón a partículas del rango de 20 – 50 mm.				
Tratamiento óptimo:	GW (71%), papel-cartón (21%), bioresiduos (8%).	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	84

ANEXO 15. Ficha resumen 6.

Título:	Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost				
Autores:	Gabhane, Jagdish.; William, SPM Prince.; Bidyadhar, Rajnikant.; Bhilawe, Priya.; Anand, Duraisamy.; Vaidya, Atul N.; Wate, Satish R.			Referencia:	[41]
Año de publicación:	2012	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	Laboratorio	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Cal, cenizas volátiles, poli-etilenglicol, panela, yeso fosforado
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje de residuos verdes triturados a tamaños de 10 – 25 mm compuestos por recortes de hierbas y hojas caídas como materia prima, con la adición al 5% de diferentes tipos de aditivos (cal, yeso fosforado, panela, poli-etilenglicol y cenizas volátiles), llevado a cabo en cajas termostáticas de 1kg de capacidad.				
Tratamiento óptimo:	GW + panela (5%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	21

ANEXO 16. Ficha resumen 7.

Título:	Particle size fractionation as a method for characterizing the nutrient content of municipal green waste used for composting				
Autores:	Haynes, R. J.; Belyaeva, O. N.; Zhou, Y. F.	Referencia:	[4]		
Año de publicación:	2015	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	Laboratorio	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	--
Descripción de la metodología empleada:	Se tamizó y separó 1kg de residuos verdes en 7 fracciones (>20mm, 10-20 mm, 5-10 mm, 2-5 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm y <0.5) que se situaron en contenedores de plástico de 2L de capacidad por 100 días, con el objetivo de caracterizarlos y evaluar su comportamiento en el proceso de compostaje.				
Tratamiento óptimo:	--	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	100

ANEXO 17. Ficha resumen 8.

Título:	Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves				
Autores:	Kalamdhad, Ajay S.; Singh, Yatish K.; Ali, Muntjeer.; Khwairakpam, Meena.; Kazmi, A. A.	Referencia:	[63]		
Año de publicación:	2009	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	Semi-industrial	Materia prima principal:	Hojas de árboles y residuos vegetales	Adiciones:	Desechos de ganado y aserrín
Descripción de la metodología empleada:	Monitoreo de los parámetros fisicoquímicos y biológicos durante el proceso de compostaje por tambor rotatorio de residuos vegetales, hojas de árboles y desechos animales, además de la evaluación de dos métodos diferentes para la etapa de maduración: vermicomposting y compostaje en hileras por 20 días.				
Tratamiento óptimo:	Maduración por vermicomposting	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	27

ANEXO 18. Ficha resumen 9.

Título:	Effect of green waste pretreatment by sodium hydroxide and biomass fly ash on composting process				
Autores:	Karnchanawong, Somjai.; Mongkontep, Trinapat.; Praphunsri, Kornvipat	Referencia:	[11]		
Año de publicación:	2017	Revista:	Journal of Cleaner Production		
Escala del compostaje:	Laboratorio	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Hidróxido de sodio, Cenizas volátiles de carbón
Descripción de la metodología empleada:	Aplicación de un pre-tratamiento alcalino con hidróxido de sodio y cenizas volátiles de carbón en el proceso de compostaje de residuos verdes compuesto por hojas y pequeñas ramas triturado a un tamaño de 25 mm, a través de cajas termostáticas de 55 L de capacidad.				
Tratamiento óptimo:	GW + Cenizas volátiles de carbón (6.2%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	105

ANEXO 19. Ficha resumen 10.

Título:	Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio				
Autores:	Kumar, Mathava.; Ou, Yan Liang.; Lin, Jih Gaw.		Referencia:	[1]	
Año de publicación:	2010	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	Laboratorio	Materia prima principal:	Residuos de comida + GW	Adiciones:	Cascarillas de arroz
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje de residuos verdes y residuos de comida en reactores de acero de compostaje de 150 L de capacidad donde se inició el proceso con diferentes condiciones de humedad (45 – 60%) y relación C/N (13.9 – 19.6).				
Tratamiento óptimo:	Contenido de humedad de 60% y valor de relación C/N de 19.6	Calidad del compost final:	Compost estable	Duración del proceso en días:	12

ANEXO 20. Ficha resumen 11.

Título:	Composting of mixed yard and food wastes with effective microbes				
Autores:	Mat Saad, Nur Fatin.; Nadrah Ma'min, Nurqaidah.; Md Zain, Shahrom.; Ahmad Basri, Noor Ezlin.; Md Zaini, Najah Sofia.		Referencia:	[9]	
Año de publicación:	2013	Revista:	Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	Residuos de jardín + residuos de comida	Adiciones:	Microorganismos efectivos (ME) de residuos de fruta y ME Takakura
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje de residuos verdes y de comida con dos tipos de inóculos microbianos: ME de residuos de fruta y ME Takakura, a través de dos métodos diferentes: barriles de compostaje y tambor rotatorio.				
Tratamiento óptimo:	Tratamiento con inóculo de ME Takakura	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	49

ANEXO 21. Ficha resumen 12.

Título:	A novel composting process for plant wastes in Taiwan military barracks				
Autores:	Tai, Hua Shan.; He, Wei Hsiung.	Referencia:	[45]		
Año de publicación:	2007	Revista:	Resources, Conservation and Recycling		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Residuos de soya, Aserrín, Cáscaras de arroz, Compost maduro.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en hileras de residuos verdes compuestos por hojas (39%), flores (1%) y malezas (60%) con diferentes aditivos con el objetivo de acelerar el procedimiento.				
Tratamiento óptimo:	--	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	75

ANEXO 22. Ficha resumen 13.

Título:	Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality				
Autores:	Vandecasteele, Bart.; Boogaerts, Christophe.; Vandaele, Elke.			Referencia:	[20]
Año de publicación:	2016	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	--
Descripción de la metodología empleada:	Estudio de la diferencia en la calidad del compost final en el proceso de compostaje de residuos verdes en dos alternativas: (1) Compostar los residuos verdes + la biomasa leñosa y luego del proceso, tamizar y separar la biomasa del compost final, y (2) Tamizar la biomasa de la materia prima y compostar solamente los residuos verdes. Además, evaluó la influencia de las estaciones en la composición del GW y los efectos de diferentes frecuencias de volteo para dos métodos de compostaje: en pilas y en hileras.				
Tratamiento óptimo:	--	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	70

ANEXO 23. Ficha resumen 14.

Título:	Effect of inoculation with white-rot fungi and fungal consortium on the composting efficiency of municipal solid waste				
Autores:	Voběrková, Stanislava.; Vaverková, Magdalena D.; Burešová, Alena.; Adamcová, Dana.; Vršanská, Martina.; Kynický, Jindřich.; Brtnický, Martin.; Adam, Vojtěch	Referencia:	[59]		
Año de publicación:	2017	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	Industrial	Materia prima principal :	Hojas, residuos de jardín y residuos de comida (MSW).	Adiciones:	Phanerochaete chrysosporium, trametes versicolor, fomes fomentarius.
Descripción de la metodología empleada:	Se usaron tres tipos de hongos de podredumbre blanca y un consorcio fúngico en el compostaje de las fracciones orgánicas de residuos sólidos municipales (residuos de comida, desechos de jardín y hojas de árboles) para estudiar su influencia en las actividades enzimáticas y en la calidad del compost final.				
Tratamiento óptimo:	Tratamiento con adición de Phanerochaete chrysosporium	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	86

ANEXO 24. Ficha resumen 15.

Título:	Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang.; Tian, Yun.; Gong, Xiaoqiang.	Referencia:	[12]		
Año de publicación:	2013	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Azúcar morena, Superfosfato de calcio, Inóculo fúngico.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de azúcar morena y superfosfato de calcio durante la segunda etapa del procedimiento. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Azúcar morena (0.5%) + Superfosfato de calcio (6%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	30

ANEXO 25. Ficha resumen 16.

Título:	Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang		Referencia:	[24]	
Año de publicación:	2014	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, Compost de champiñones y biocarbono.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de compost de champiñones y biocarbono más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Compost de champiñones (35%) + Biocarbono (25%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	24

ANEXO 26. Ficha resumen 17.

Título:	Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang	Referencia:	[30]		
Año de publicación:	2014	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, ramnolípidos
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de ramnolípidos más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. Se evaluó el efecto de triturar los residuos verdes a diferentes tamaños (10, 15 y 25 mm). En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Ramnolípidos (0.15%) + tamaño de partícula de 15 mm	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	24

ANEXO 27. Ficha resumen 18.

Título:	Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang		Referencia:	[42]	
Año de publicación:	2015	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, lombrices de tierra, Zeolita.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de lombrices de tierra y zeolita más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Lombrices de tierra (0.3%) Zeolita (25%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	21

ANEXO 28. Ficha resumen 19.

Título:	Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang	Referencia:	[7]		
Año de publicación:	2016	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, bagazo de caña de azúcar, orujo de uva
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de bagazo de caña de azúcar y orujo de uva más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Bagazo de caña de azúcar (15%) + Orujo de uva (20%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	21

ANEXO 29. Ficha resumen 20.

Título:	Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang		Referencia:	[22]	
Año de publicación:	2016	Revista:	Waste Management		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, Virutas de madera, Compost de GW.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de materiales de soporte más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Virutas de madera (15%) + Compost de GW (35%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	22

ANEXO 30. Ficha resumen 21.

Título:	Addition of fish pond sediment and rock phosphate enhances the composting of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang			Referencia:	[23]
Año de publicación:	2017	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW	Adiciones:	Inóculo microbiano, Sedimentos de estanque de peces, Roca fosfórica.
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de xxx más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + Sedimentos de estanque de peces (25%) + Roca fosfórica (15%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	22

ANEXO 31. Ficha resumen 22.

Título:	Addition of seaweed and bentonite accelerates the two-stage composting of green waste				
Autores:	Zhang, Lu.; Sun, Xiangyang		Referencia:	[15]	
Año de publicación:	2017	Revista:	Bioresource Technology		
Escala del compostaje:	No reporta escala	Materia prima principal:	GW (100%)	Adiciones:	Inóculo microbiano, algas marinas, bentonita
Descripción de la metodología empleada:	Proceso de compostaje en dos etapas de residuos verdes con la adición de xxx más inóculo microbiano de dos especies de hongos de podredumbre blanca. En la primera etapa se utilizan reactores y en la segunda etapa compostaje en hileras.				
Tratamiento óptimo:	GW + algas marinas (35%) + bentonita (4.5%)	Calidad del compost final:	Compost maduro	Duración del proceso en días:	21