



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

DISEÑO DE TAMBOS ROTATORIOS  
PARA EL COMPOSTAJE DOMICILIARIO

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A:

RODRIGO CORONA GUAZO

DIRECTOR DE TESIS: DR. RICARDO MUSULE LAGUNES

MORELIA, MICHOACÁN

ENERO, 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA  
NACIONAL  
de ESTUDIOS  
SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

10  
años  
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA  
NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 08** del **Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **30 de octubre de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Rodrigo Corona Guazo** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **418126723**, con el trabajo titulado: **"Diseño de tambos rotatorios para el compostaje domiciliario"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Ricardo Musule Lagunes**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	Dra. Ana Isabel Moreno Calles
<b>Vocal:</b>	Dr. Pablo Jaramillo López
<b>Secretario:</b>	Dr. Ricardo Musule Lagunes
<b>Suplente:</b>	Mtra. Sandra Rocha Ortiz
<b>Suplente:</b>	Dr. Jesús Hernández Romano

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Morelia, Michoacán a 31 de enero de 2024.

**DRA. YUNUEN TAPIA TORRES**  
**SECRETARIA GENERAL**

---

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## Reconocimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Escuela Nacional de Estudios Superiores Morelia

A la Licenciatura en Ciencias Ambientales.

Al comité sinodal conformado por:

Presidente: Dra. Ana Isabel Moreno Calles

Secretario: Dr. Ricardo Musule Lagunes

Vocal: Dr. Pablo Jaramillo López

Suplente 1: Mtra. Sandra Rocha Ortíz

Suplente 2: Dr. Jesús Hernández Romano

## Agradecimientos

Al Instituto de Ecología A.C., a la Mtra. Sandra Rocha y a los compañeros del Laboratorio de Química de Suelos, Agua y Plantas su apoyo para el análisis fisicoquímico de muestras.

A la Universidad Politécnica del Estado de Morelos, al Dr. Jesús Hernández Romano y a los compañeros del Laboratorio de Suelo Agua y Plantas y la Unidad de Diagnóstico Especializado por su apoyo para el análisis microbiológico de las muestras.

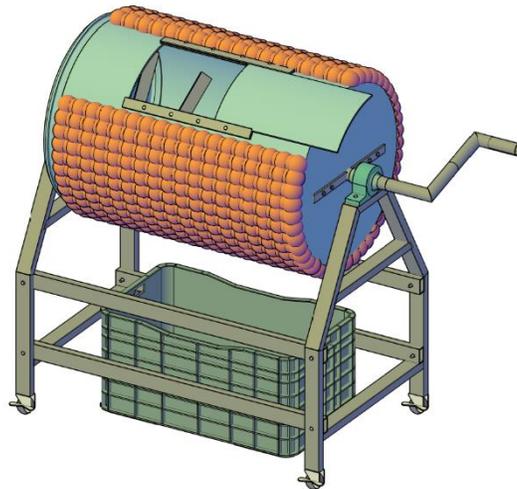
A Tierra de Urbe por la experiencia en compostaje adquirida a través del voluntariado.

A la Herrería Morales por su colaboración para la construcción del prototipo.

Al Dr. Ricardo Musule Lagunes por su paciente tutoría.

A los profesores y compañeros de la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la ENES Morelia.

A Alicia Guazo, a quien le debo todo el apoyo para poder haber realizado este proyecto de investigación.



CIENCIAS  
AMBIENTALES

*“Una propuesta para el compostaje urbano a escala local”*

*“A proposal for local urban composting”*

# Índice

Agradecimientos.....	iv
Índice .....	v
Índice de Figuras y Tablas.....	viii
Resumen .....	xi
Summary.....	xii
Introducción.....	1
Preguntas de Investigación.....	4
Objetivo general .....	5
Objetivos específicos.....	5
Supuesto .....	5
Capítulo 1. Marco Teórico.....	6
1.1 Compostaje .....	6
1.1.1 Compostaje a grande escala.....	7
1.1.2 Compostaje a pequeña escala .....	9
1.2 Técnicas de compostaje .....	11
1.2.2 Composteros, estáticos y semi dinámicos .....	14
1.3 Tambores rotatorios .....	18
1.3.1 Paletas .....	23
1.3.2 Tamaño y Aislamiento.....	23
1.4 Parámetros básicos de compostaje.....	24
1.4.1 Relación C:N y composición de la composta .....	24
1.4.2 Humedad, Porosidad, Tamaño de partícula y pre tratamientos. ....	27
1.4.3 Temperatura.....	28
1.4.4 Aireación y volteos .....	30
1.5 Estabilidad y Madurez de una composta y otras variables .....	32
1.5.1 Estabilidad .....	32
1.5.2 Madurez .....	33
1.5.3 Otras variables .....	34
Capítulo 2. Prototipado.....	36

2.1 Materiales y métodos .....	36
2.2 Cortes y perforaciones .....	39
2.2.1 Tramos estructura .....	39
2.3 Soldadura (Primera parte).....	43
2.3.1 Soporte y llantas .....	43
2.3.2 Tramos del eje y manivela.....	44
2.4 Ensamblado.....	45
2.4.1 Soporte completo .....	45
2.4.2 Ensamblado tambo-eje y puerta deslizable.....	46
2.5 Soldadura (Segunda parte).....	48
2.5.1 Sujetador tambo .....	48
2.5.2 Paleta individual (delgada) .....	49
2.5.3 Paleta individual (gruesa) .....	50
2.5.4 Paletas a eje (delgadas).....	50
2.5.5 Paletas a eje (gruesas).....	52
2.6 Aislamiento térmico, pintura, engrasado de rodamientos y ruedas, cajón de vaciado.....	53
Capítulo 3. Experimento de compostaje.....	54
3.1 Instalación.....	54
3.2 Acopio Comunitario .....	56
3.3 Composición del sustrato y relación C:N inicial .....	58
3.4 Manejo de experimentos.....	59
3.5 Registro de evolución de temperatura .....	60
3.6 Análisis en sitio.....	60
3.7 Análisis Microbiológico .....	61
3.7.1 Cultivo de muestras .....	61
3.8 Análisis Físicoquímico .....	62
3.8.1 Humedad y Materia orgánica.....	63
3.8.2 Densidad aparente y real, Porosidad, y Espacio de aire libre.....	64
3.8.3 pH y Conductividad eléctrica .....	64
3.8.4 Nitrógeno en forma de amonio y nitrato e Índice de nitrificación .....	65
3.8.5 Fósforo extraíble.....	66
3.8.6 Relación C:N .....	67

3.8.7 Micronutrientes .....	67
3.6 Análisis estadísticos y Programas utilizados .....	68
3.6.1 Análisis estadísticos .....	68
3.6.2 Programas utilizados.....	69
Capítulo 4. Resultados y discusión del experimento.....	70
4.1 Comportamiento de Temperatura .....	71
4.1.1 Evolución de temperatura diaria .....	71
4.1.2 Temperatura promedio y máxima.....	73
4.1.3 Número de días con temperaturas con temperaturas mayores a 45, 50 y 55 grados. ....	75
4.2 Análisis de la composta en sitio.....	77
4.2.1 Reducción de volumen y masa .....	77
4.2.2 Fraccionamiento de partículas .....	78
4.3 Análisis microbiológico.....	79
4.3.1 Detección de patógenos .....	79
4.3.2 Población de bacterias y hongos.....	83
4.4 Análisis fisicoquímico .....	84
4.4.1 Humedad final y Materia orgánica .....	85
4.4.2 Densidad aparente y real, Porosidad, y Espacio de aire libre.....	86
4.4.3 Relación C:N .....	87
4.4.3 Nitrógeno en forma de amonio y nitrato e Índice de nitrificación .....	88
4.4.4 pH y Conductividad eléctrica .....	89
4.4.5 Fósforo extraíble .....	91
4.4.6 Micronutrientes .....	92
4.5 Análisis estadísticos.....	94
Capítulo 5. Conclusión y Propuesta a futuro.....	97
5.1 Conclusión .....	97
5.2 Propuesta a futuro .....	100
Bibliografía.....	101
Apéndices .....	106
Apéndice 1. Características de tambos rotatorios utilizados en diferentes estudios. .....	106
Apéndice 2. Composiciones de composta utilizadas en diferentes estudios. ....	107

# Índice de Figuras y Tablas

## Figuras

**Figura 1.** Fases del proceso de compostaje

**Figura 2.** Izquierda: Fotografía de la planta de composta Bordo Poniente en la Ciudad de México. Derecha: Fotografía de composta de residuos de jardín de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

**Figura 3.** Fotografías del proyecto de composta comunitaria “Tierra de Urbe” en Cuernavaca

**Figura 4.** Esquema de técnicas de compostaje.

**Figura 5.** Diferentes técnicas de compostaje estático en piso.

**Figura 6.** Fotografía de una composta de residuos de comida y de jardín en hileras triangulares. Tomadas durante un proyecto de capacitación en el parque acuático Ex Hacienda de Temixco, en Morelos

**Figura 7.** Compostero en forma de tambo vertical perforado.

**Figura 8.** Compostero estático de 300 litros

**Figura 9.** Composteros estáticos de 420 y 700 litros

**Figura 10.** Composteros trapezoidales de 340 y 1050 litros

**Figura 10.** Composteros trapezoidales de 340 litros

**Figura 12.** Composteros en forma de tambos verticales de 200 litros con diferentes formas de aireación.

**Figura 13.** Compostero de volumen extendido de 350 litros.

**Figura 14.** Compostero de tambo vertical con tubo de aireación central

**Figura 15.** Compostero de tambo vertical, con filtro, y movilidad

**Figura 16.** Tambos rotatorios auto fabricados y reciclados de acero con capacidad de 200 litros y rotación sobre rodamientos

**Figura 17.** Tambo rotatorio de doble cámara de plástico de 150 litros

**Figura 18.** Tambo rotatorio de doble cámara de 360 litros en acero inoxidable

**Figura 19.** Tambo rotatorio vertical hexagonal de plástico de 600 litros con mezclado utilizando un espiral sin fin

**Figuras 20.** Tambo rotatorio horizontal de 200l con rotación sobre ruedas de nylon

**Figura 21.** Tambo rotatorio horizontal con soporte y rotación sobre dos rodamientos

**Figura 22.** Tambo rotatorio vertical con mezclado utilizando paletas imitando un espiral sin fin

**Figura 23.** Tambo rotatorio horizontal aislado con aireación a través de tubo interior

**Figura 24.** Tambo rotatorio de 750 litros con rodamiento sobre llantas

**Figura 25.** Tambo rotatorio automatizado de 1’500 litros con rotación a través de un espiral sin fin y con un sistema de descarga por medio de un pistón

**Figura 26.** Tasa carbono nitrógeno de materia fresca, leñosa, y rangos aceptable e ideal para una composta.

**Figura 27.** Evolución de temperatura de una composta

**Figura 28.** Metodología de trabajo: Diseño por computadora y construcción colaborativa en taller.

**Figura 29.** Fotografías de construcción colaborativa en el taller de herrería

**Figura 30.** Tamaño y ángulos de corte de tramos A, B, C, D, E y F para la construcción del soporte en Vista lateral, frontal, superior y acercamientos

- Figura 31.** Tamaño de corte y perforaciones de tramos para sujeción tambo, puerta y paletas: Vista frontal y superior en acercamiento
- Figura 32.** Tamaño y ángulos de corte para eje y manivela: Vista lateral y vista superior en acercamiento.
- Figura 33.** Soldado de tramos A, B, C, D y E de la estructura y llantas. Vista lateral
- Figura 34.** Soldadura de tramos M, K y L que comprenden el eje y manivela. Vista frontal
- Figura 35.** Soporte completo ensamblado con el tramo F atornillado a cada soporte. Vistas lateral, frontal y tridimensional
- Figura 36.** Ensamblado tambo-eje (tramos M, K y L) y puerta deslizable (tramos I), vista frontal
- Figura 37.** Ensamblado del tambo-eje y puerta deslizable: Vista lateral, corte en acercamiento y vista tridimensional
- Figura 38.** Soldado de sujetador de tambo. Arriba: Vista lateral y en corte en acercamiento Abajo: Vista tridimensional.
- Figura 39.** Soldado de paleta individual delgada. Izquierda: Vista superior, lateral y frontal y en acercamiento. Derecha: Vista tridimensional
- Figura 40.** Soldado de paleta individual gruesa. Izquierda: Vista superior, lateral y frontal y en acercamiento. Derecha: Vista tridimensional
- Figura 41.** Soldado de paletas delgadas a eje. Arriba: Corte lateral y acercamiento del soldado de primera paleta. Centro: Corte lateral y vista frontal del juego de paletas completo. Abajo: Vista tridimensional
- Figura 42.** Soldado de paletas gruesas a eje. Arriba: Vista en corte lateral y acercamiento del soldado de primera paleta. Centro: Vista en corte lateral y vista frontal del juego de paletas completo. Abajo: Vista tridimensional
- Figura 43.** Tambo rotatorio final con aislamiento térmico
- Figura 44.** Composteros utilizados en la evaluación del ensayo
- Figura 45.** Fotografías durante el ensayo: Secado y triturado de hojas secas (material leñoso). Acopio y triturado de residuos de cocina (material fresco)
- Figura 46.** Vista tridimensional y superior de la instalación del ensayo (diseño)
- Figura 47.** Fotografías de la instalación del ensayo
- Figura 48.** Vaciado de composteros, análisis en sitio, y en laboratorio.
- Figura 49.** Temperatura (eje vertical) por día de ejecución (eje horizontal) en cada compostero y temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio. Líneas magenta, naranja y amarilla indican 55, 50 y 45 grados respectivamente
- Figura 50.** Temperatura máxima y promedio (eje horizontal) por temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio y compostero (color)
- Figura 51.** Cantidad de días con temperatura mayor a más de a 45°C, 50°C y 55°C (eje horizontal) por temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio y compostero (color)
- Figura 52.** Porcentaje de reducción de masa y volumen por compostero
- Figura 53.** Fraccionamiento de partículas por compostero
- Figura 54.** Fotografías de cultivos en medio ENDO y dilución
- Figura 55.** Fotografías de cultivos en medio VB y dilución
- Figura 56.** UFC de bacterias (arriba) y hongos (abajo) por gramo (eje horizontal) según medio de cultivo (color), y compostero (eje vertical)
- Figura 57.** Porcentaje de Materia Orgánica (arriba) y Humedad Final (abajo) por tratamiento.
- Figura 58.** Densidad aparente y real en gramos por centímetro cúbico (superior), porosidad y espacio de aire libre en porcentaje (inferior) por compostero
- Figura 59.** Relación C:N (eje vertical) por compostero.
- Figura 60.** Nitrógeno en forma de amonio (izquierda) y en forma de nitrato (centro) e índice de Nitrificación (derecha) por compostero
- Figura 61.** pH (izquierda) y conductividad eléctrica (derecha) en eje vertical por tratamiento.
- Figura 62.** Fósforo extraíble en ppm (eje vertical) por tratamiento (color)
- Figura 63.** Micronutrientes en ppm (eje horizontal) por nutriente y tratamiento. (eje vertical y color)

**Figura 64.** Análisis de Componentes Principales, variables observadas (comportamiento de temperatura, reducción de volumen y masa, y parámetros fisicoquímicos) y tendencias

**Figura 65.** Matriz de correlación entre variables de comportamiento de temperatura, reducción de volumen y masa, y parámetros fisicoquímicos

**Figura 66.** Huerto casero abonado con composta producida: Calabaza, Pepino y Papas.

**Figura 67.** Borrador de diseño de propuesta de compostero futuro

## Tablas

**Tabla 1.** Escalas de reactor según los parámetros de Volumen de contenedor ( $V$ ) y relación Área superficial/Volumen ( $A_s/V$ )

**Tabla 2.** Relación C:N de diferentes materiales para compostaje reportados en la literatura

**Tabla 3.** Días en temperatura termófila alcanzados reportados en la literatura

**Tabla 4.** Clases de estabilidad de la prueba de autocalentamiento de Dewar

**Tabla 5.** Reducción porcentual de masa y volumen alcanzado en algunos ensayos de compostaje.

**Tabla 6.** Materiales, características, costos, cantidades y costo total en pesos mexicanos.

**Tabla 7.** Cantidad de tramos de PTR

**Tabla 8.** Cantidad de tramos de SOLERA, ÁNGULO y VARILLA requeridas para la construcción del prototipo

**Tabla 9.** Características de cada compostero utilizado en el ensayo

**Tabla 10.** Concentración de UFC de colonias verde metálico (probable *E. coli*) en el medio ENDO en las muestras de cada compostero

## Resumen

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos suele componer alrededor del 50% de éstos. En México se producen diariamente alrededor de 39 mil toneladas, de las cuales, apenas 5 mil son desviadas a grandes centros de compostaje para ser tratadas, lo que deja una gran cantidad de residuos con la oportunidad de ser aprovechados a través del compostaje doméstico y comunitario.

De manera particular, una técnica de compostaje adecuada para entornos domésticos es a través del uso de composteros rotatorios. En este trabajo se elaboró un marco teórico sobre compostaje, composteros y tambos rotatorios. Con base en las propuestas de diversos autores y diseño asistido por computadora (CAD), se prototipó de manera colaborativa un tambor rotatorio. Se fabricaron réplicas del prototipó para evaluar dos principales características de diseño: tipo de paletas de mezclado (gruesas o delgadas), y aislamiento (presencia o ausencia) mediante un ensayo experimental, utilizando como línea base un compostero disponible comercialmente. Se registró la evolución de temperatura y al finalizar el compostaje se analizó en sitio la pérdida de masa, volumen y el fraccionamiento de partículas. En laboratorio, se realizaron cultivos microbiológicos para estimar la concentración de patógenos y unidades formadoras de colonias (UFC) de bacterias y hongos, y, análisis fisicoquímicos para determinar humedad, materia orgánica, densidad real y aparente, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno en forma de amoníaco y nitrato, relación C:N, fósforo extraíble y micronutrientes. Con los datos obtenidos, se realizó estadística descriptiva e inferencial de los tratamientos. El proceso de compostaje en los composteros con aislamiento mostró en promedio temperaturas mayores en comparación con el control

(46°C y 39°C para cada uno) lo que incidió en una menor concentración de UFC de coliformes ( $250 \times 10^6$ ) así como un menor índice de nitrificación ( $<0.1$  y  $>0.4$ ).

*Palabras Clave:* compostaje, tambores rotatorios, ecotecnología, agroecología

## Summary

The organic fraction of urban solid waste usually makes up 50% of it. Mexico generates daily around 39 thousand metric tons, of which barely 5 thousand are diverted to composting facilities for treatment, which leaves a great quantity of organic waste with the opportunity to be treated through home and community composting.

Particularly, a composting technique adequate for domestic environments is through rotating drums. In this study a framework on composting, composters and rotating drums was elaborated. Based on the proposals of diverse authors and with the help of computer assisted design, a rotating drum was prototyped through collaborative work. Replicas of the prototype were built to evaluate two design features: mixing tools type (wide or slim), and insulation (with or without) through an experimental setup, using a commercial composter as baseline. Temperature evolution was recorded, and, at the end of the composting process, mass and volume reduction, and particle fractioning were evaluated on site. At the laboratory, microbiological cultures were used to estimate pathogen concentrations and bacterial and fungal colony forming units (CFU), and, physicochemical analysis, to determine moisture, organic matter, apparent and real density, pH, electrical conductivity, nitrogen as ammonia and nitrate, C:N ratio, extractable phosphorous and micronutrients. The obtained data was used to generate descriptive and inferential statistics on each of the treatments. Composting process in insulated composters showed higher average temperature in comparison with the

control composter (46°C and 39°C in each one) which influenced lower coliform CFU concentration ( $250$  and  $10^6$ ) and a lower nitrification index ( $<0.1$  and  $>0.4$ ).

*Keywords:* composting, rotating drums, eco-technology, agroecology

## Introducción

Residuos sólidos.

La generación mundial de residuos sólidos urbanos (RSU) alcanzó aproximadamente 1.3 mil millones de toneladas diarias en 2010 y se estima que alcanzará 2.2 mil millones para el 2025 (SEMARNAT, 2018). La generación de residuos en México se estima en 120 mil toneladas por día con una fracción orgánica de alrededor de 41.6% (SEMARNAT, 2020).

Según la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, alrededor 39 mil toneladas diarias de residuos orgánicos podrían ser tratados en su totalidad o cuando menos en un 70% (hasta 27 mil toneladas diarias) en condiciones de separación en fuente, y ésta reconoce que:

*“Actualmente son pocas las plantas de compostaje y tratamiento de residuos orgánicos en el país tanto públicas como privadas. Por lo anterior, se considera importante promover el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y Residuos de Manejo Especial a nivel municipal, estatal y regional, en esquemas tanto públicos como privados”*

En 2017 se desviaban alrededor de dos mil toneladas diarias de residuos orgánicos hacia plantas de compostaje (CCA, 2017) y para 2020, según el DBGIR esta cantidad aumento a alrededor de cinco mil toneladas (SEMARNAT, 2020) de las cuales poco más de mil toneladas corresponden solamente a la planta de compostaje del Bordo Poniente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2019).

Esto representa un déficit de alrededor de hasta 34 mil toneladas diarias llevadas a tiraderos a cielo abierto o rellenos sanitarios, sin tomar en cuenta el impacto del compostaje a pequeña escala que se realiza de manera extraoficial.

### Compostaje

El compostaje es una técnica para el manejo y aprovechamiento de residuos orgánicos. “Su origen se sitúa junto con el surgimiento de la agricultura y ha permanecido en las prácticas agrícolas campesinas tradicionales de todo el mundo. La forma más tradicional y antigua de realizar composta es en pequeñas pilas al aire libre, que probablemente tiene su origen desde la época prehistórica en la que el hombre acumulaba todos sus residuos en montones” (Storino, 2016).

Se puede compostar casi todo tipo de materia orgánica ya que contiene energía y nutrientes embebidos aprovechables por los organismos. Los jardineros suelen aprovechar los residuos de jardín para hacer composta, y en el campo es muy común el uso de estiércol, gallinaza y otros residuos animales para hacer composta. También se produce composta con todo tipo de residuos agroindustriales como bagazo, aceites residuales y pulpas. Incluso se pueden compostar cadáveres animales y excreta humana, prácticas de las cuales se tienen evidencias de hasta 5,000 años de antigüedad. (Ashley et al., 2011)

El compostaje a pequeña escala, local, descentralizado, autocompostaje, o compostaje doméstico y comunitario es aquel que tiene como objetivo tratar los residuos en el sitio mismo de generación (Storino, 2016; Bhave y Joshi, 2017). La percepción sobre este tipo de compostaje ha cambiado en los últimos años, pasando de ser considerada una

actividad para aficionados a existir un gran número de publicaciones y evidencias científicas que repuntaron en 2020, coincidiendo con la necesidad de autosuficiencia (Sánchez, 2022).

El compostaje a pequeña escala contribuye con las estrategias de manejo integral de los residuos sólidos, disminuye la presión sobre los camiones recolectores y los rellenos sanitarios, y desemboca en una reducción de costos y de emisiones de gases de efecto invernadero debido al transporte y manejo de residuos (Bhave y Joshi, 2017).

Tambos o tambores rotatorios.

Una alternativa al compostaje directo en piso es el uso de contenedores o composteros, que pueden ser de diferentes tamaños, formas y materiales, y se pueden comprar o fabricar reutilizando materiales fáciles de conseguir. Los tambores rotatorios, giratorios o dinámicos son una forma de compostero que facilita el manejo de una composta, disminuyen la cantidad de espacio y energía dedicada al compostaje y mantienen la composta en un ambiente aislado (Bhave y Joshi, 2017).

En la literatura científica se menciona que “se requiere más investigación relacionada con el desarrollo de sistemas más eficientes de compostaje a nivel doméstico, así como con el empleo de tambos rotatorios” (Storino et al., 2016) y destacan la importancia de “diseñar tambos rotatorios para el manejo de residuos orgánicos a nivel doméstico”. (Lunag et al., 2021)

Una característica de diseño importante reportado en la literatura es contar con paletas internas para favorecer el mezclado, aireación y homogenización de la composta (Bhave y Joshi, 2017). Estos autores proponen el uso de paletas gruesas soldadas a un eje central de rotación, a manera de imitar un espiral sin fin. El mezclado de la composta con paletas ayuda

a asegurar la aireación de esta para favorecer un proceso adecuado de descomposición y evitar la liberación de olores desagradables.

Otra característica de diseño es el uso de aislante térmico (Alkolaik et al., 2019), y un material que ha sido reportado como aislante efectivo es la espuma de poliuretano (Espinosa Salgado et al., 2020). El aislamiento ayuda a reducir la pérdida de calor y favorecer la elevación de temperatura para así lograr evitar la proliferación de plagas y asegurar la destrucción de organismos patógenos.

### Propuesta de diseño y evaluación

En este trabajo se diseñaron diferentes prototipos de tambos rotatorios y como base para el diseño se utilizó un tambo reciclado de PEAD (polietileno de alta densidad) de 200 litros. La estructura y las demás características se realizaron en acero, y se consideraron dos características diferentes de diseño a ser evaluados: I) sistemas de paletas en espiral sin fin (dos propuestas: paletas delgadas y paletas gruesas), así como II) el aislamiento térmico (dos propuestas: aislamiento térmico con poliuretano y sin aislar).

## Preguntas de Investigación

- ¿Qué se sabe acerca del compostaje, el uso de composteros y en específico de tambores rotatorios?
- ¿Qué factores de diseño de un tambo rotatorio para uso doméstico pueden optimizar el compostaje?
- ¿Cómo inciden, en el funcionamiento de un tambor rotatorio, los factores de diseño de paletas de mezclado y uso de aislante en el comportamiento de temperatura y la calidad final microbiológica y fisicoquímica de una composta?

## Objetivo general

- Optimizar el diseño de un tambo rotatorio para uso doméstico y comunitario

## Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte sobre compostaje, composteros, tambos rotatorios y parámetros básicos del compostaje.
- Diseñar un compostero de tambo rotatorio y prototiparlo.
- Evaluar dos factores de diseño: (1) sistema de paletas de mezclado y (2) uso de aislante térmico, tomando como línea base un compostero comercial.
- Evaluar parámetros de temperatura, microbiológicos y fisicoquímicos de la composta producida.

## Supuesto

El uso de aislante térmico mejorará el proceso de compostaje ayudando a mantener temperaturas más elevadas en un período mayor de tiempo lo que incidirá en una mayor reducción de patógenos y mejores índices de madurez.

El uso de paletas gruesas ayudará a una mejor homogenización y desintegración de la composta que mejorará los índices de madurez de la composta obtenida.

# Capítulo 1. Marco Teórico

## 1.1 Compostaje

El compostaje se define como el proceso biológico utilizado para convertir residuos orgánicos a un material húmico estable (Tchobanoglous et al., 1998). También como la descomposición controlada del proceso natural de degradación de la materia orgánica (Cooperband, 2002). Se asemeja a una sucesión ecológica en la que organismos son paulatinamente reemplazados por otros hasta el agotamiento de los nutrientes (Rodríguez y Córdoba, 2006).

El proceso de compostaje sucede de la siguiente manera: primero, microflora heterotrófica metaboliza compuestos simples de carbono (Figura 1), y esta actividad incrementa la temperatura (fase activa) lo que da un efecto selectivo hacia organismos termofílicos aeróbicos esporígenos (principalmente hongos y actinomicetos o actinobacteria), una vez que desciende la temperatura y humedad (fase de maduración), se favorece la presencia de hongos que logran degradar los compuestos más recalcitrantes (Bertoldi, 1983).

Bernal et al. (1997) también describe estas dos fases como de mineralización de carbono rápida y lenta, ya que la primera puede durar unos cuantos días, mientras que la segunda, que tiene que ver con compuestos como celulosa y lignina, suele durar varias semanas o inclusive meses. Investigaciones recientes con secuenciación genética reportan que hay mucho mayor diversidad biológica en la fase de maduración que durante la fase de alta temperatura (Wang et al., 2017).



**Figura 1.** Fases del proceso de compostaje. Elaborado con información de Bertoldi (1983) y Bernal et al. (1997)

El resultado del proceso de compostaje es la mineralización de materia orgánica en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y compuestos húmicos que resultan en un producto estabilizado y con menor cantidad de patógenos (Das et al., 2011).

### 1.1.1 Compostaje a grande escala

El compostaje a gran escala, industrial, o de planta, es aquel que se realiza en grandes pilas (Figura 2), como las de la composta del Bordo Poniente de la Ciudad de México, y que llegan a tener un tamaño aproximado de 200 metros de largo, 40 metros de ancho y 5 metros

de alto. Para su preparación y manejo se hace uso de camiones y retroexcavadoras, y, además, en algunas plantas de composta, cuentan con otra maquinaria que ayuda a facilitar el proceso, como trituradoras, astilladoras y tamizadores o trómel (tamiz en forma de tambo rotatorio). (Sánchez Velasco et al., 2016). También existen sitios donde el compostaje se automatiza dentro de grandes contenedores, como sucede en las plantas de tratamiento mecánico-biológico donde se suelen utilizar tambores rotatorios de gran tamaño. Los diámetros típicos de estos son de dos a cinco metros de largo (Schneider et al. 2020). Estas plantas pueden tener una capacidad de procesamiento de hasta 100 toneladas de residuos orgánicos por día (Aboulam, 2006).

Como desventaja, en el compostaje a gran escala, desde la recolección de los residuos hasta el manejo de la composta se hace uso intensivo de energía fósil, además de que existe el reto de lograr la separación adecuada de los residuos.



**Figura 2.** Izquierda: Fotografías de la planta de composta Bordo Poniente en la Ciudad de México. Tomado de Sánchez Velasco *et al.* (2016). Derecha: Fotografía tomada en la composta de residuos de jardín de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos

### 1.1.2 Compostaje a pequeña escala

El compostaje a pequeña escala, local, doméstico, descentralizado, o, casero y comunitario es aquel compostaje que se realiza en el sitio mismo donde se generan los residuos. Es una manera de involucrar a los generadores como actores clave para el tratamiento integral de los residuos y es una de las actividades más ambientalmente benéficas que se pueden realizar en un domicilio (Karnchanawong, 2011). El compostaje comunitario (Figura 3) tiene, además, la característica de que se realiza por diferentes usuarios (domésticos y/o comerciales) que llevan sus restos orgánicos a instalaciones compartidas de compostaje. En la década de los setenta, a la par con los movimientos sociales, culturales y ecologistas, surgieron iniciativas de compostaje a nivel casero y comunitario sin la existencia de alguna coordinación centralizada, que para las décadas de los ochenta y noventa surgen como proyectos coordinados en cooperación y con el reconocimiento de agencias gubernamentales como una alternativa viable (Storino, 2017).

El compostaje doméstico tiene un efecto sobre la reducción de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  y por lo tanto menor huella de carbono que el compostaje a gran a escala (Gallardo et al., 2017)



**Figura 3.** Fotografías del proyecto de composta comunitaria “Tierra de Urbe” en Cuernavaca

Al separar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en la fuente también se tiene como ventaja reducir drásticamente la posibilidad de contaminación de la composta. Por ejemplo, el estudio de Vázquez y Soto (2020) mostró una presencia de 1% de materiales inapropiados en residuos orgánicos colectados en la fuente de generación, en comparación, en plantas de separación mecánica se llega a encontrar hasta un 38.8% de materiales inapropiados en los residuos orgánicos (Amlinger et al., 2004).

Sin embargo, el compostaje a pequeña escala sucede de manera muy diferente que el compostaje a gran escala donde las pilas se preparan una sola vez. Las fases de temperatura y los cambios en las propiedades de la composta se distribuyen de manera más repartida en el tiempo debido al agregado constante de material fresco (Illmer y Schinner, 1997; Arrigoni et al., 2018). Además, debido al tamaño de las pilas, es difícil alcanzar temperaturas elevadas.

La elevación de la temperatura es clave para el proceso de compostaje y debido a que con volúmenes pequeños es difícil alcanzar temperaturas elevadas muchas veces se recomienda evitar el uso de productos de origen animal en compostas domésticas para evitar la proliferación de plagas (FAO, 2013). Sin embargo, estudios más recientes (Storino, 2016) demuestran que el uso de productos de origen animal en compostas domésticas es precisamente el factor que ayuda a elevar la temperatura de la composta y por lo tanto asegurar su descomposición y desinfección adecuada. Con un manejo adecuado, a nivel doméstico se pueden obtener compostas libres de organismos patógenos y de calidad no muy diferente de la composta a gran escala (Barrena et al., 2014).

## 1.2 Técnicas de compostaje

El compostaje sucede a altas temperaturas y mediante la degradación microbiana y fúngica y se liberan grandes cantidades de calor. No se debe confundir con *vermicompostaje* o *lombricompostaje*, que es una variante de compostaje en la que se utilizan lombrices, y, aunque no es adecuada para todo tipo de residuos, es un excelente complemento para la maduración de composta estabilizada (Adhikary, 2012).

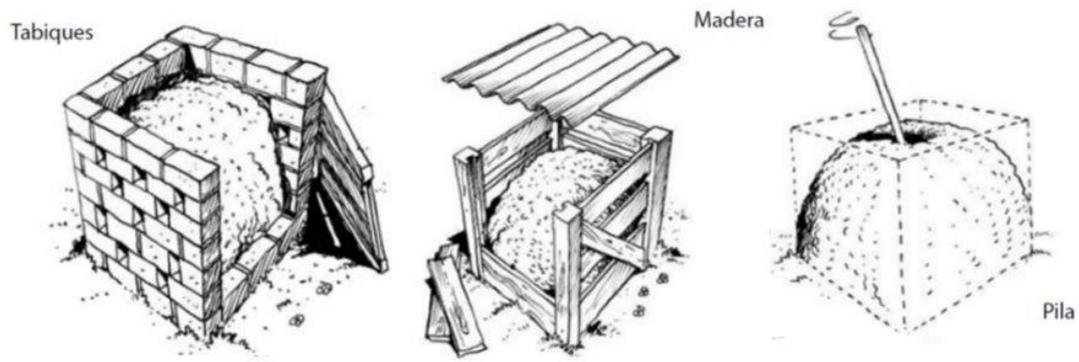
Eberhard (1998) clasificó las técnicas de compostaje de manera general por la presencia o no de un reactor, contenedor o compostero y en cada una sub-clasifica según su movimiento: estático cuando la composta permanece en el mismo sitio durante todo el proceso de compostaje hasta que es removida, o semi-dinámico cuando la composta es removida de manera periódica, y considera los tambores giratorios como la única técnica dinámica ya que reciben movimiento de manera constante (Figura 4). Zubrugg (2014) clasifica además según el tipo de aireación que reciben, forzada si se utiliza energía para ingresar el aire, y pasiva si sucede mediante perforaciones o tubería que se ingresa a la composta mediante las cuales puede circular aire.



**Figura 4.** Esquema de técnicas de compostaje. Adaptación de la información de Gruneklee (1998) y Zurbrügg (2014)

### 1.2.1 Compostaje en el suelo

Las técnicas en piso suelen ser estáticas, y pueden estar bardeadas por tabiques, tarimas, mallas o estar simplemente apiladas en el suelo (Figura 5), cubiertas a veces con lonas o plástico para evitar la deshidratación, inundación o infestación de plagas, y la aireación puede suceder de manera pasiva al estar contenidos en agentes estructurantes porosos o estar bardeadas por paredes abiertas por donde puede circular el aire, o, por medio de tubos perforados (Zubrugg, 2014).



**Figura 5.** Diferentes técnicas de compostaje en piso. Tomado de Rodríguez y Córdoba (2006)

Cuando hay suficiente espacio disponible es muy común el uso de técnicas semi dinámicas, como hileras, que reciben periódicamente “volteos” con un bieldo o pala (o maquinaria) y consisten en remezclar o reconstruir por completo la hilera o pila, proveyendo aireación, homogenizando la mezcla, y desintegrando el material por fricción (Figura 6). A veces se suelen hacer “camas” de ramas y hojas para colocar los materiales a compostar encima o estar la composta completamente o semi enterrada en el suelo. Estas técnicas requieren el uso de una porción de terreno por lo que suelen ser poco adecuadas para los contextos urbanos (Zubrügg, 2014).



**Figura 6.** Fotografía de una composta de residuos de comida y de jardín en hileras. Tomadas durante un proyecto de capacitación en el parque acuático Ex Hacienda de Temixco, en Morelos

### 1.2.2 Composteros, estáticos y semi dinámicos

El sistema de autocompostaje más común después del compostaje en pilas se basa en el uso de composteros estáticos (Smith y Jasim, 2009; Storino, 2016; Arrigoni et al., 2018). Los composteros disminuyen la cantidad de espacio requerido para el compostaje y mantienen la composta en un ambiente aislado. En los composteros la aireación puede suceder de manera pasiva al circular aire por orificios perforados en la superficie del compostero o bien, de manera activa agitando el material dentro. Se consideran composteros semi dinámicos si el material se va ingresando y vaciando al tiempo que se procesa, y pueden estar orientados de manera horizontal (túnel) o vertical (torre) (Eberhard, 1998).

Se suelen construir composteros caseros con cajas, tambos o cubetas a los que se les realizan perforaciones para facilitar la aireación (Figura 7).

Algunos composteros estáticos suelen requerir espacio en un jardín o terreno para tener contacto directo con el suelo (Figuras 8 y 9). Vázquez et al. (2020) y Storino et al. (2016) utilizan en sus estudios este tipo de composteros trapezoidales (Figuras 10 y 11).

Sin embargo, también existen propuestas de composteros diseñados para contextos urbanos sin espacio para colocar la composta directo en el piso. Por ejemplo, Kanchanawong y Suriyanon (2011) proponen tambos verticales con distintos diseños de aireación (Figura 12), utilizando combinaciones de ventanas con rejillas de 10 cm en las paredes del tambo y tubería rígida y flexible perforada en el interior. Arrigoni et al. (2015) utilizan dos tipos de composteros estáticos: de volumen extendido, elevado y hecho de lámina, y un tambo vertical con un tubo perforada central de aireación (Figuras 13 y 14). Lunag et al. (2021) realizaron un diagnóstico sobre preferencias sobre el tamaño y características de un tambo compostero y propusieron un diseño de tambo vertical con capacidad de 100 kg y movilidad a 4 ruedas (Figura 15).



**Figura 7.** Compostero en forma de tambo vertical perforado. (Rodríguez y Córdoba, 2006)



**Figura 8.** Compostero estático de 300 litros Costo \$1'000 pesos mexicanos, revisado en 2023 (Tomado de Mercadolibre.com)



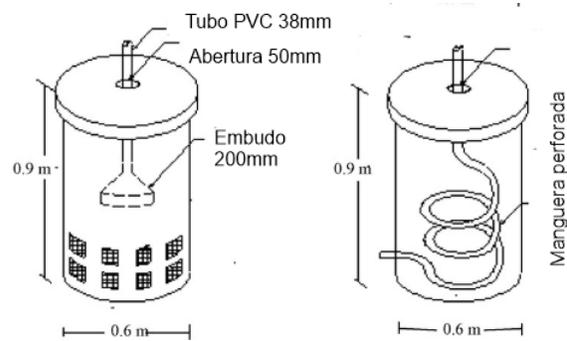
**Figura 9.** Composteros estáticos de 420 y 700 litros Costos \$3'200 y \$3'000 pesos mexicanos, revisado en 2023 (Tomado de Amazon.com)



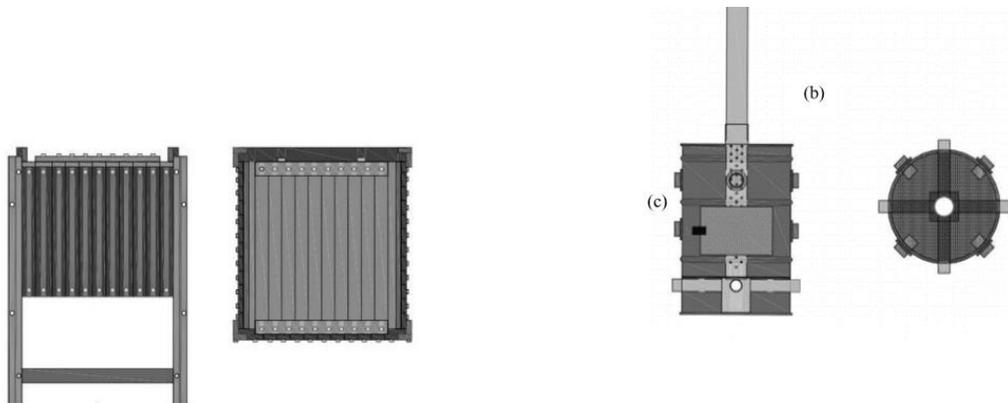
**Figura 10.** Composteros trapezoidales de 340 y 1050 litros. Tomado de Vázquez et al. (2020)



**Figura 11.** Composteros trapezoidales de 340 litros. Tomado de Storino et al. (2016)



**Figura 12.** Composteros en forma de tambo verticales de 200 litros con diferentes formas de aireación. Modificado, traducido y tomado de: Karnchanawong y Suriyanon (2011)



**Figura 13.** Compostero de volumen extendido de 350 litros. Tomado de Arrigoni et al. (2015)

**Figura 14.** Compostero de tambo vertical con tubo de aireación central. Tomado de Arigoni et al. (2015)



**Figura 15.** Compostero de tambo vertical, con filtro, y movilidad. Modificado, traducido y tomado de Lunag et al. (2021)

### 1.3 Tambores rotatorios

Los tambores o tambos rotatorios, giratorios, o rotativos son una forma de compostero que utiliza contenedores generalmente cilíndricos y voltean o remezclan la composta mediante movimiento circular. En comparación a otras técnicas a pequeña escala, el uso de estos es de mayor comodidad para los usuarios domésticos ya que facilitan el mezclado y aireación constante de la composta (Bhave y Joshi, 2017). Sin embargo, a pesar de ser uno de los sistemas más usados para el tratamiento de residuos orgánicos, la investigación respecto a las condiciones óptimas de operación es escasa (Schneider et al., 2020).

Estos pueden ser construidos con material reciclado, como los que se encuentran en el Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ciudad Universitaria) (Figura 16), y también existen composteros ensamblables que se pueden conseguir comercialmente (Figuras 17 y 18).

Algunos autores proponen diseños más sofisticados, por ejemplo, Illmer y Schinner (1997) diseñaron tambos poliédricos de polietileno reciclado con un sistema de mezclado en espiral anidado en un eje de rotación vertical (Figura 19). Kalahmdad y Kazmi (2009) utilizan tambos horizontales sin eje que reposan sobre llantas que los hacen girar (Figura 20). Arrigoni (2015) propone un tambo cilíndrico horizontal con la tapa y base de rejilla para permitir la aireación (Figura 21). Bhave y Joshi (2017) diseñaron tambos verticales con rotación en el eje vertical con paletas gruesas en forma de espiral (Fig. 22). Alkolaik et al. (2019) utilizaron un tambor de acero de 200 litros con aireación y giro en el eje horizontal, con aislamiento térmico de espuma de vidrio (Figura 23). Aboulam (2006) y Vázquez et al. (2020) utilizaron tambos de mayor escala, de 1,500 y 750 litros respectivamente (Figuras 24 y 25). En el primero se utilizó un sistema de rotación sin eje, montado sobre dos pares de

ruedas fijas, en el segundo se utilizó un sistema mecanizado de mezclado interno por la acción de un espiral sin fin. Los detalles de los diseños propuestos antes mencionados encontrados en la literatura revisada se resumen en el Apéndice 1.



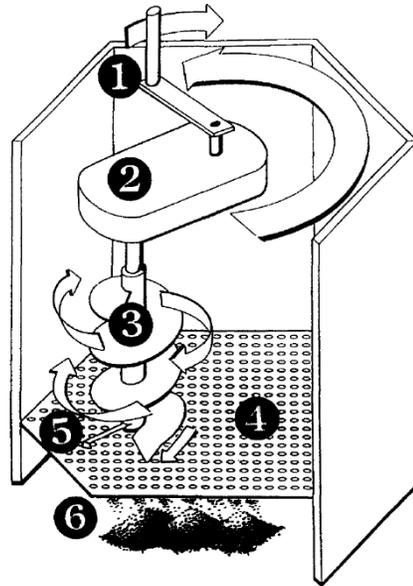
**Figura 16.** Tambos rotatorios auto fabricados y reciclados de acero con capacidad de 200 litros y rotación sobre cumaceras. Fotografía tomada en el Jardín etnobotánico de la UNAM (Ciudad Universitaria)



**Figura 17.** Tambor rotatorio de doble cámara de plástico de 150 litros. (Costo \$3'800 pesos mexicanos, tomado en 2023) Tomado de Amazon.com

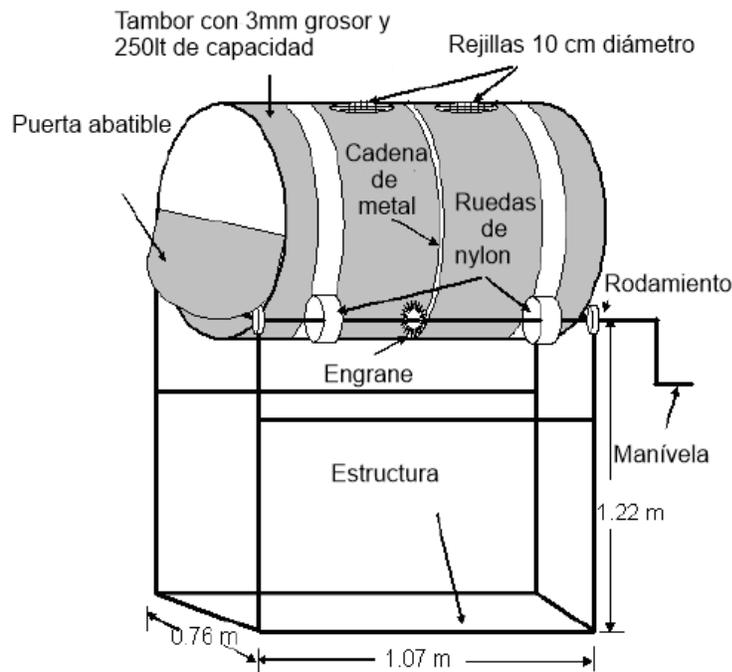


**Figura 18.** Tambor rotatorio de doble cámara de 360 litros en acero inoxidable. (Costo \$19'000 pesos mexicanos, tomado en 2023) Tomado de Mercadolibre.com

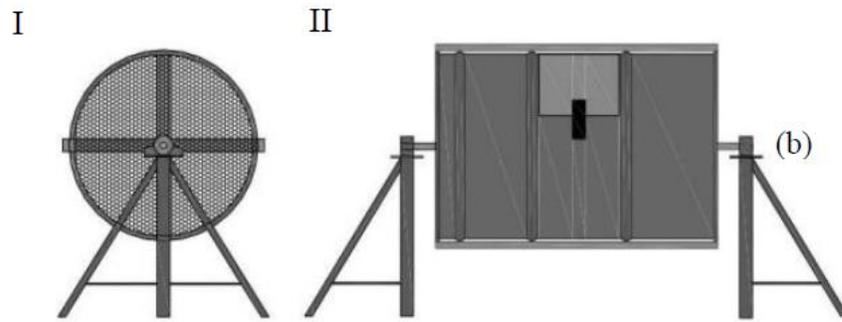


1. Manívela
2. Mecanismo de la manívela
3. Espiral Mezclador
4. Placa de tamizado
5. Raspador
6. Cámara inferior

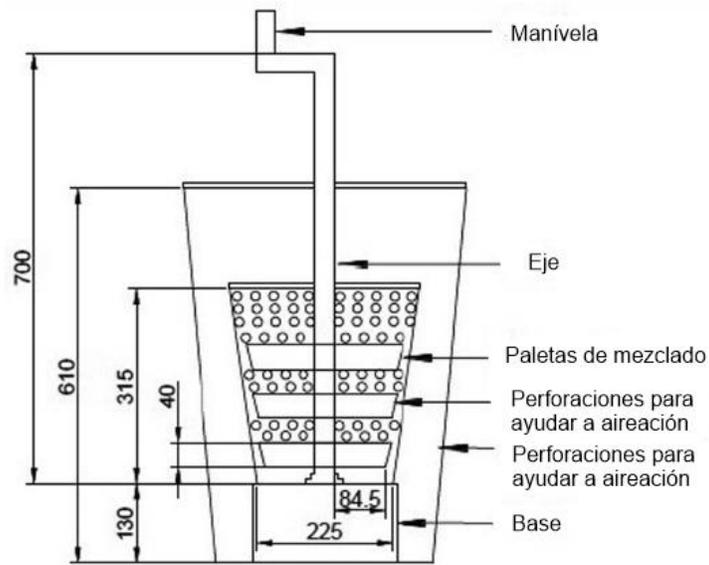
**Figura 19.** Tambor vertical hexagonal de plástico de 600 litros con mezclado utilizando un espiral sin fin. Tomado de Illmer y Schinner (1997)



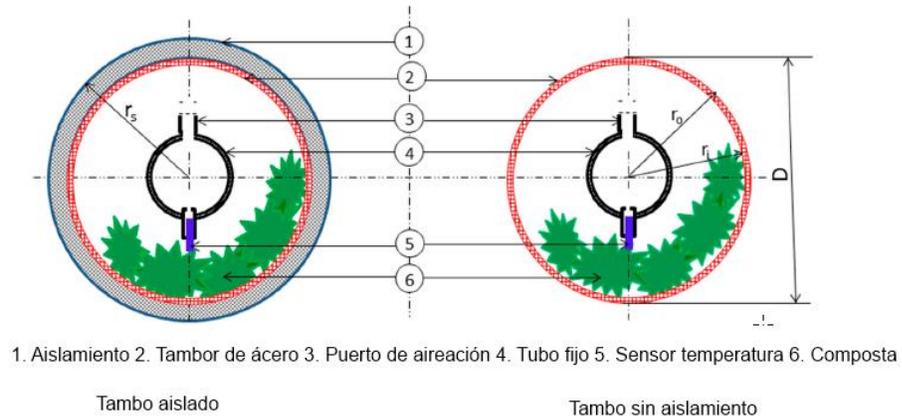
**Figura 20.** Tambo rotatorio horizontal de 200l con rotación sobre ruedas de nylon. Tomado de Kalahmdad y Kamzi (2009)



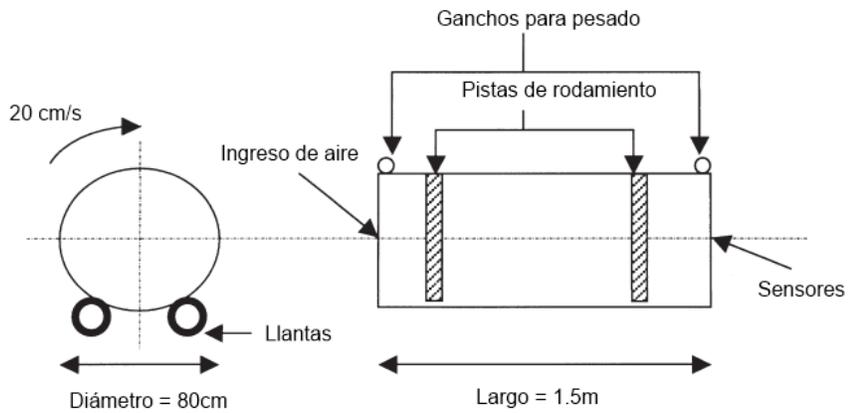
**Figura 21.** Tambo rotatorio horizontal con soporte y rotación sobre dos rodamientos. Tomado de Arrigoni et al. (2015)



**Figura 22.** Tambo vertical con mezclado utilizando paletas imitando un espiral sin fin. Tomado de Bhawe y Joshi (2017)



**Figura 23.** Tambo rotatorio horizontal aislado y sin aislamiento con aireación a través de tubo interior. Tomado de Alkolaik et al. (2019)



**Figura 24.** Tambo rotatorio de 750 litros con rodamiento sobre llantas. Tomado de Aboulam (2006)



**Figura 25.** Tambo rotatorio automatizado de 1'500 litros con rotación a través de un espiral sin fin y con un sistema de descarga por medio de un pistón. Tomado de Vázquez et al. (2020)

### 1.3.1 Paletas

Las paletas o instrumentos de mezclado ayudan a homogeneizar la mezcla de composta, airear, y distribuir las adiciones de material nuevo o agua.

Para niveles de llenado de 60 % y superior la homogenización del material se ve limitada por la presencia de núcleos sin mezclar (secciones al interior de la composta que no se logran desintegrar), y las paletas o instrumentos de mezclado ayudan a incrementar el nivel de homogenización favoreciendo el rompimiento de núcleos sin mezclar, pero las paletas deben tener, idealmente, un tamaño menor al 40 % del diámetro del reactor (Schneider et al., 2020).

### 1.3.2 Tamaño y Aislamiento

La relación área superficial/volumen es una forma de medir la posibilidad de pérdida de calor en la superficie de un reactor o contenedor, y esta será mayor mientras su volumen sea más pequeño. Alkolaik et al. (2019) clasifican diferentes escalas de reactor según el volumen y relación área superficial/volumen como se indica en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Escalas de reactor según los parámetros de Volumen de contenedor (V) y relación Área superficial/Volumen ( $A_s/V$ ) según Alkolaik et al. (2019)

Volumen de contenedor	Relación Área superficial/Volumen ( $A_s/V$ )	Escala de reactor
$V < 0.1\text{m}^3$	$10 < A_s/V < 88\text{ m}^{-1}$	Reactor de escala de laboratorio
$V = 0.1 - 2\text{ m}^3$	$A_s/V = 4\text{ a } 10\text{ m}^{-1}$	Reactor de escala piloto
$V > 2\text{ m}^3$	$0.4 < A_s/V < 4\text{ m}^{-1}$	Reactor de escala completa

Estos autores mencionan que para las escalas piloto y de laboratorio el aislamiento es necesario para poder alcanzar temperaturas adecuadas para el compostaje y utilizando fibra de vidrio como aislante lograron aumentar la temperatura máxima de un reactor de 37°C a

67°C. Esto incidió en la rapidez con la que se alcanzó la estabilidad de la composta. Otro material que ha sido reportado como aislante térmico eficiente es la espuma de poliuretano (Espinosa-Salgado et al., 2020).

## 1.4 Parámetros básicos de compostaje

Según el manual de compostaje de Cooperband (2002) para elaborar una composta se requieren las condiciones adecuadas de equilibrio carbono-nitrógeno, temperatura, humedad y oxígeno. Se suelen utilizar dos tipos de materiales a los que se les suele llamar materia fresca y materia leñosa (Ver Figura 26 y Tabla 2).

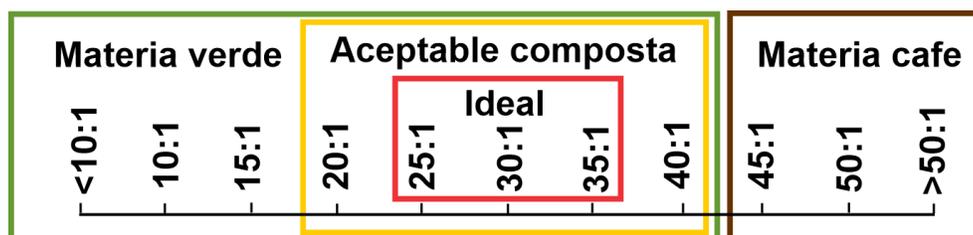
La materia fresca es materia muy húmeda y con una alta concentración de nitrógeno. Es generalmente como se identifica a los residuos de podas de arbustos, hojas de árboles, pasto, residuos vegetales frescos y restos de comida, excreta y lodos residuales.

La materia leñosa es materia vegetal seca que funciona como agente de carga, “*bulking agent*” (Onwosi et al. 2017) o agente estructurante (Juárez Robles et al. 2017), y está compuesta principalmente de residuos lignocelulósicos (Bernal et al. 1997) que tienen una gran cantidad de carbono. Además, funciona para absorber el exceso de humedad de la materia fresca y cumple con la función esencial de crear porosidad en la composta para favorecer la entrada de oxígeno (Cooperband, 2002).

### 1.4.1 Relación C:N y composición de la composta

La relación carbono-nitrógeno (C:N) es un parámetro con el que se puede caracterizar las materias fresca y leñosa (Figura 26), y se define como la relación entre la cantidad de átomos de carbono y de nitrógeno que hay en un material. La materia fresca y leñosa se

caracterizan por tener una relación C:N menor que y mayor que 40, respectivamente y el rango aceptable para una mezcla de composta va de 20 a 40 siendo el ideal de 25 a 35 (Cooperband, 2002, A. Cerda et al. 2017), por lo tanto, una composta se podría también definir como una mezcla adecuada de materia fresca y leñosa con una proporción C:N equilibrada.



**Figura 26.** Tasa carbono nitrógeno de materia fresca, leñosa, y rangos aceptable e ideal para una composta. Elaboración propia con información de Cooperband (2002)

Las combinaciones de materiales frescos y leñosos pueden ser muy variadas. Muchos estudios se centran en encontrar la proporción adecuada de cierto material fresco para compostar con un material leñoso, viceversa, o incluso la combinación de tres o más materiales. Bernal et al. (1997) por ejemplo, evaluaron siete combinaciones diferentes de hasta cuatro materiales diferentes para crear el sustrato a compostar utilizando cuatro tipos de materia fresca: lodos de agua residual, estiércol de gallina, estiércol de puerco y agua residual de un molino de extracción de aceite de oliva, y tres tipos de materia leñosa: residuos de algodón, rastrojo de maíz y bagazo de sorgo. Algunos materiales de compostaje suelen servir como inoculantes microbianos, sin embargo, el mejor aditivo para iniciar una composta es composta madura o en proceso de maduración. (Cerda et al., 2017). Otros estudios utilizan proporciones definidas, como Vázquez et al. (2020) que utilizaron una proporción de 1:1 en

volumen de residuos orgánicos y de cocina de comedores universitarios con residuos de jardín lo que les resultaba en proporciones de 3 - 8.5 a 1 en masa, o Karnchanawong et al. (2011) utilizaron proporciones de 3.5 a 1 en masa de residuos de cocina con hojas secas. En el Apéndice 2 se encuentra una lista de composiciones utilizadas en diferentes estudios.

**Tabla 2.** Relación C:N de diferentes materiales para compostaje reportados en la literatura (partes de carbono por cada parte de nitrógeno)

Material	Relación C:N	Referencia
heno	15-30	Cooperband (2002)
hojas y pasto secos	30-80	
ramas y pedazos de corteza	100-500	
pasto fresco	15-25	
residuos vegetales	10-20	
estiércol/heces gallinas	2-4	Zubrügge (2014)
pasto fresco	15	
hojas	40-80	
aserrín	142-750	Munroe et al. (2007)
papel	127-180	
estiércol	22-56	
hojas secas	40-80	
pulpa de café	29	
paja de maíz	312	PNUD-INFAT (2002) en FAO (2013)
mazorca de maíz	117	
paja de arroz	77	
paja de caña de azúcar	49	
residuos de fruta	20-49	Rynk (1992) en Tchobanoglous (1998)
cortes de pasto	9-25	
lodo residual	5-16	
residuos de comida	14-16	
cortes de arbustos	53	
cortes de arboles	16	

Algunos estudios como el de Espinosa-Salgado et al. (2020) y el de Abdullah y Chin (2010), hacen uso de un modelo simplex centroide, que es una herramienta muy útil y ampliamente utilizada en la industria alimenticia, farmacéutica e incluso en ingeniería en el estudio de mezclas (Abdullah y Chin, 2010) para encontrar la proporción más adecuada para compostar el digestato de un proceso anaerobio con residuos orgánicos frescos y aserrín.

Dos estudios sobre compostaje a nivel doméstico han evaluado el uso de material cárnico a pequeña escala: Storino et al. (2016), que utilizaron contenidos de 5 y 15% de residuos cárnicos y proporciones de 0.6 y 1.2 de material fresco a agente de carga respectivamente y Arrigoni et al. (2015), que hicieron uso de material cárnico en una proporción de 10% para diferentes composteros. Ambos estudios encontraron que, mientras el manejo de una composta sea adecuado, la inclusión de material cárnico en el compostaje a pequeña escala mejora el procesamiento de compostaje sin generar plagas o problemas asociados.

#### 1.4.2 Humedad, Porosidad, Tamaño de partícula y pretratamientos

La materia fresca suele contener hasta 90% de humedad en peso, mientras que la materia leñosa puede contener menos del 5%, el intervalo ideal de humedad inicial en una composta se encuentra entre el 40 y 60% (Cooperband, 2002).

Algunos autores suelen disminuir la humedad inicial de algún material fresco antes del compostaje, como lo hicieron Alkolaik et al. (2019) que dejaron secar residuos orgánicos al sol por tres días para reducirlos al 15% de su humedad original, o Juárez-Robles et al. (2017) que deshidrataron al 35% de la humedad original de lodos residuales para posteriormente tritararlos con un molino de martillos. Pero inversamente, también puede suceder que se requiera la adición de humedad a la mezcla de composta, especialmente en las etapas de maduración (Vázquez et al., 2020; Aboulam, 2006). Debertoldi (1983) señala que en las etapas finales del compostaje la humedad debe estar idealmente en un rango de 30%.

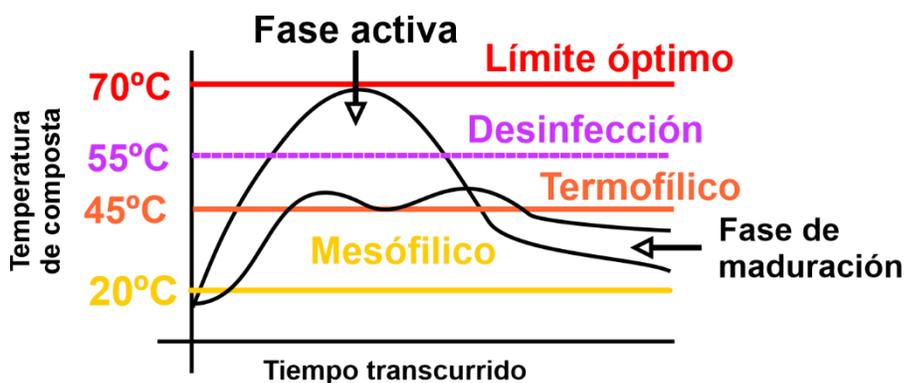
El tamaño de partícula de los materiales a compostar afecta la porosidad, que incide en el flujo de aire, e influye también en la capacidad de retención de agua y la interfaz de gases y agua (Ruggieri et al., 2009). El tamaño inicial de partícula, además, determina la disponibilidad de área superficial para la colonización microbiana (Cooperband, 2002; Bhave y Joshi, 2017), ya que, a menor tamaño de partícula, mayor área disponible para colonizar.

Cerda et al. (2018) mencionan que el reto principal para el compostaje de residuos orgánicos es alcanzar la porosidad adecuada.

Por esta razón, como pre-tratamiento los materiales a ser compostados son triturados antes de iniciar el compostaje, como por ejemplo lo hacen Vázquez y Soto (2020) y Arrigoni et al. (2015) que trituran residuos vegetales a compostear en partículas de 2-3 cm, Schneider et al. (2020) que los reducen a 0.63cm, o Juárez Robles et al. (2017) que pasan por un tamiz de 0.5 mm arcilla para agregarla a su mezcla de composta. Sin embargo, el tamaño de partícula no puede ser demasiado pequeño, ya que esto provocaría compactación (Cooperband, 2002) y limitaría la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior (Márquez et al., 2008). Cooperband (2002) menciona que el rango más adecuado para iniciar una composta es menor a una pulgada.

#### 1.4.3 Temperatura

Una vez constituida la pila con las proporciones adecuadas de cada tipo de material ajustándose al rango ideal de relación C:N y humedad se elevará la temperatura al rango termofílico, que sucede a temperaturas mayores a 45°C (fase activa). Una vez en la fase de maduración, la temperatura descenderá al rango mesófilo que va de 20 a 45°C (Figura 27).



**Figura 27.** Rangos de temperatura en una composta. Elaboración propia con información de Cooperband (2002)

Algunos autores señalan que la temperatura óptima para el compostaje en general se encuentra entre los 45 y 60 °C (Onwosi et al. 2017), y otros, como Cerda et al. (2018), por otro lado, señalan que para la degradación de residuos orgánicos a escala doméstica el rango de temperatura de 35 a 37 °C es suficiente.

Muchas veces, aunque en el compostaje doméstico no se alcancen temperaturas termofílicas por completo, en general, no se llegan a detectar microorganismos patógenos, sin embargo, esto puede implicar una fase larga de maduración para reducir la carga de patógenos, y el tiempo mínimo apropiado puede ser de hasta 1 año (Storino, 2017).

Según el Manual de compostaje del agricultor de la FAO para eliminar patógenos como *Salmonella* y *Escherichia Coli* se deben alcanzar temperaturas de 55°C por al menos 1 hora (Jones and Matin, 2003; FAO, 2013). En México la norma NMX-AA-180-SCFI-2018 indica que para asegurar la máxima esterilización de la composta producida con residuos orgánicos domésticos se deben alcanzar temperaturas mayores a 55°C por 3 días consecutivos en biorreactores.

Para alcanzar temperaturas termófilas a nivel doméstico Storino et al. (2016) y Arrigoni (2015) demostraron que el uso de residuos de origen animal ayuda a elevar y mantener temperaturas elevadas y asegurar la desaparición de patógenos. Sin embargo, es difícil alcanzar temperaturas termófilas si se utilizan exclusivamente residuos vegetales (Smith y Jasim, 2009).

En la Tabla 3 se mencionan los días en temperatura termófila alcanzadas en ensayos en otros estudios a pequeña escala.

**Tabla 3.** Días en temperatura termófila alcanzados reportados en la literatura

>55°C	3 días con ayuda de aislamiento	Alkolaik et al. (2019)
	18 días en composteros estáticos	Vázquez et al. (2020)
	10 días en cajones de reposo	
>45°C	56 días en compostero rotatorio	Bernal et al. (1997)
	28 días	
	12 días	Espinosa-Salgado et al. (2020)
	10, 14 y 16 días para cada composición	Juárez Robles B. et al. (2017)
	6 días	Kalamhdad et al. (2012)
	60, 70 y 85 días para cada tipo de compostero (tambo estático, tambo rotatorio y volumen extendido)	Arrigoni et al. (2015)

#### 1.4.4 Aireación y volteos

Para mantener en buen estado una composta es necesario airearla para el ingreso de oxígeno, ya que en su ausencia se activa la descomposición anaerobia que genera olores desagradables por la emisión de gases como amoníaco o sulfhídrico y otros compuestos orgánicos volátiles (Zubrugg, 2014; Onwosi et al, 2017, Cerda et al., 2018). La aireación es el factor principal para la estabilidad de una composta (Onwosi et al. 2017) y para evitar que genere olores desagradables (Cooperband, 2002). Existen diferentes técnicas de aireación

que se clasifican en aireación forzada, (con uso de bombas de aire) y, aireación pasiva, (a través de tubos o paredes perforados) (Zubrugg, 2014) (Figura 4).

La forma más común de aireación es a través del volteo, que consiste en voltear el material en compostaje de abajo hacia arriba. El volteo o mezclado de los materiales previene la compactación que desemboca en poca aireación (Lazcano et al., 2008) y restablece la porosidad, que permite el ingreso de oxígeno a la pila de composta, necesario para evitar el proceso de descomposición anaerobia (Cooperband, 2002). Alexander (2007) estudió la importancia del volteo en el compostaje y encontró que los tratamientos con volteo tuvieron una reducción de 20% a 38% mayor que los tratamientos sin volteo. También mencionan que otros autores identifican mayor cantidad de partículas finas en tratamientos con volteo. Sin embargo, el exceso de aireación puede enfriar la pila de composta (Zubrugg, 2014). Si bien una buena aireación ayuda a reducir el tiempo de estabilización, un exceso puede resultar en la pérdida de componentes vitales (Aswathi et al., 2014)

Las recomendaciones de régimen de volteo son muy variadas. En el caso de tambores rotatorios, Bhave y Joshi (2017) mencionan un mezclado diario por 30 minutos, Illmer y Schinner (1997) mencionan hacer el mezclado una vez por semana y Kalahmdad y Kazmi (2009) utilizaron hasta cuatro volteos por día. La frecuencia de volteo puede variar especialmente según el tipo de residuo que se esté compostando, ya que algunos residuos pueden requerir mucha mayor aireación que otros, especialmente si se están compostando residuos de origen animal.

La aireación se puede estimar a través de la porosidad y el espacio de aire libre (EAL), conceptos relacionados entre sí. El espacio de aire libre se define como el espacio ocupado por los poros en una muestra de composta. (Márquez et al., 2008). El rango de

EAL ideal al inicio del proceso de compostaje es de 30-35% (Márquez et al., 2008) y de 67% durante la fase de curado (A. Cerda et al., 2018)

## 1.5 Estabilidad y Madurez de una composta y otras variables

### 1.5.1 Estabilidad

La estabilidad se refiere a la resistencia de la materia orgánica en compostaje a ser sometida a mayor degradación (Onwosi et al., 2017) y está relacionada de manera indirecta con la actividad biológica de una muestra de composta (Barrena et al., 2006). La prueba más sencilla y difundida de estabilidad es la prueba de autocalentamiento de Dewar. Esta prueba simple consiste en tomar una muestra de composta y dejarla enfriar (y preferentemente, tamizar y humedecer) para después dejarla calentar a temperatura ambiente, y, medir la diferencia de temperatura entre la muestra y el ambiente. Esta diferencia de temperatura se clasifica en cinco diferentes categorías (Tabla 4) y está estrechamente relacionada con la respiración microbiana (Brinton et al., 1995).

**Tabla 4.** Clases de estabilidad de composta según la prueba de autocalentamiento de Dewar (Brinton et al., 1995)

Clase de estabilidad	Incremento respecto temperatura ambiente	Descripción	Tipo de composta	Usos
V	0-10°	Composta estable correctamente madurada.	Composta terminada	Macetas, semilleros
IV	10-20°	Composta moderadamente estable en curación		Jardinería general e invernaderos
III	20-30°	Material en descomposición, composta activa.	Composta activa	Árboles frutales
II	30-40°	Composta muy joven y activa.		Camas calientes de cultivo
I	40-50°	Composta fresca recién mezclada	Composta fresca	Cultivo de hongos

Por ejemplo, en un estudio de Vázquez y Soto (2020), a 84 días de proceso, se obtuvo una composta con clase de estabilidad II, que para el día 129 alcanzó la clase V.

La estabilidad por sí sola no es suficiente para asegurar una composta de alta calidad, ya que mientras mayor tiempo de maduración transcurra, una composta tendrá mejor calidad (Ocaña et al., 2015)

### 1.5.2 Madurez

La madurez se refiere al grado de terminación del proceso de compostaje y se puede evaluar mediante el tamaño de partícula (Aboulam, 2006) o tasa C:N (Illmer y Schinner, 1997). En la fase de maduración la composta se va enfriando lentamente acercándose a temperatura ambiente y puede continuar madurando por períodos de hasta un año (Cooperband, 2002). Algunos autores sugieren que una tasa C/N menor a 12 indica un buen nivel de madurez (Bernal et al., 1997). Alkolaik et al. (2019) sugieren que una tasa C/N menor a 15 indica una buena conservación de nitrógeno, y Bhave y Joshi (2017) consideran que una tasa menor a 20 es suficiente para indicar un buen proceso de compostaje. La NMX-AA-180-SCFI-2018 establece una tasa C:N de 15 a 25 como el parámetro para una composta terminada.

Para el tamaño de partícula, Zhang y Sun, (2016) mencionan que debe estar idealmente entre 0.25 y 2 mm para considerar una composta madura. Alexander (2007) menciona que una composta bien madura debe lograr pasar por lo menos por un tamiz de 1.2 cm. Aboulam (2006) encontró que después del proceso de compostaje los elementos mayores a 100 mm pasan de componer el 43.1% al inicio, a 15.1% y los elementos menores a 8mm incrementan de 7.7% a 23.5% respectivamente.

El índice de nitrificación es otro indicador de madurez, y es una relación entre la concentración de nitrógeno en forma de amonio y su forma de nitrato ( $\text{NH}_4^+-\text{N} / \text{NO}_3-\text{N}$ ). Bernal et al., (1997) y Juárez et al. (2015) sugieren un límite de 0.16 como el índice de nitrificación adecuado para una composta madura, y Zhang et al. (2016) establecen una clasificación de madurez: completamente madura (0.5), madura (0.5 a 3) o inmadura (3 o mayor).

Por último, al final del proceso de compostaje, debido a la oxidación de la materia y la evaporación de agua la pila de composta pierde volumen y masa, pudiendo llegar a reducciones de hasta 75% en masa y 85% en volumen en composta bien madura (Tabla 5).

**Tabla 5.** Reducción porcentual de masa y volumen alcanzado en algunos ensayos de compostaje

Valor	Observaciones	Referencia
32%	De la masa inicial	Espinosa-Salgado et al. 2020
74,02+-5,63%	Reducción de masa	Juárez-Robles B. et al. 2017
65%	Reducción de masa	Kanchanawong, 2011
40.7%	Reducción de volumen	Alexander, 2007.
82-84%	Reducción de volumen	Bhave y Joshi (2017)
75%	Reducción de masa posible	NADF-020-AMBT-2011
7.1%	De la masa inicial	Arrigoni et al. (2015)
4%	Del volumen inicial	Illmer y Schinner (1997)

### 1.5.3 Otras variables

El pH de una composta suele seguir un patrón: decrecer en las etapas tempranas y elevarse durante las etapas tardías (Onwosi et al., 2017). En la literatura revisada se reportan

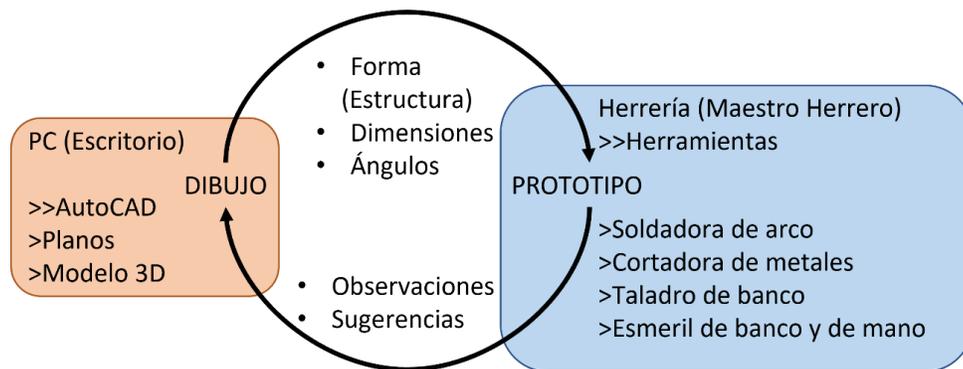
rangos ideales muy variados, que dependen de las técnicas, sustratos y proporciones que se utilizan. Por ejemplo, de 6.7 a 9 o de 8 a 8.5 (Onwosi et al., 2017).

La Conductividad Eléctrica refleja la salinidad de una muestra de composta y en general se recomiendan valores límite bajos para no afectar el crecimiento vegetal (Lazcano et al., 2008). Se recomienda que sean menores a 4 mS/cm (Onwosi et al., 2017) y las compostas de residuos orgánicos suelen tener altas concentraciones de salinidad (Hargreaves et al., 2008).

## Capítulo 2. Prototipado

### 2.1 Materiales y métodos

La metodología de trabajo consistió en el dibujo de planos con el programa Autodesk AutoCAD (2021-2023) que se presentaron en el taller de la Herrería Morales con la forma, dimensiones y ángulos de los prototipos que se buscaba construir. En el taller se aportó apoyo en cuanto a la técnica de cómo realizar los cortes y el soldado, además de aportar sugerencias y observaciones al prototipo (Figura 28).



**Figura 28.** Metodología de trabajo: Diseño por computadora y construcción colaborativa en taller

Para el diseño, como contenedor base se reutilizaron tambos de polietileno de alta densidad (PEAD) de 200 litros (Figura 29). Estos se utilizan ampliamente en la industria para el transporte de materias primas y son fáciles de obtener en ferreterías, tiendas de plásticos e incluso existen comercios dedicados exclusivamente a vender tambos de segundo uso.

Para construir la estructura que carga el tambor y los rodamientos se escogió perfil tubular rectangular, para el eje de rotación tubo mecánico, y, para las paletas de mezclado, la sujeción del tambor al eje de rotación y la puerta de ingreso de material se utilizaron solera y ángulo (Ver Tablas 7 y 8).

Se concertaron 15 sesiones de trabajo al o largo de un período de 6 meses durante los que se construyó un primer prototipo y tres réplicas, dos de estas con paletas gruesas y dos con paletas delgadas. De cada par de composteros con paletas gruesas y delgadas, a uno se le colocó aislante térmico.



**Figura 29.** Fotografías de construcción colaborativa en el taller de herrería

Durante estas sesiones de trabajo se obtuvo experiencia práctica en el uso de herramientas de herrería como cortadora angular, taladro, esmeriladora, taladro de banco, esmeriladora de banco y soldadora de arco eléctrico.

**Tabla 6.** Materiales, características, costos, cantidades y costo total en pesos mexicanos

Abreviaturas: PD = Paletas Delgadas, PG = Paletas Gruesas, CA= Compostero Aislado, CS = Compostero sin aislar

Costo acero					
Material	Características	cm req.	pzas. req.	\$ / pza.	Subtotal por material
PTR (Perfil tubular rectangular)	1" ancho, 2" largo 1.9 mm grosor	4264	8	\$738	\$5'904
Tubo mecánico	1 1/2 " diám. 2.2mm grosor	690	2	\$422	\$844
Solera (PG)	1 1/2" largo 1/4" grosor	1000	2	\$500	\$1'000
Solera (PD)		520	1	\$500	\$500
Ángulo (PG)	1" largo 3.5mm grosor	120	1	\$350	\$350
Ángulo (PD)		80			
Varilla (PD)	8 mm grosor	320	2	\$300	\$600
Subtotal acero					\$9'198
Costo material adicional por compostero					
Material		pzas./comp.	Pzas. req.	\$ / comp.	Subtotal por material
Juego rodamientos	1/4" de diámetro, 2 1/2" ancho	2	8	\$360	\$1'440
Juego llantas	PVC de 2" diámetro	4	16	\$480	\$1'920
Lata pintura	500ml	2	8	\$160	\$640
Lata poliuretano (A)	500ml	3	6	\$570	\$1'140
Juego completo de tornillos , tuercas y rondanas	tornillos 1/4" $\phi$ 2" largo	10	40	\$195	\$780
	tornillos 1/4" $\phi$ 1" largo	8	32		
	rondanas medianas 1/3" $\phi$	28	112		
	tuercas 1/4" $\phi$	36	144		
Tambo		1	4	\$350	\$1'400
Subtotal material adicional					\$7'320
Costo total 4 prototipos					\$16'518

## 2.2 Cortes y perforaciones

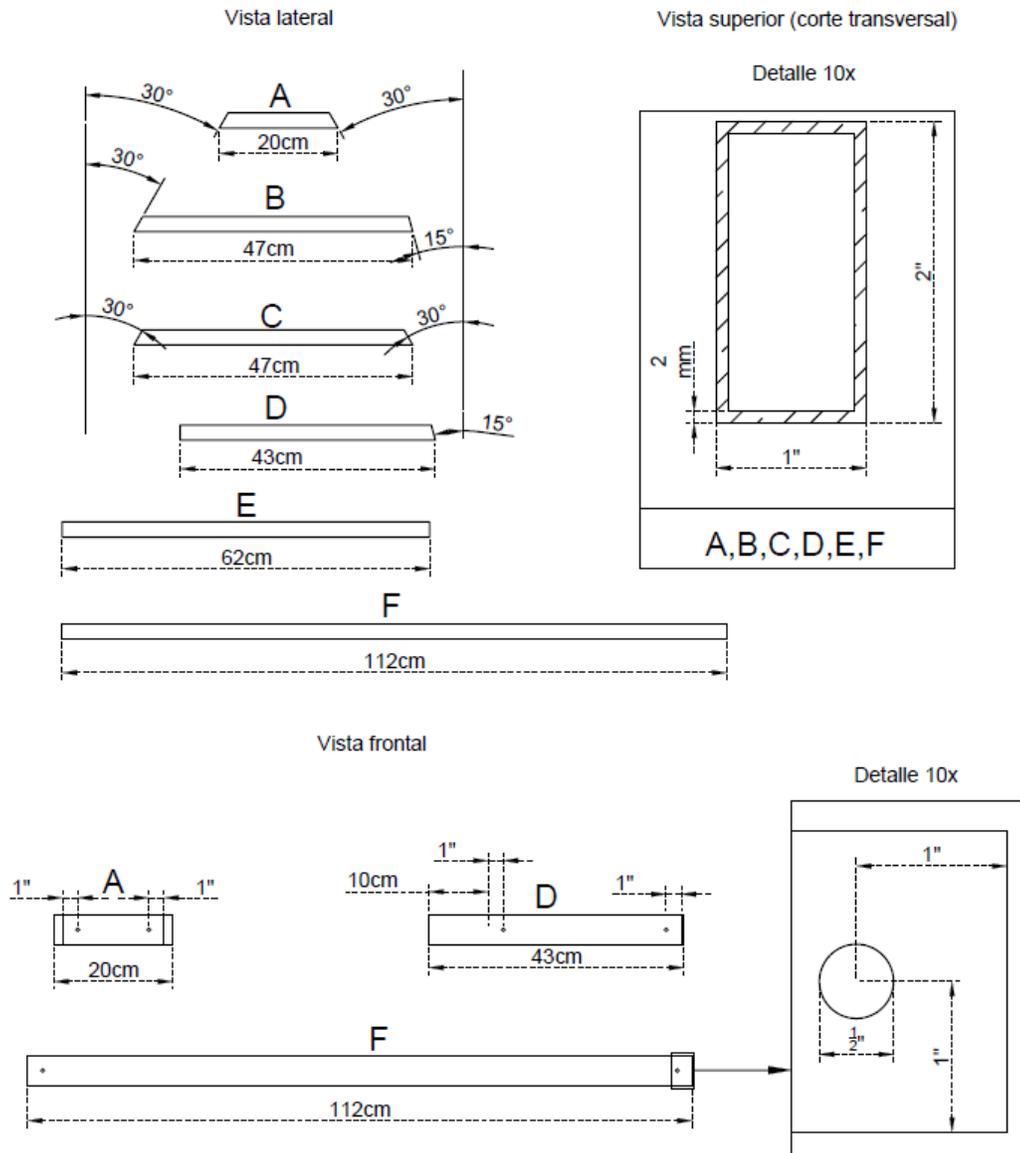
Los tamaños, ángulos de corte y cantidad de tramos de cada material se indican en la Tablas 7 y 8 y las Figuras 30, 31 y 32. Los cortes se realizan con una cortadora angular y las perforaciones se realizaron con taladro y en un diámetro de media pulgada.

### 2.2.1 Tramos estructura

Para la estructura del compostero se utilizó perfil tubular rectangular cédula 14 de una pulgada de ancho por dos pulgadas de largo. Se cortaron los tramos A, B, C, D, E y F según los tamaños y cortes angulares indicados en la Vista lateral (Figura 30), la cantidad de piezas requeridas de cada tramo se indica en la Tabla 7. Las perforaciones en los tramos A, D y F se centraron a una pulgada de cada borde como se muestra en el acercamiento de la Vista frontal (Figura 30). En el tramo D, la perforación se realizó del lado del corte angular, y diez centímetros más una pulgada a la derecha del extremo sin cortar (Figura 30).

**Tabla 7.** Cantidad de tramos de PTR

PTR			
Tramo	Cant.	Tramo	Cant.
A	2	D	4
B	4	E	2
C	2	F	3



**Figura 30.** Tamaño y ángulos de corte de tramos A, B, C, D, E y F para la construcción del soporte en Vista lateral, frontal, superior y acercamientos

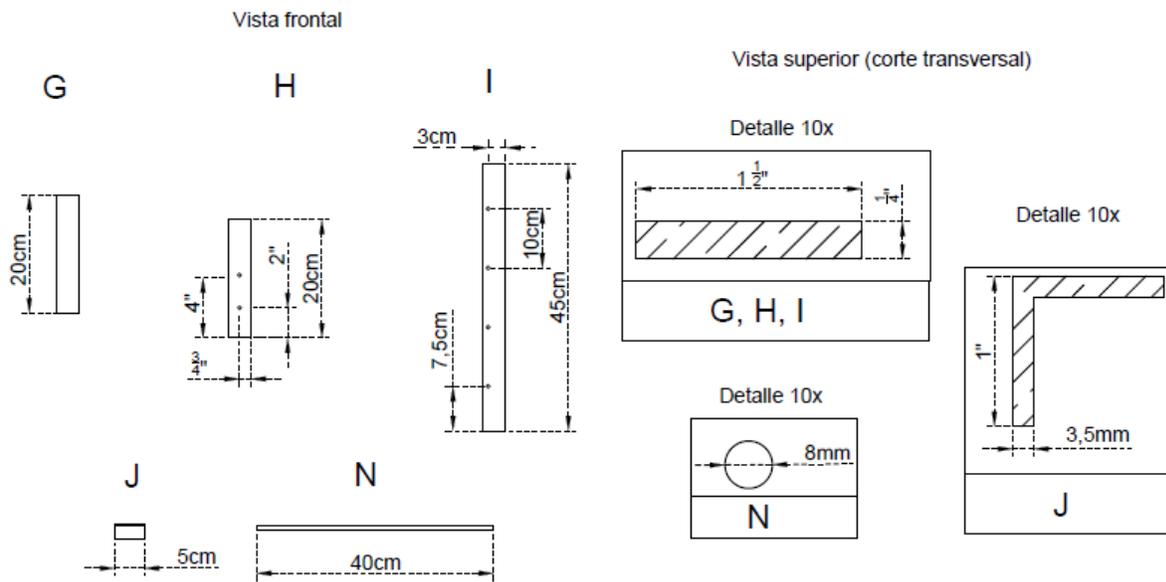
### 2.2.2 Tramos de sujeción del tambo, puerta y paletas

Para la sujeción del tambo y puerta se utilizó solera, y, para la construcción de las paletas se utilizaron varilla y solera, además de tramos de ángulo para fijarlas al eje (tramos

J) (Tabla 8). Las perforaciones en el tramo H se hicieron al centro en el eje vertical y a distancias de 2 y 4 pulgadas de un extremo en el eje horizontal. En el tramo I las perforaciones se realizaron desplazadas 3 cm en el eje vertical hacia uno de los extremos largos, centradas en el eje horizontal 7.5cm de cada extremo ancho, y con 10 cm de distancia entre sí (Figura 31).

**Tabla 8.** Cantidad de tramos de SOLERA, ÁNGULO y VARILLA requeridas para la sujeción del tambo y la fijación de la puerta y paletas.

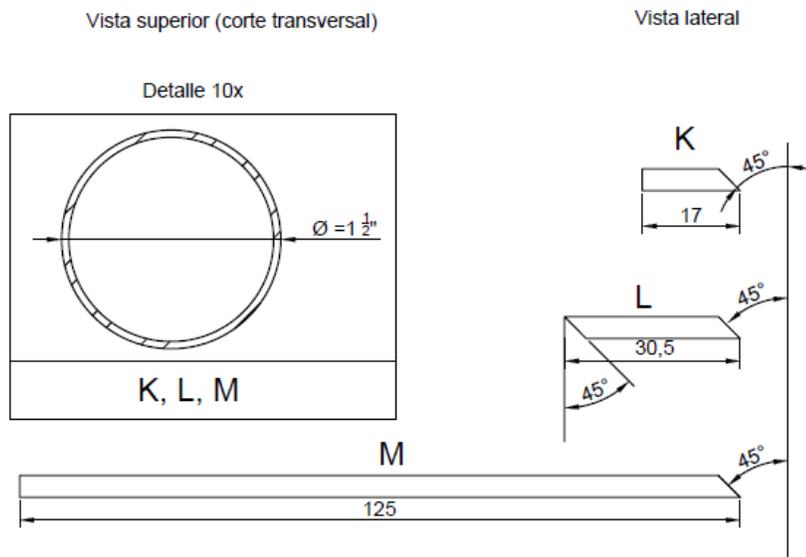
SOLERA			ÁNGULO		
Parte	Cant.	Long.	Parte	Cant.	Long.
G (Paletas gruesas)	12	20cm	J (Paletas gruesas)	12	5cm
H	4	20cm	J (Paletas delgadas)	4	
I	4	45cm			
VARILLA					
Parte			Cant.	Long.	
N (Paletas delgadas)			4	40cm	



**Figura 31.** Tamaño de corte y perforaciones de tramos para sujeción tambo, puerta y paletas: Vista frontal y superior en acercamiento

### 2.2.3 Tramos del eje y manivela

El eje del tambor y la manivela de rotación se construyeron con tubo mecánico cédula 30 (2.2 mm de grosor). Se requirieron solamente tres tramos cortados como se indica en la Figura 32.



**Figura 32.** Tamaño y ángulos de corte para eje y manivela. Vista lateral, y vista superior en acercamiento

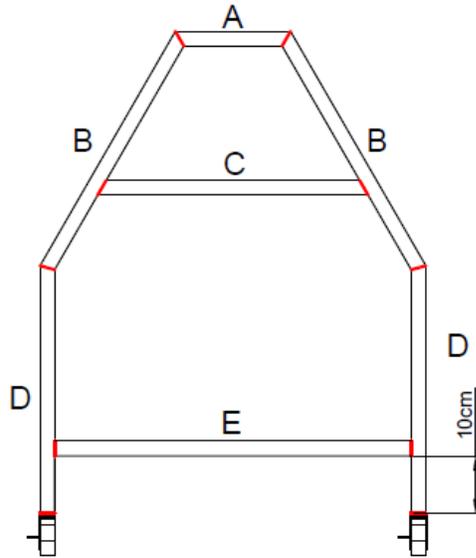
### 2.3 Soldadura (Primera parte)

Para la primera fase de soldado, se soldó la estructura completa (Tramos ABCDE) y el eje a la manivela usando una soldadora de arco eléctrico (Tramos KLM). Los puntos de soldadura se marcan con rojo (Figuras 33 y 34).

#### 2.3.1 Soporte y llantas

El tramo A se soldó con los tramos B a los extremos por el lado cortado a 30° de cada tramo de B, y el tramo C uniendo los tramos B. Los tramos D se soldaron por el lado cortado a 15° con el extremo faltante de B y se soldó el tramo E uniendo los tramos D.

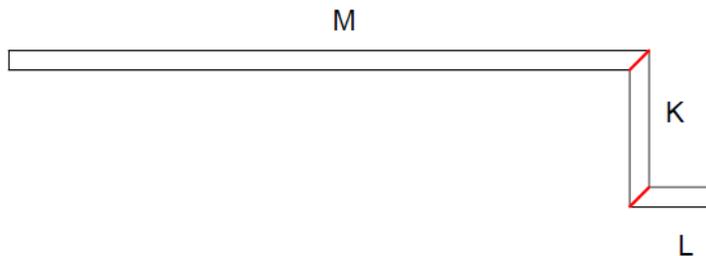
Este proceso se realiza dos veces para contar con dos juegos de soportes idénticos.  
Por último, en el extremo inferior del tramo D se soldaron las ruedas (Figura 33).



**Figura 33.** Soldado de tramos A, B, C, D y E de la estructura y llantas. Vista lateral

### 2.3.2 Tramos del eje y manivela

El eje de rotación M se soldó con los dos tramos K y L que conforman la manivela (Figura 34).

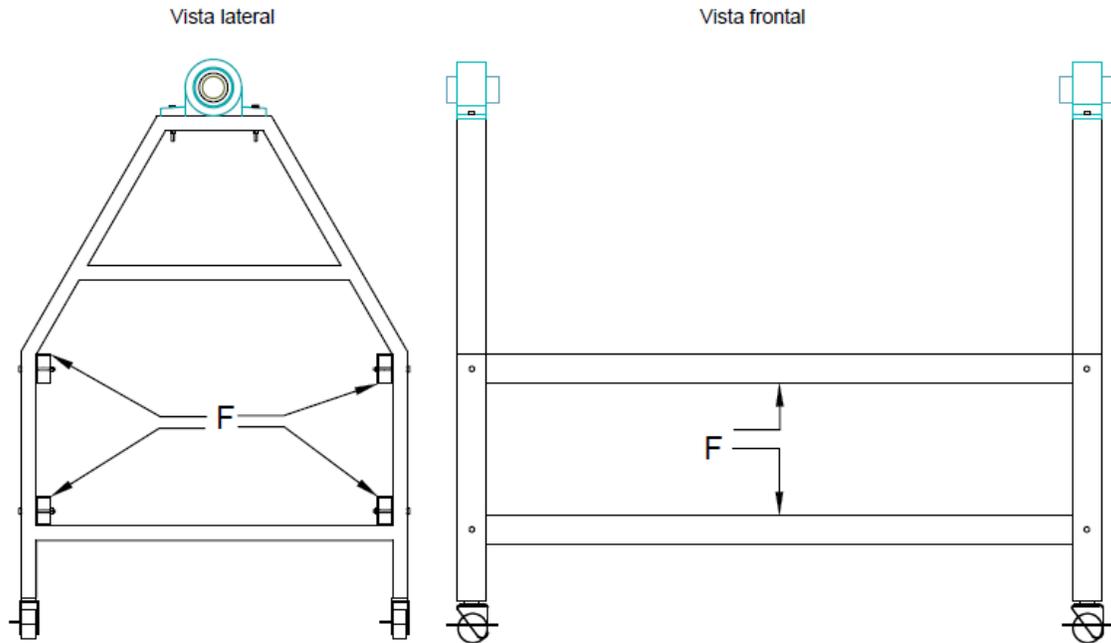


**Figura 34.** Soldadura de tramos K, L y M que comprenden el eje y manivela. Vista frontal

## 2.4 Ensamblado

### 2.4.1 Soporte completo

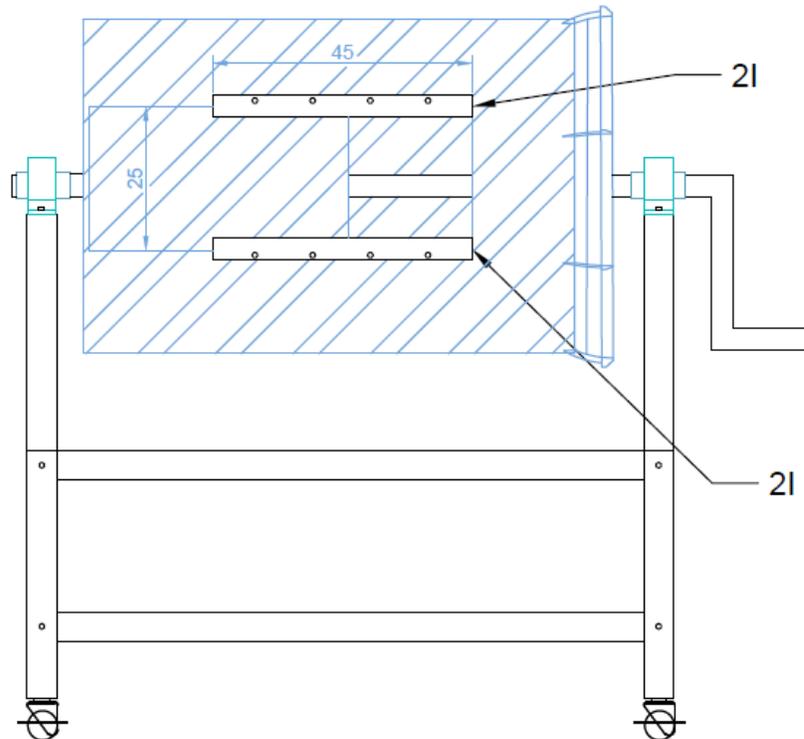
Para ensamblar los soportes, se deben colocar uno de cada lado y atornillar las barras “F” con los soportes. Las chumaceras o rodamientos se atornillan en la parte superior de los soportes. Todos los tornillos llevan doble rondana. Cada soporte individual se une utilizando las barras F que se atornillan en el lado interior del tramo D del soporte (Figura 35).



**Figura 35.** Soporte completo ensamblado con el tramo F atornillado a cada soporte. Vistas lateral, frontal y tridimensional

#### 2.4.2 Ensamblado tambo-eje y puerta deslizable.

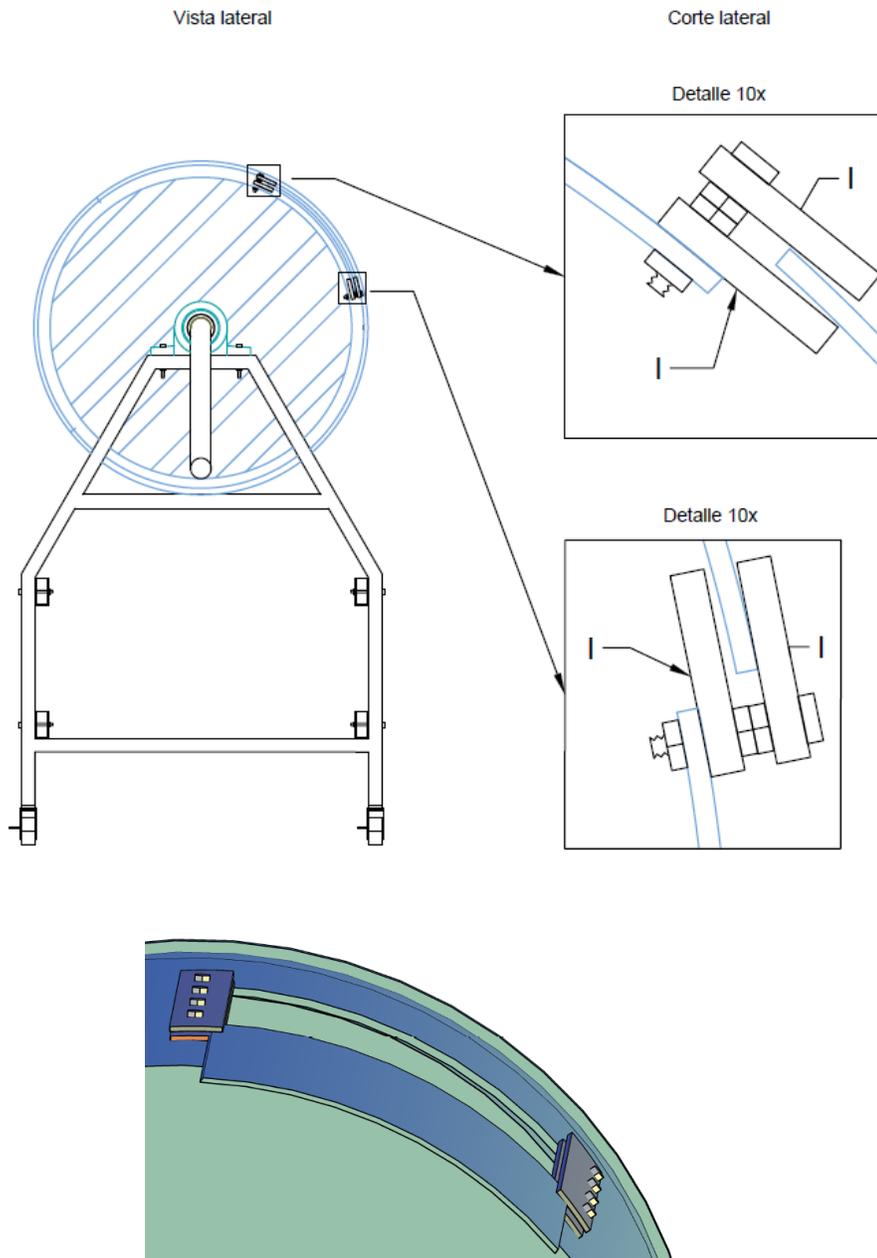
El tambo se perforó al centro de la tapa y base, y se deslizó el eje a través de las chumaceras y el centro del tambo, de tal manera que el eje repose sobre las chumaceras y el tambo sobre el eje (Figura 36).



**Figura 36.** Ensamblado tambo-eje (tramos M, K y L) y puerta deslizable (tramos I), vista frontal

Para el ensamblado de la puerta, se utilizó el taladro y la sierra caladora para recortar del tambo una sección rectangular de 45 por 25 cm. En los lados largos del borde del rectángulo que se recortó, se perforaron orificios utilizando una solera como guía, y se atornilló cada juego de soleras desde el interior del tambo colocando dos tuercas en medio de las soleras como se indica en el acercamiento del corte lateral en la Figura 37.

Cada juego de soleras requiere 12 tuercas, una vez ensamblados los juegos de soleras la sección rectangular recortada se puede deslizar en el espacio entre cada una haciendo la función de puerta como se ve en la vista tridimensional (Figura 37).



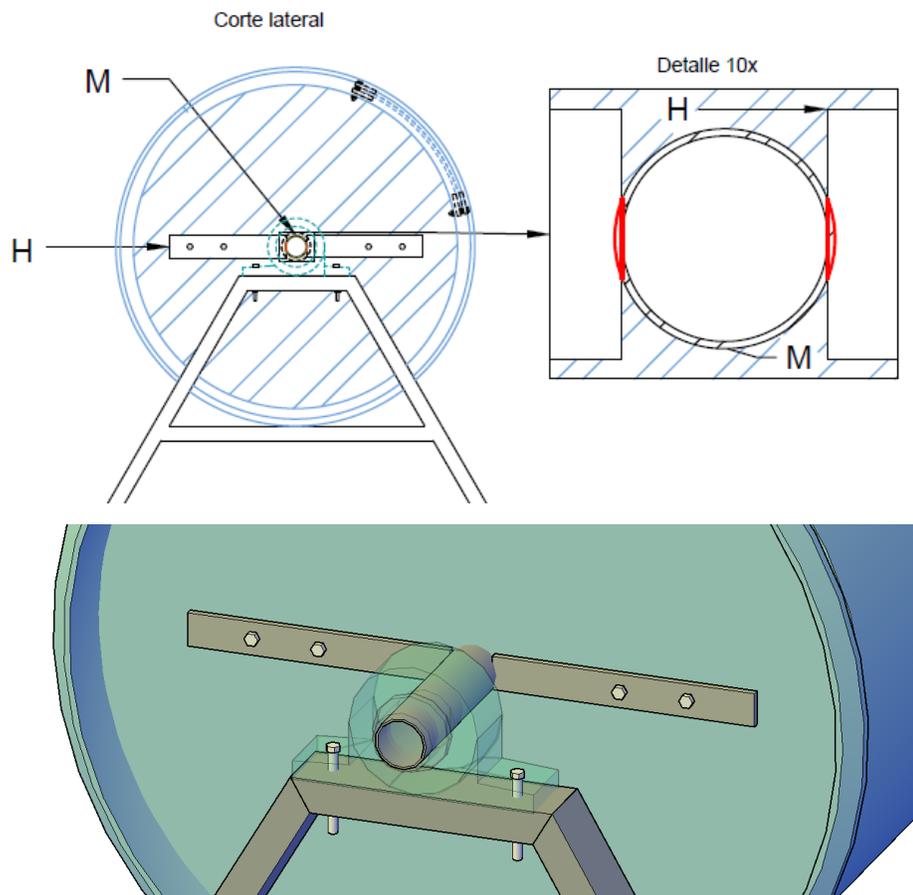
**Figura 37.** Ensamblado del tambo-eje y puerta deslizable: Vista lateral, corte en acercamiento y vista tridimensional

## 2.5 Soldadura (Segunda parte)

La segunda parte de soldado consistió en soldar el sujetador al eje, crear cada juego de paletas y soldarlas al eje.

### 2.5.1 Sujetador tambo

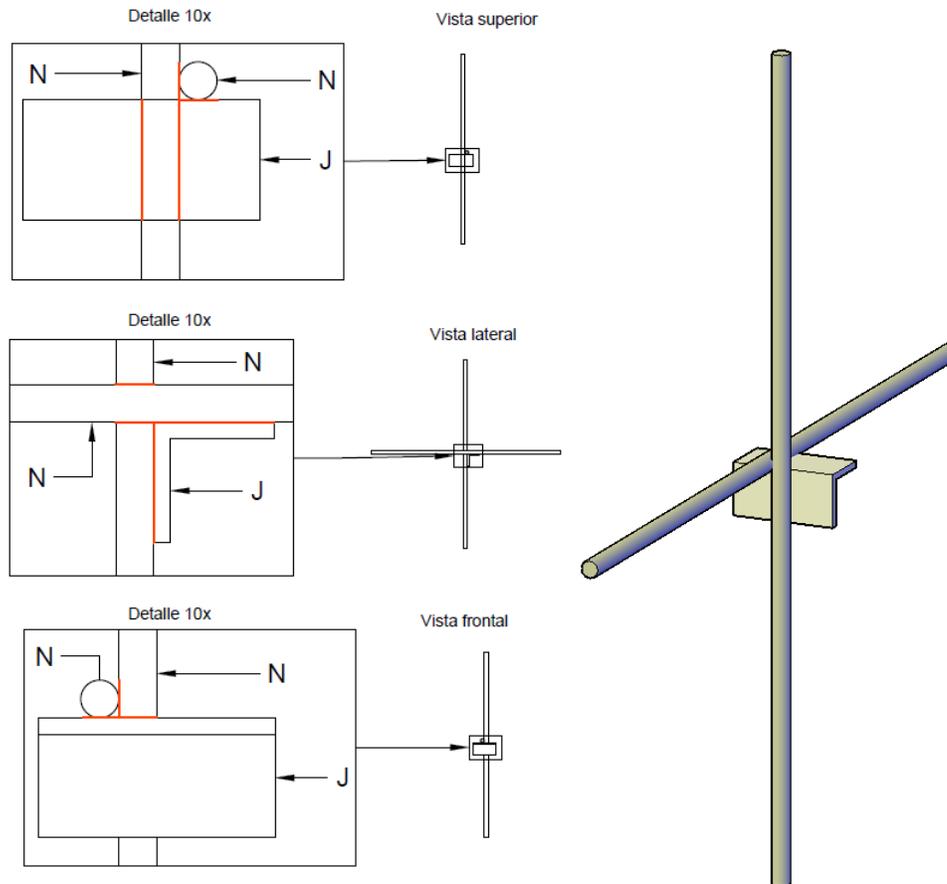
Los tramos H se soldaron al eje en la parte de afuera del tambo, pegados a la tapa y base, en sentidos opuestos y con las perforaciones hacia el exterior del tambo como se ve en el acercamiento del corte lateral (Figura 38). De igual manera que con los tramos de la puerta, se perforan los sujetadores y el tambo con taladro y se atornillan desde el interior del tambo.



**Figura 38.** Soldado de sujetador de tambo. Arriba: Vista lateral y en corte en acercamiento Abajo: Vista tridimensional

### 2.5.2 Paleta individual (delgada)

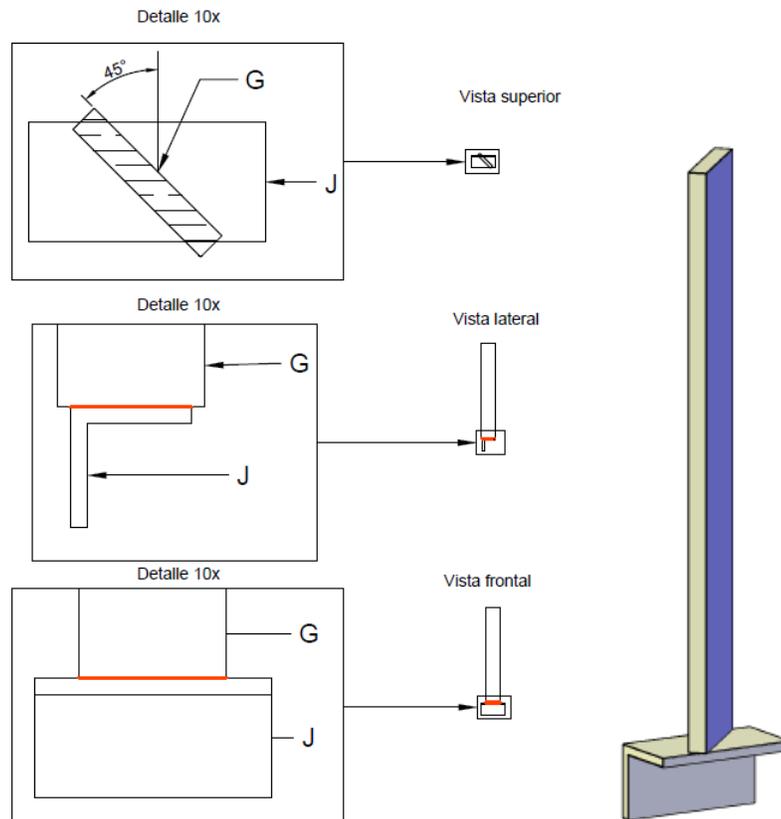
Para elaborar cada juego de paleta delgada individual se soldaron dos tramos N de varilla entre si perpendicularmente y reposando al centro de un tramo J (Figura 39). Se usaron 8 juegos de paletas delgadas.



**Figura 39.** Soldado de paleta individual delgada. Izquierda: Vista superior, lateral y frontal y en acercamiento. Derecha: Vista tridimensional

### 2.5.3 Paleta individual (gruesa)

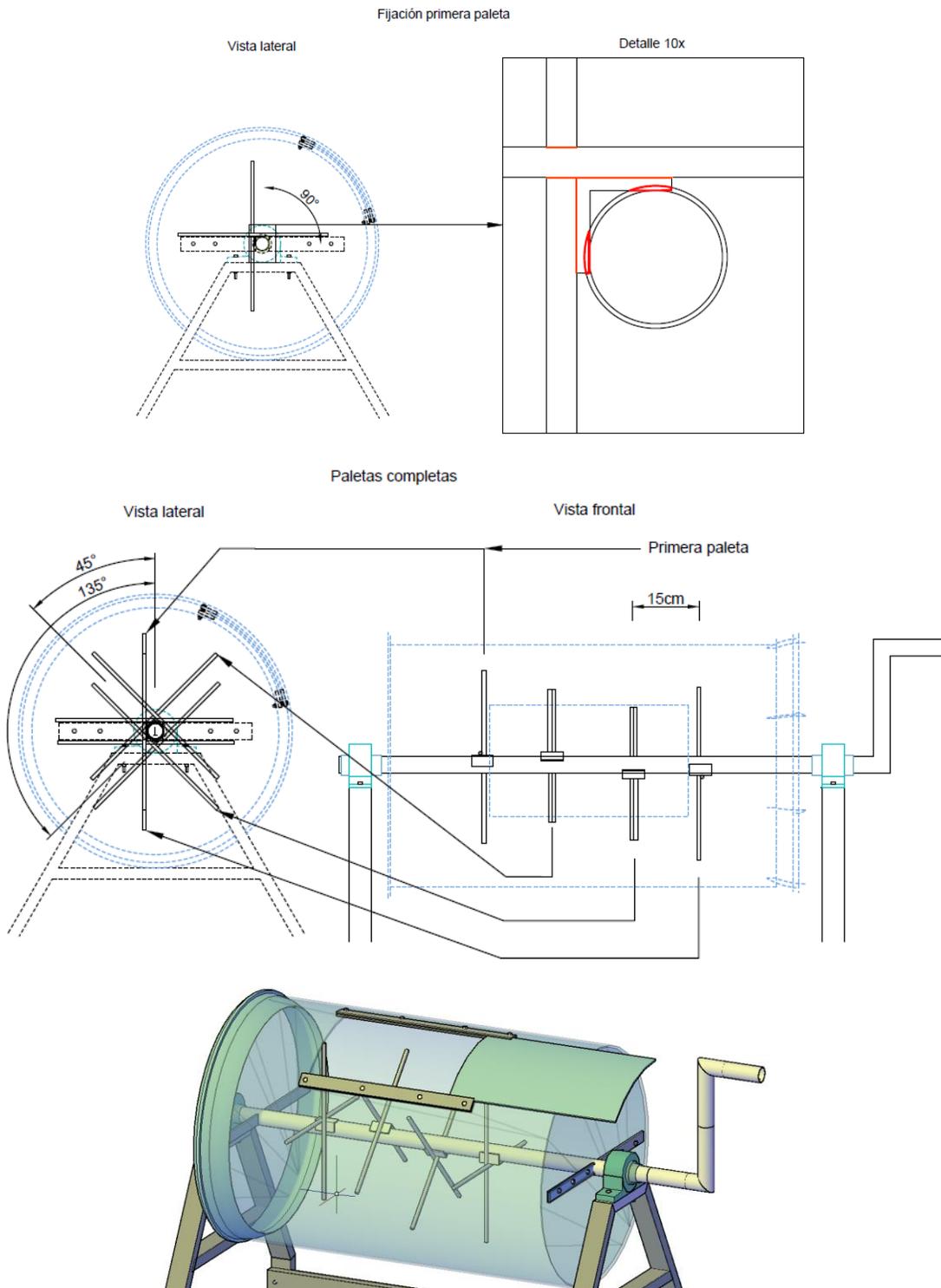
Para elaborar cada juego de paleta gruesa individual se soldó un tramo G sobre un tramo J y girando el tramo G 45° sobre su propio eje. Se usaron 12 juegos de paletas gruesas.



**Figura 40.** Soldado de paleta individual gruesa. Izquierda: Vista superior, lateral y frontal y en acercamiento. Derecha: Vista tridimensional

### 2.5.4 Paletas a eje (delgadas)

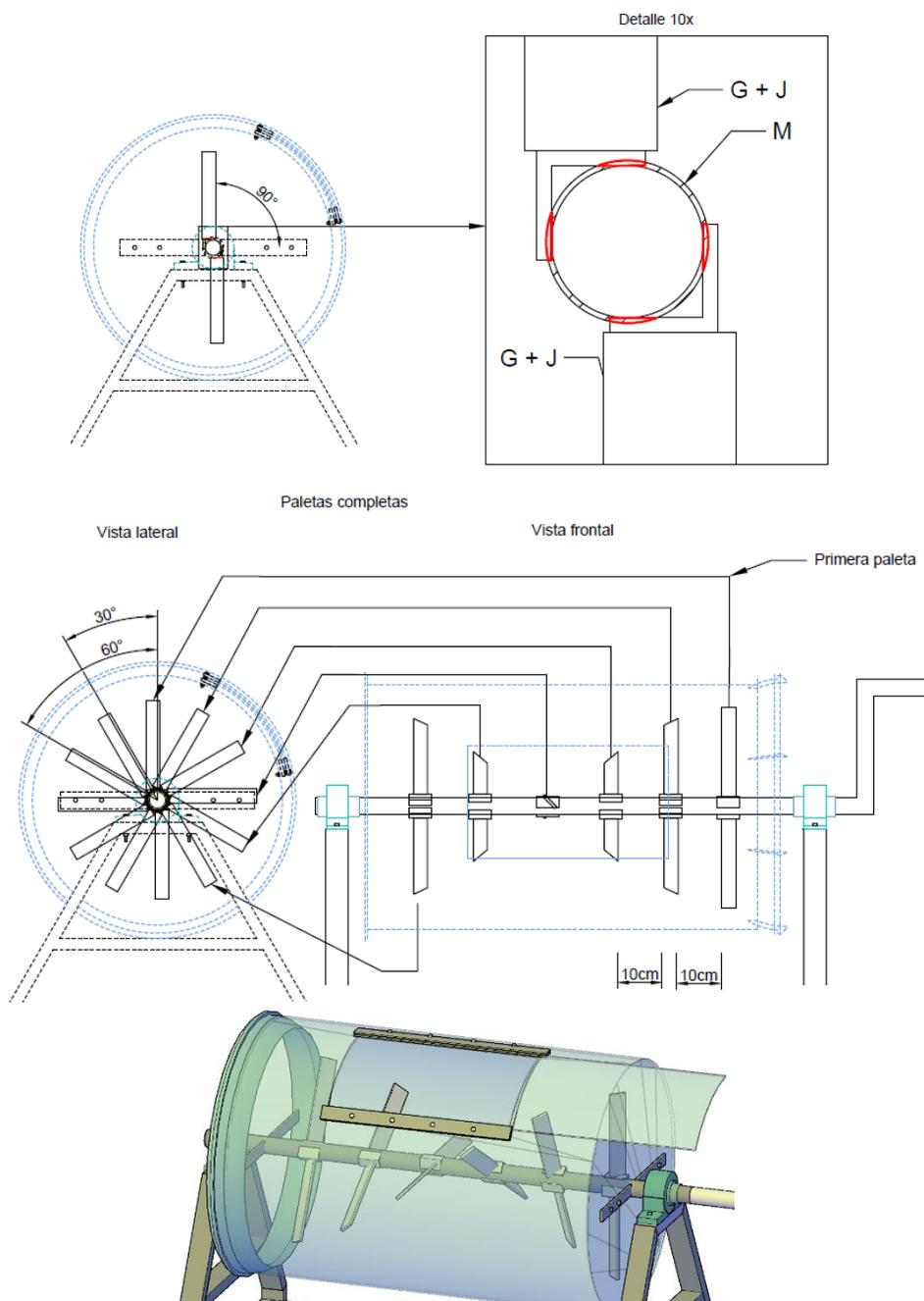
Cada juego de paletas delgadas se soldó con una separación de 15 cm a lo largo del eje. La primera paleta se soldó en el lado superior izquierdo en la vista lateral, y las paletas siguientes se sueldan con ángulos de 45° y 135° y 180° las respecto de la primera paleta como se describe en la Figura 41.



**Figura 41.** Soldado de paletas delgadas a eje. Arriba: Vista lateral y acercamiento del soldado de primera paleta. Centro: Vista lateral y vista frontal del juego de paletas completo. Abajo: Vista tridimensional

### 2.5.5 Paletas a eje (gruesas)

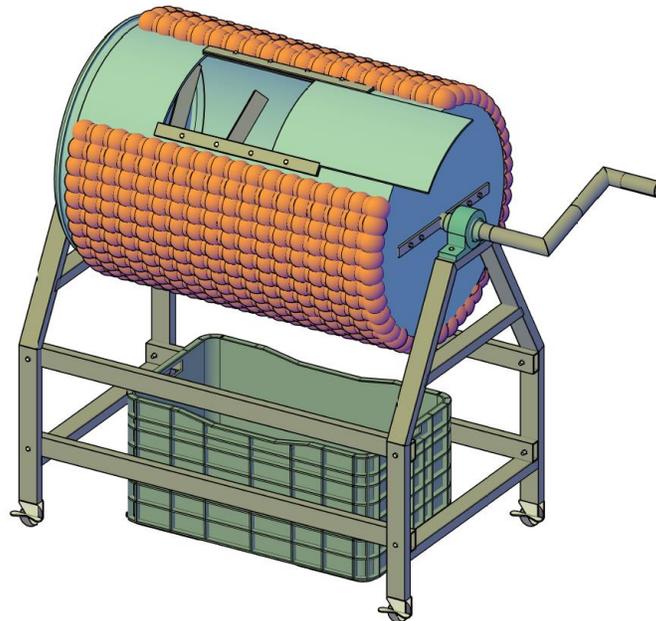
Las paletas gruesas se soldaron por juego de dos paletas en el mismo punto, pero en contra esquina de cada uno, con una separación de 10 cm y girando con un ángulo incremental de  $30^\circ$  entre cada juego como se muestra en la Figura 42.



**Figura 42.** Soldado de paletas gruesas a eje. Arriba: Vista lateral y acercamiento del soldado de primera paleta. Centro: Vista lateral y frontal del juego de paletas completo. Abajo: Vista tridimensional

## 2.6 Aislamiento térmico, pintura, engrasado de rodamientos y ruedas, cajón de vaciado

Los composteros con aislamiento fueron cubiertos en toda la superficie del lado largo del cilindro con espuma de poliuretano (Figura 43). Por último, todos los composteros se pintaron para prevenir la oxidación, los rodamientos y ruedas se engrasaron, y se deslizó un cajón debajo para recuperar la composta terminada.



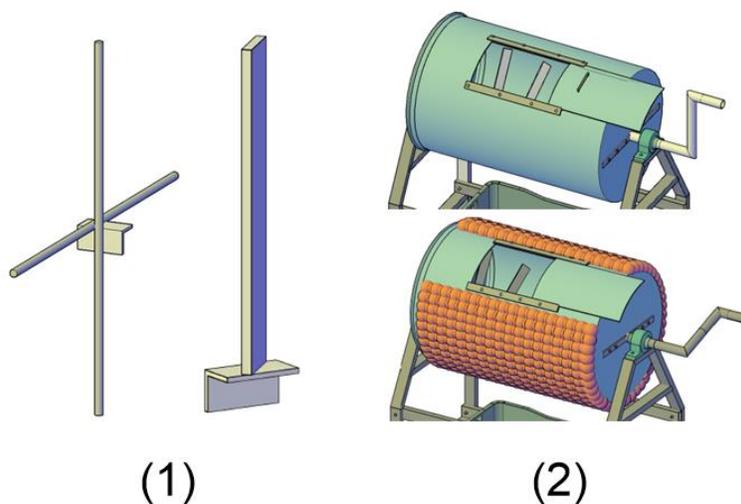
**Figura 43.** Tambor rotatorio final con aislamiento térmico y cajón de vaciado

## Capítulo 3. Experimento de compostaje

### 3.1 Instalación

Se construyeron y ensamblaron en total cuatro prototipos distintos, identificados como: Compostero Aislado con Paletas Gruesas (CAPG), Compostero Aislado con Paletas Delgadas (CAPD), Compostero Sin aislar con Paletas Delgadas (CSPD) y Compostero Sin Aislar con Paletas Gruesas (CSPG) (Figura 44).

Además, fueron adquiridos dos composteros rotatorios comerciales marca *FCMP Outdoor* modelo *IM 4000* de 85 litros (como el que se describe en la Sección 1.3, Figura 17) con el fin de ser usados como control con una réplica (CC). En la Tabla 9 se describen los detalles de todos los composteros incluyendo el control. En el experimento quedaron un total de 6 composteros como se muestra en la Figura 45.

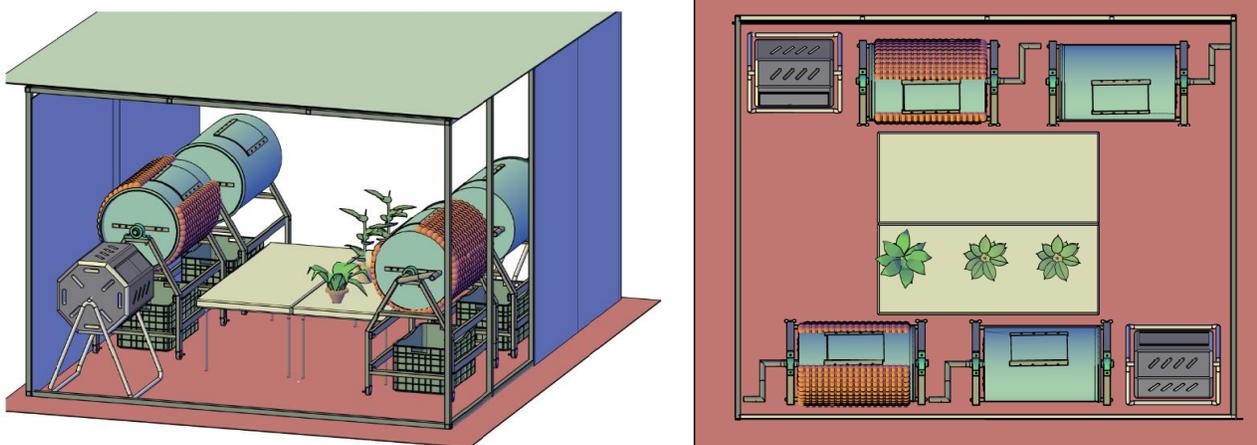


**Figura 44.** Características de diseño de los composteros a evaluar en el experimento (1) Sistema de paletas gruesas y delgadas y (2) Uso de aislante térmico

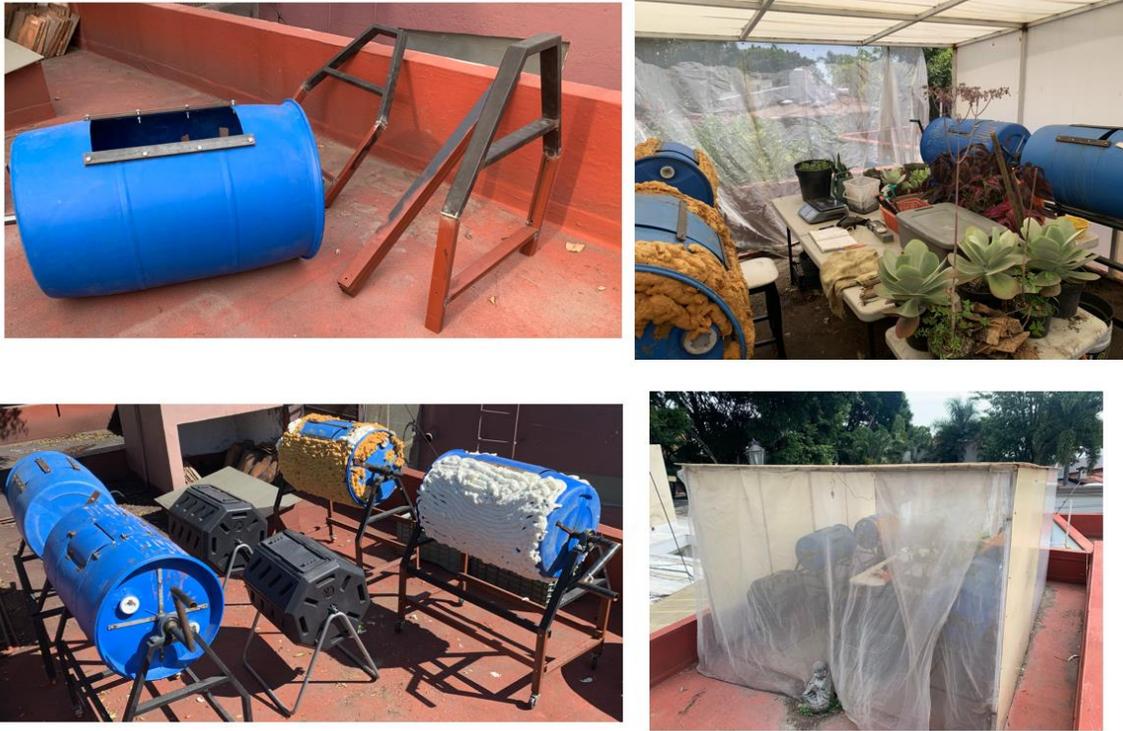
**Tabla 9.** Características de cada compostero utilizado en el ensayo

	Compostero Comercial	Prototipos de composteros			
Código/Abreviación	CC	CAPD	CAPG	CSPD	CSPG
Color	Negro	Azul			
Capacidad	85 l	220 l			
Forma	Poliedro	Cilíndrico			
Material	Plástico				
Peso aproximado.	12kg	30kg			
Dimensiones totales	65 cm ancho, 76 cm largo, 105 cm alto	60cm ancho, 150 cm largo, 130 cm alto			
Dimensiones del contenedor	50 cm diámetro 60 cm altura	60 cm diámetro, 90 cm altura.			
Relación As/V	19.8 m <sup>-1</sup>	10.8 m <sup>-1</sup>			
Llantas	Ausentes	Presentes			
Paletas de mezclado	Ausentes	Delgadas	Gruesas	Delgadas	Gruesas
Aislamiento	Ausente	Presente	Presente	Ausente	Ausente

Los composteros se instalaron sobre una azotea y bajo un techo de policarbonato para protegerlos del clima, se distribuyeron en orden aleatorio, dejando espacio libre para dos mesas de trabajo (Figuras 45 y 46).



**Figura 45.** Vista tridimensional y superior de la instalación del experimento



**Figura 46.** Fotografías de la instalación del ensayo

### 3.2 Acopio Comunitario

Se entrevistó e invitó a seis hogares vecinos a participar en el proceso de una composta comunitaria, haciéndoles entrega de una cubeta de plástico reutilizada de 20 litros, la cual fue utilizada para acopiar sus residuos de cocina. Se solicitó que dicha cubeta fuera entregada tan pronto se llenara para luego devolverles otra cubeta limpia en su domicilio para reiniciar el proceso. Se les especificó a los hogares que agregaran todos sus residuos de cocina, incluyendo comida preparada o echada a perder y productos de origen animal. Los residuos de cocina acopiados fueron triturados con pinzas de jardín hasta obtener una masa homogénea con pedazos menores a 4 cm, aumentando su densidad de 410 a 650 g/l aproximadamente (Figura 47).

Paralelamente, se acopiaron hojas secas de los árboles locales y, utilizando un triturador de hojas eléctrico casero marca SunJoe modelo SDJ616, fueron trituradas para reducir su volumen a la mitad, duplicando aproximadamente su densidad de 50 a 100 g/l. Las hojas húmedas se dejaron deshidratar al sol previo a su trituración (Figura 47).



**Figura 47.** Fotografías durante el experimento: Secado y triturado de hojas secas (material leñoso). Acopio y triturado de residuos de cocina (material fresco)

### 3.3 Composición del sustrato y relación C:N inicial

Con el fin de agregar un sustrato idéntico a todos los composteros y observar las diferencias debidas al diseño se consideró una proporción de 3.7 partes de residuos de cocina como material fresco por cada parte de material leñoso (hojas secas) que se calculó de la siguiente manera:

Según la Ecuación 1, donde C y N son las proporciones de carbono y nitrógeno, y Q la cantidad de material fresco y leñoso (1 y 2 respectivamente).

$$C:N = \frac{\text{Carbono}}{\text{Nitrógeno}} = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2}{N_1Q_1 + N_2Q_2} = k$$

(Ec. 1)

La Ecuación 1 se puede reescribir tomando en cuenta la proporción de humedad

como en la Ecuación 2:

$$\frac{Q_1C_1(1 - H_1) + Q_2N_2(1 - H_2)}{Q_1N_1(1 - H_1) + Q_2N_2(1 - H_2)} = k$$

(Ec. 2)

De la Ecuación 2, se puede despejar  $Q_1$  para conocer la proporción de material 1 (fresco) dada una proporción unitaria ( $Q_2 = 1$ ) de material 2 (leñoso), y una tasa C:N (k) buscada, como en la Ecuación 3.

$$Q_1 = \frac{kN_2(1 - H_2) - C_2(1 - H_2)}{C_1(1 - H_1) - kN_1(1 - H_1)}$$

(Ec. 3)

Dados:

- Material 1 (fresco): Residuos de cocina con 90% de humedad, 45% de contenido de carbono y 3% de contenido de nitrógeno.
- Material 2 (leñoso): Hojas secas con 20% de humedad, 50% de contenido de carbono y 0.75% de nitrógeno.
- Tasa C:N buscada: 25.

Sustituyendo, se obtiene  $Q_1 = 3.7$  en términos de  $Q_2 = 1$ , es decir una proporción de 3.7 veces la cantidad material fresco por cada parte de material leñoso.

### 3.4 Manejo de experimentos

El primer experimento fue llevado a cabo de noviembre de 2022 a mayo de 2023 donde semanalmente y de manera aleatoria cada uno de los composteros fue llenado con sustrato elaborado con el acopio semanal, en la proporción descrita en la sección anterior (3.7 partes de material fresco por cada parte de material leñoso) y hasta el 85% de la capacidad de cada compostero. El orden de llenado fue seleccionado aleatoriamente y se agregó un 10% de composta madura al inicio como inoculante. Una vez llenado el último tratamiento se volvieron a alimentar en el mismo orden y siempre hasta el 85% de su capacidad para permitir el mezclado. Durante los días en fase activa ( $>45^{\circ}\text{C}$ ), se hicieron dos volteos por día. Una vez que la temperatura descendió de  $45^{\circ}\text{C}$  se redujo el volteo a una vez por semana. Los volteos consistieron en diez rotaciones completas en ambos sentidos. Los composteros se dejaron de alimentar a las 18 semanas, después de haber sido agregado material adicional en tres ocasiones, dejando reposar posteriormente 4 semanas dentro del contenedor y 2 semanas

en el cajón de vaciado, con una duración total de 24 semanas por cada tratamiento. No se consideraron análisis de estabilidad debido al tiempo transcurrido.

De la composta final reposada se realizaron análisis en sitio de masa y volumen finales y fraccionamiento de partículas, y se tomó 1 kg de muestra para los análisis microbiológicos y fisicoquímicos (en laboratorios). Adicionalmente se realizó un segundo experimento de mayo a julio de 2023 con una duración de 12 semanas manejado de la misma manera que el primero, pero con el fin de obtener únicamente datos del comportamiento de la temperatura durante esta temporada, sin realizar ningún análisis adicional de la composta obtenida.

### 3.5 Registro de evolución de temperatura

La temperatura de los composteros fue tomada diariamente a las 18:00 horas con un termómetro de laboratorio de inmersión (Brannan).

### 3.6 Análisis en sitio

El análisis en sitio consistió en la medición de la reducción masa y volumen, y el fraccionamiento de partículas. Para lo primero se utilizaron una báscula comercial y cubetas de plástico midiendo el sustrato agregado y retirado de cada compostero, para la reducción de masa se consideró el peso en seco de la composta extraída. El fraccionamiento de partículas se realizó pasando el sustrato final por tamices con mallas de 10, 3 y 1 mm de grosor y pesando cada fracción separada.

### 3.7 Análisis Microbiológico

El análisis microbiológico se realizó en la Unidad de Diagnóstico y Servicios Especializados de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR). Para el análisis microbiológico se tomó 1 kg de muestra de composta de cada compostero cumplidas 24 semanas transcurridas desde el inicio de cada ensayo. Las muestras fueron procesadas y analizadas el mismo día que se tomaron.

Las muestras fueron analizadas con el objetivo de identificar la presencia de posibles patógenos y determinar su concentración, así como la de bacterias y hongos en cada compostero, para lo cual se utilizaron dos medios de cultivo selectivos: Agar Endo y Agar VB (Verde Brillante), el primero es un medio selectivo para bacterias Gram negativas y semidiferencial para *E. coli*, en el que sus colonias presentan una coloración rosa a rojizo, con un superficie verde metálico y oscurecimiento del medio que rodea a las colonias, mientras que el segundo es un medio selectivo para el aislamiento para bacterias Gram positivas y preferentemente de variedades de *Salmonella*, que presentan una coloración roja, y también *E. coli*, que desarrolla colonias con coloración amarillo-verdosa (Zimbo y Powder, 2009). Adicionalmente, se cultivó una muestra control de composta en fase activa (tomada aleatoriamente) con el fin de tener un parámetro de referencia.

#### 3.7.1 Cultivo de muestras

Se agitaron por 15 minutos 10 gramos de muestra fresca en diluciones 1:3.5 o 1:5 dependiendo de la eficiencia para resuspender la muestra en solución salina estéril, este fue un primer proceso de dilución de la muestra (FD<sub>1</sub>). Del material resuspendido se realizaron

tres diluciones decimales adicionales, con factores de dilución de 10, 100 y 1000, en microtubos. Posteriormente, se inocularon 100 µl de cada dilución en cada medio de cultivo, utilizando perlas de vidrio para dispersar por toda la caja y se dejaron incubar por 24 horas a 37°C.

Las colonias con superficie verde metálico (sugentes de la presencia de *E. coli*) y demás bacterias y hongos detectados, fueron contadas en la dilución que permitiera contar con mayor precisión (FD<sub>2</sub>) y se calculó la concentración por gramo de composta según la Ecuación 4.

$$\frac{\# \text{ de UFC u hongos}}{100 \mu l} * 1000 * FD_1 * FD_2 = \frac{UFC}{g}$$

(Ec. 4)

Donde:

*FD*<sub>1</sub> = Factor de dilución inicial de la muestra de composta

*FD*<sub>2</sub> = Factor de dilución donde se contaron las UFC u hongos (1, 10, 10<sup>2</sup> o 10<sup>3</sup>)

### 3.8 Análisis Físicoquímico

El análisis físicoquímico se realizó en el Laboratorio de Análisis de Suelos del Instituto de Ecología (INECOL). Para el análisis físicoquímico se tomó 1 kg de muestra por cada compostero transcurridas 24 semanas del período de inicio de cada tratamiento y fueron refrigeradas en bolsas de plástico a 5°C de una a seis semanas para ser analizadas posteriormente en laboratorio de manera simultánea. Para el CC (Compostero Control) se tomó una sola muestra sin réplica. Los análisis se realizaron con base en las metodologías

indicadas por la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

### 3.8.1 Humedad y Materia orgánica

La humedad final se determinó según el método gravimétrico por diferencia de masas AS-05 (NOM-021-SEMARNAT-2000) secando una muestra fresca de 5g a 100°C por 24 horas utilizando un Horno de convección marca Felisa modelo FE-292AD, según la Ecuación 5:

$$\%HF = 100 * \frac{\text{Peso muestra humeda} - \text{Peso muestra seca}}{\text{Peso muestra humeda}}$$

(Ec. 5)

El contenido de materia orgánica fue determinado según el método por cenizas AS-07 (NOM-021-SEMARNAT-2000) calcinando una muestra seca de 2g a 520°C por 4 horas utilizando una Mufla marca Thermolyne y según la Ecuación 6:

$$\%MO = 100 - \frac{\text{Peso cenizas} * 100}{2g}$$

(Ec. 6)

### 3.8.2 Densidad aparente y real, Porosidad, y Espacio de aire libre.

La densidad aparente se determinó utilizando una probeta de 10 ml y parte de la muestra seca según la Ecuación 7:

$$\rho_a = \frac{\text{Peso m. s.}}{10 \text{ ml}}$$

(Ec. 7)

La densidad real se determinó según la Ecuación 8 utilizando una muestra seca de 5g, un picnómetro de 50 ml y agua destilada.

$$\rho_r = \frac{\text{Peso m. s.}}{((\text{Peso picn.} + \text{m. s.} + \text{agua}) - \text{Peso m. s.}) - (\text{Peso picn.} + \text{agua})}$$

(Ec. 8)

Una vez con ambas densidades se calculó la porosidad con la Ecuación 9:

$$\phi = \frac{\rho_r - \rho_a}{\rho_r}$$

(Ec. 9)

El EAL (Espacio de Aire Libre) se obtuvo considerando la porosidad y humedad según la Ecuación 10:

$$EAL = \phi(1 - \%Hum)$$

(Ec. 10)

### 3.8.3 pH y Conductividad eléctrica

El pH se midió utilizando un medidor Oakton, PC 700 y la conductividad eléctrica se midió utilizando un conductímetro Corning, Pinnacle 541, ambos medidores fueron

calibrados con soluciones patrón al momento de hacer la medición. Para estos análisis se utilizó una dilución composta fresca-agua de 1:4.

### 3.8.4 Nitrógeno en forma de amonio y nitrato e Índice de nitrificación

Se determinaron según el método para la determinación de nitrógeno inorgánico extraíble AS-08 (NOM-021-SEMARNAT-2000), utilizado como índice de disponibilidad de nitrógeno en suelos.

Se tomó una muestra fresca de 5 gramos a la que se le agregaron 50ml de solución extractora de KCl 2N, que se dejó agitar por una hora y posteriormente fue filtrado. De esta solución se tomó una alícuota de 10 ml y se sometió a destilación por arrastre de vapor en presencia de MgO para determinar amonio y después en presencia de aleación devarda para determinar nitratos. El vapor se recuperó en una solución indicadora de 10ml H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, que se tituló con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta adquirir un color transparente. Se agitó y destilo junto con las demás muestras una muestra blanco con la misma cantidad de solución extractora.

El valor de N en mg/l se obtuvo según los ml de ácido utilizados para titular según la ecuación 11:

$$N(NH_4^+, NO_3^-)_{ppm} = (M - B) * N * 14 * \left(\frac{V_i}{a}\right) * \frac{1}{p} * 1000$$

(Ec. 11)

Donde; M y B: Son los ml de ácido sulfúrico usados en la titulación muestra objetivo y blanco, N: Normalidad del ácido sulfúrico usado (0.0093N), V<sub>i</sub>: Volumen del indicador, a: alícuota tomada, y, p: peso de la muestra utilizada.

El Índice de Nitrificación se calcula dividiendo la concentración en forma de amonio entre la concentración en forma de nitrato como en la ecuación 12:

$$\text{Índice de Nitrificación (IN)} = \frac{N - NH_4^+ \text{ ppm}}{N - NO_3^- \text{ ppm}}$$

(Ec. 12)

### 3.8.5 Fósforo extraíble

El fósforo extraíble se determinó según el método AS-10 (NOM-021-SEMARNAT-2000) en suelos de neutros a alcalinos (OLSEN) debido a que las muestras de composta tenían un pH alcalino. Se tomó una muestra seca de 2.5 g a la que se le adicionaron 50 ml de solución extractora de  $\text{NaHCO}_3$  y se agitó por 30 minutos. De esta solución se tomó una alícuota y se le agregó una solución de molibdato de amonio con ácido ascórbico, para ser posteriormente leída utilizando un Espectrofotómetro de luz UV-VIS UV1900 marca Shimadzu. El valor de fósforo disponible en ppm se obtuvo según la Ecuación 13:

$$P_{ppm} = CC * \frac{V_i}{p} * \frac{V_f}{a}$$

(Ec. 13)

Donde; CC =  $\text{mg kg}^{-1}$  en solución leída por el espectrofotómetro,  $V_i$  = Volumen de solución extractora,  $p = 2.5\text{g}$ ,  $V_f$  = Volumen final leído y  $a$  = alícuota utilizada.

### 3.8.6 Relación C:N

Para obtener la relación C:N se determinó el porcentaje de carbono y nitrógeno en un analizador elemental automático basado en el método Dumas, (modelo TrueSpec CN marca LECO).

Para este análisis utilizó una muestra tamizada de 0.2 gramos de suelo seco.

El resultado es leído en términos de % total de cada elemento. Para obtener la relación C:N se dividieron entre sí como en la Ecuación 14.

$$C:N = \frac{\%C}{\%N}$$

(Ec. 14)

### 3.8.7 Micronutrientes

Las concentraciones de micronutrientes disponibles (Fierro, Cobre, Manganeso y Zinc) se determinaron por fotometría de emisión de llama utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica AA240FS Varían por el método AS-14 (NOM-021-SEMARNAT-2000). Esta metodología utiliza como solución extractora DTPA (ácido dietilen-diamino-pentaacético) que disuelve los metales presentes en formas precipitadas.

Se tomó una muestra de 10g de suelo seco a la que se le agregó 40ml de solución de DTPA extractora. La suspensión se dejó agitar por dos horas y fue filtrada con papel. De este extracto se tomó una alícuota de 1ml en 10 ml de agua desionizada la cual fue leída en el espectrofotómetro de absorción atómica. La concentración en ppm o mg/kg se calcula según la ecuación 15:

$$(Cu, Mn, Fe, Zn) \frac{mg}{kg} = \text{Muestra leída} * 40$$

(Ec. 15)

## 3.6 Análisis estadísticos y Programas utilizados

### 3.6.1 Análisis estadísticos

Se utilizaron estadísticos descriptivos y se generaron gráficos para analizar las variables de comportamiento de temperatura de los dos experimentos. Se generaron gráficas para los datos de análisis en sitio y de parámetros microbiológicos y fisicoquímicos del primer experimento.

Además, con los datos de las muestras del primer experimento, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para visualizar los principales cambios que ocurren en las variables de comportamiento de temperatura, reducción de masa y volumen y parámetros fisicoquímicos entre los cinco tipos de composteros giratorios (CAPG, CAPD, CC, CSPG Y CSPD).

Las variables que se estudiaron son: Temp. promedio (xtemp), Temp. mínima (mint), Temp máxima (maxt), N.º días a más de 45°C (dt45), N.º a más de 50°C (dt50), N.º días a más de 55°C (dt55), Reducción de masa (rm), Reducción de volumen (rv), Humedad final (hf), Materia orgánica (mo), Densidad Aparente (da), Densidad real (dr), Porosidad (phi), pH (ph), Conductividad Eléctrica (ce), Nitrógeno en forma de Amonio en ppm (nh4), Nitrógeno en forma de nitrato en ppm (no3), Tasa C:N (cn), Fósforo extraíble en ppm (p), Hierro en ppm (fe), Cobre en ppm, (cu), Manganeso en ppm (mn) y Zinc en ppm (zn).

Por último, se generó una matriz de correlaciones con estas mismas variables con el objetivo de encontrar correlaciones significativas ( $P \leq 0.05$ ) entre éstas.

### 3.6.2 Programas utilizados

Se utilizó el programa Microsoft Excel (Office 365 Ver. 2312) para el vaciado y procesamiento de los datos, el programa estadístico R (4.3.1) con la paquetería ggplot2 para la generación de gráficos, el programa Corel Photo-Paint 2021 para el procesamiento de imágenes y la versión gratuita de XLSTAT (25.3.1.0) para los análisis estadísticos.

## Capítulo 4. Resultados y discusión del experimento

Al momento de vaciado de la composta en cajones la temperatura de todos los composteros se encontraba ya cercana a la del ambiente (25°C) (Figura 48). Uno de los tratamientos del CC (CC1) presentó fauna indeseada.



**Figura 48.** Vaciado de composteros, análisis en sitio, y en laboratorio

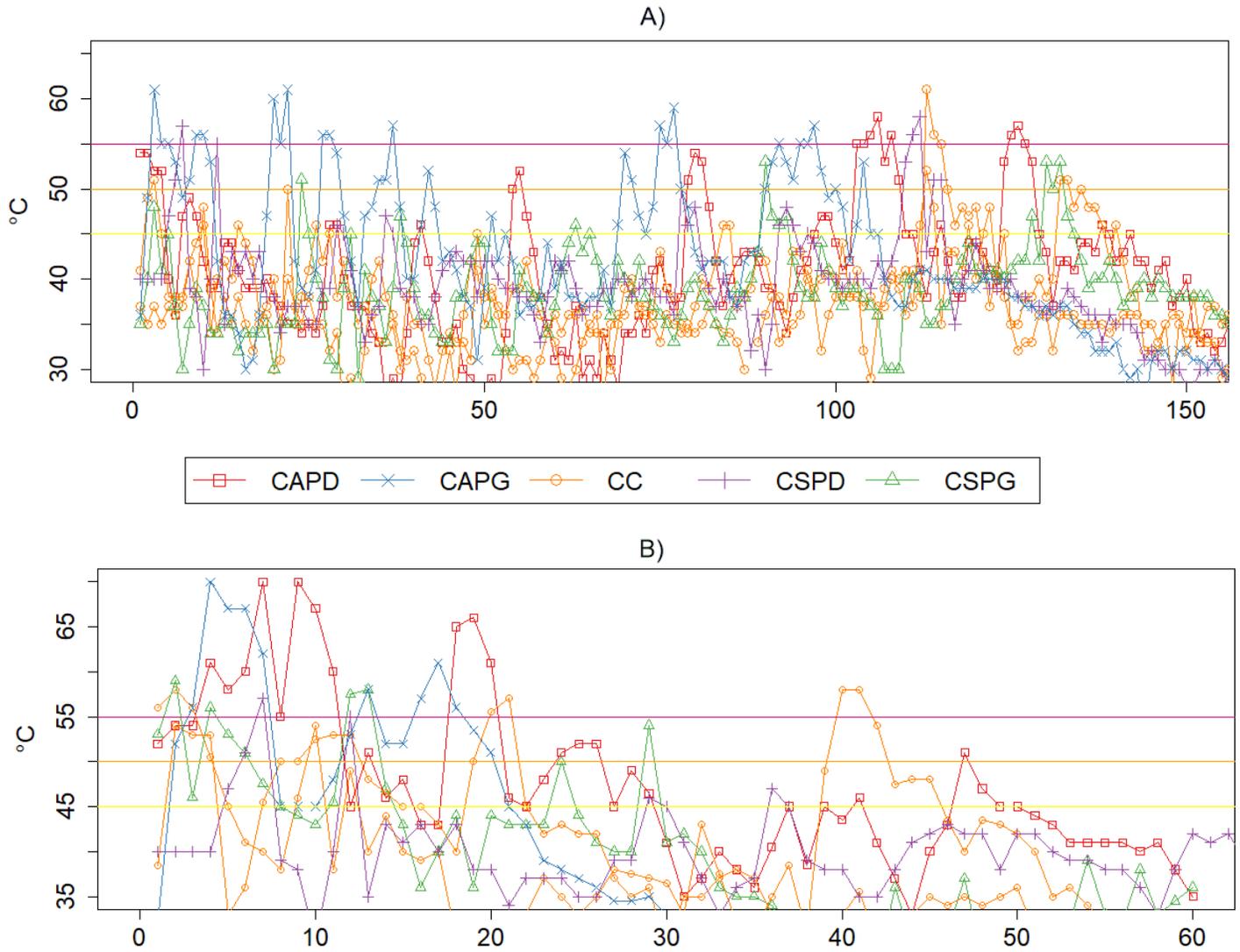
## 4.1 Comportamiento de Temperatura

### 4.1.1 Evolución de temperatura diaria

Todos los composteros alcanzaron temperaturas adecuadas para la degradación ( $>45^{\circ}\text{C}$ ), sin embargo, solo aquellos con aislamiento la mantuvieron por arriba de  $55^{\circ}\text{C}$  por tres días consecutivos que según lo indicado por la NMX-AA-SCFI-2018, asegura la esterilización y eliminación de patógenos. El aislamiento también incidió en que, se mantuvieran mayores temperaturas promedio y por mayor tiempo en fase termófila y arriba de  $50^{\circ}\text{C}$  y  $55^{\circ}\text{C}$  (Figuras 49 y 50).

La temperatura de todos los composteros fluctuó entre  $30^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$  en el período noviembre-mayo (noviembre 2022 – mayo 2023) y entre  $40$  y  $60^{\circ}\text{C}$  en el período mayo-julio (mayo 2023 – julio 2023), aumentando cada vez que se agregaban residuos frescos.

Los composteros CAPG y CSPD descendieron su temperatura desde el día 110, mientras que los demás tratamientos siguieron en fase activa incluso hasta los días 120 y 130 indicando un proceso más retrasado para alcanzar estabilidad. A partir del día 150 las temperaturas de todos los composteros disminuyeron a un nivel muy cercano a la temperatura ambiente.



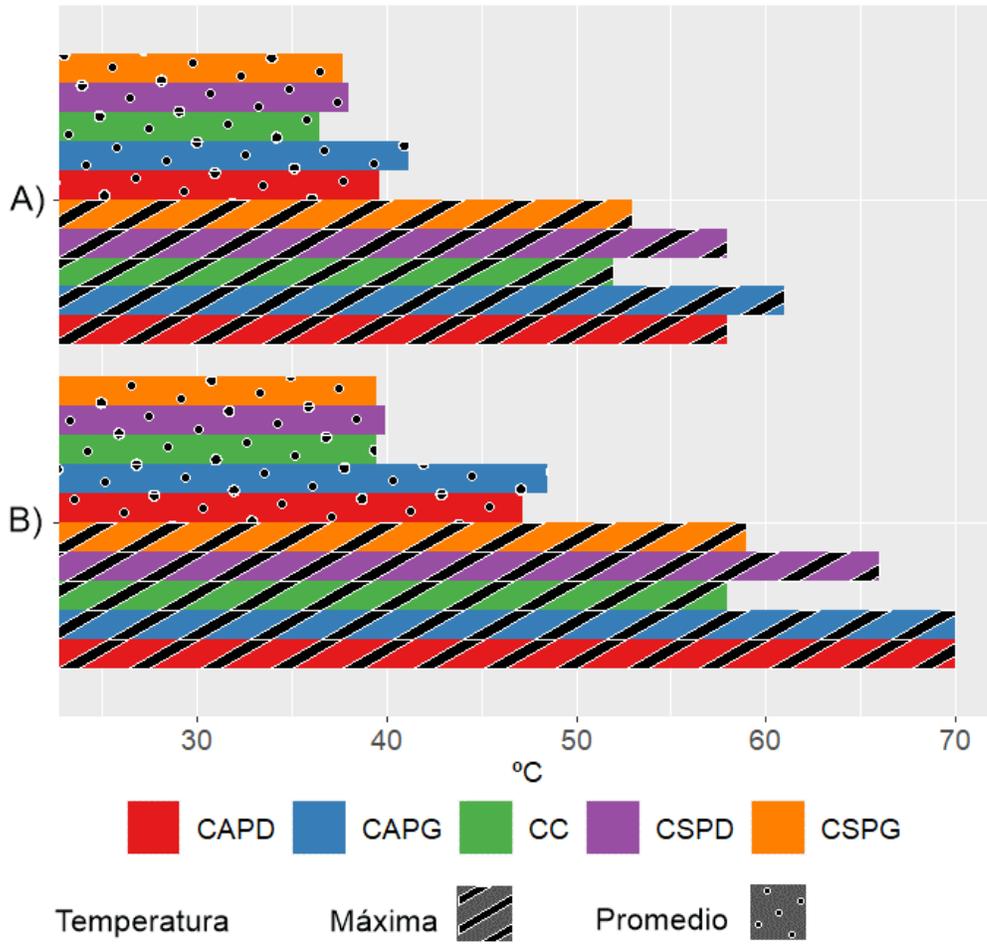
**Figura 49.** Temperatura (eje vertical) por día de ejecución (eje horizontal) en cada compostero y temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio. Líneas magenta, naranja y amarilla indican 55, 50 y 45 grados respectivamente

#### 4.1.2 Temperatura promedio y máxima

La presencia de aislante térmico de espuma de poliuretano incidió en mantener una temperatura promedio hasta 4°C y 7 °C mayor en comparación a los composteros sin aislante, durante los períodos de noviembre-mayo y de mayo-julio respectivamente (Figura 50 A y B). Los composteros sin aislar y el CC rondaron los 40°C de temperatura promedio en ambos períodos.

En cuanto a temperatura máxima, los composteros aislados llegaron hasta 57-62°C y 63-70°C en los períodos noviembre-mayo y mayo-julio respectivamente. El CAPD mantuvo 70°C (temperatura límite) por dos días mientras que el CAPG solo por un día, posiblemente debido a que las paletas gruesas ayudaron a airear y evitar más eficientemente el exceso de calor en el caso de los composteros con aislamiento.

En los composteros sin aislar paso de manera inversa, el CSPD alcanzó la temperatura más alta durante ambas temporadas, por lo que en este caso la aireación fue más adecuada con paletas delgadas y evito el sobre enfriamiento por exceso de aireación en comparación con los de paletas gruesas, llegando incluso a más de 65°C durante el período mayo-julio (Figura 50B).

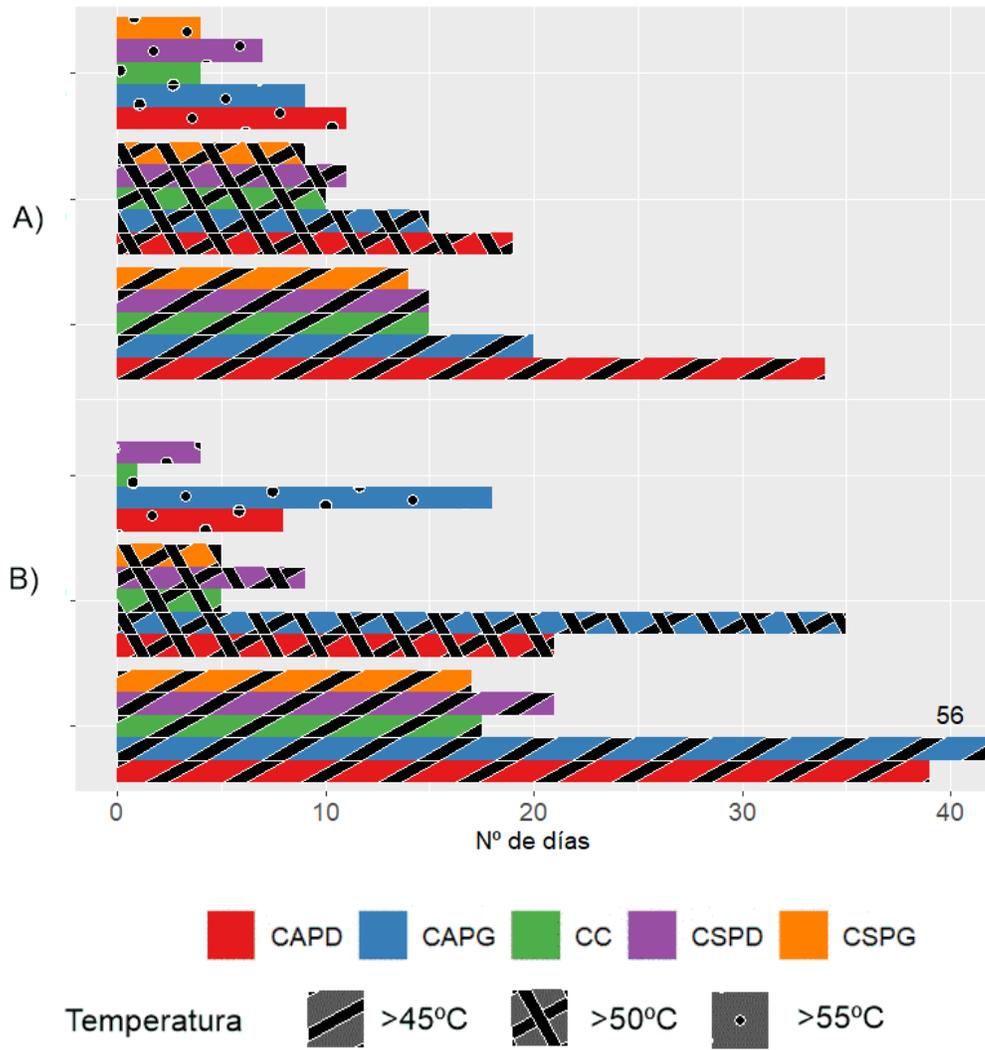


**Figura 50.** Temperatura máxima y promedio (eje horizontal) por temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio y compostero (color)

#### 4.1.3 Número de días con temperaturas con temperaturas mayores a 45, 50 y 55 grados.

Los tratamientos aislados mantuvieron una mayor cantidad de días a más de 45°C, 50°C y 55°C (Figura 51). El CAPG contó la mayor cantidad de días en estas temperaturas durante noviembre-mayo. Por otro lado, el CAPD alcanzó mayores porcentajes de días en las mismas durante el período mayo-julio. Los composteros sin aislamiento obtuvieron una cantidad similar al CC, con el CSPD teniendo un poco mayor que el CSPG debido al exceso de aireación en este último.

En comparación con otros estudios, Arrigoni (2015) obtuvo hasta 70 días en temperaturas mayores a 45°C en su compostero rotatorio, llegando a un máximo de 53°C. Sin embargo, de los prototipos evaluados, los composteros aislados lograron una gran cantidad de días a temperaturas mayores de 50 y 55°C, llegando a estar hasta 18 días arriba de 55°C en el CAPG durante el ensayo noviembre-mayo, una cantidad de días idéntica a los que obtuvieron Vázquez y Soto (2020) en grandes composteros estáticos, aunque bajo un clima más frío.

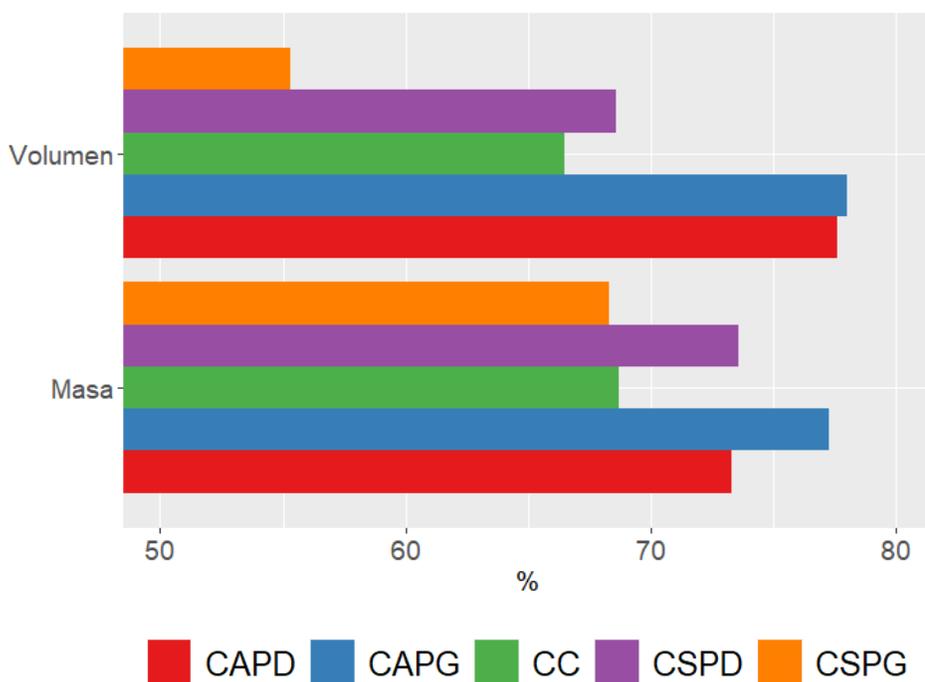


**Figura 51.** Cantidad de días con temperatura mayor a más de a 45°C, 50°C y 55°C (eje horizontal) por temporada: A) noviembre-mayo B) mayo-julio y compostero (color)

## 4.2 Análisis de la composta en sitio

### 4.2.1 Reducción de volumen y masa

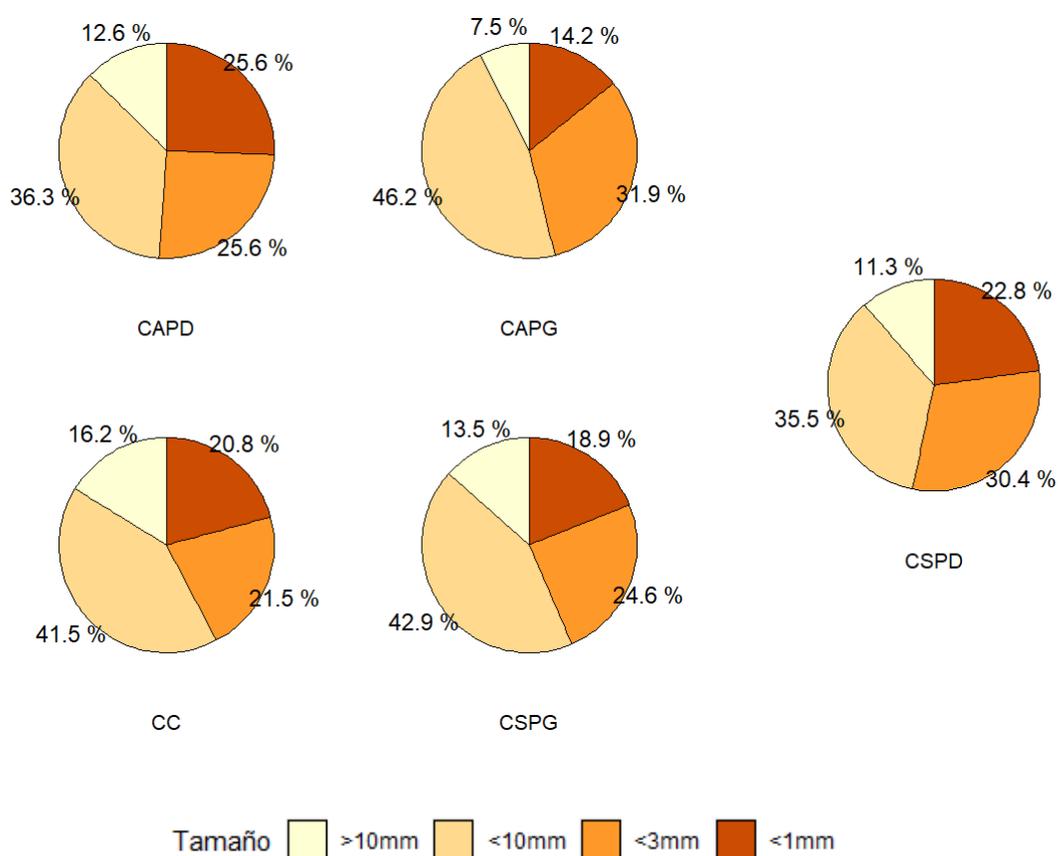
La reducción de masa y volumen se muestra en la Figura 52. El CAPG tuvo la mayor reducción de masa y volumen, seguido por los CAPD y CSPD. La reducción de masa alcanzada en el CAPG es mayor que aquella obtenida en otros estudios, como en el de Karnchanawong et al., (2011) de 47 a 61%, y, en cuanto a la reducción de volumen, en el caso de ambos composteros aislados se aproxima a los valores de 82-84% y 74% obtenidos por Bhave y Joshi (2017) y Juárez Robles B. et al. (2017) respectivamente.



**Figura 52.** Porcentaje de reducción de masa y volumen por compostero

#### 4.2.2 Fraccionamiento de partículas

Las partículas más pequeñas tuvieron una presencia ligeramente mayor en los composteros con paletas delgadas (Figura 53). Los CAPD y CSPD tuvieron un 51.2 y 53.2 % de total partículas menores a 3 mm en comparación con 43.5 y 46.1 % de los CAPG y CSPG. El CC obtuvo la mayor cantidad de partículas de mayor tamaño. Estos resultados coinciden con los de Karnchanawong (2011) que encontró que los composteros con una aireación más moderada lograron una mayor reducción del tamaño de partícula.



**Figura 53.** Fraccionamiento de partículas por compostero

## 4.3 Análisis microbiológico

### 4.3.1 Detección de patógenos

En el medio Endo, las muestras de los CAPD, CSPG y la Muestra control (MC) presentaron algunas colonias con coloración verde metálico, el CC1 en especial, presentó una gran cantidad (Tabla 10), indicativo de una elevada presencia de coliformes, como *E. coli* o bacterias relacionadas (otras bacterias, como *Citrobacter freundii*, también generan colonias con superficie verde metálica). Ninguna de las muestras de los CSPD y CAPG presentaron coloración verde metálico en dilución alguna (Figura 54).

Como comparación, el estudio de Juárez-Robles et al. (2017) mostró una concentración de 390'000 UFC/g de coliformes por el método de fermentación en tubos múltiples, en una pila control que contenía solamente biosólidos provenientes de un proceso de lodos activados. La NMX-AA-SCFI-2018 indica que la composta terminada puede tener un valor máximo permisible de 1000 NMP/g de *E. coli*, por lo que, solamente las muestras de los CAPD, CAPG y CSPD cumplen con la norma en cuanto a calidad microbiológica.

**Tabla 10.** Concentración de UFC de colonias verde metálico (probable *E. coli*) en el medio ENDO en las muestras de cada compostero

Muestra	UFC/g de probable <i>E. coli</i>
MC	1'120
CAPD	490
CC1	2'400'000
CC2	208'000
CSPG	448'000
CSPD	Ausente o Incontable
CAPG	Ausente o Incontable

A pesar de haber obtenido temperaturas sostenidas de 55°C, en el tratamiento del CAPD hubo una pequeña presencia de posibles coliformes, y, por el contrario, en el CSPD, sin haber alcanzado esa condición, no se detectaron bacterias coliformes. Esto pudo haber sucedido debido a que las nuevas incorporaciones de residuos orgánicos pudieron introducir patógenos al material ya esterilizado (Arrigoni et al., 2018).

En comparación, en la muestra control de fase activa, apenas se estimaron poco más de mil colonias por gramo, lo que demuestra que la composta puede quedar adecuadamente desinfectada desde la fase activa. La contaminación de los CC1, CC2 y CSPG puede haber sucedido debido a la presencia de residuos que no alcanzaron una completa degradación que atrajo fauna indeseada al compostero, resultado de no haber mantenido una temperatura elevada en todo el compostero.

En el medio VB, se presentó coloración roja en las muestras de los CAPD, CC y la MC, lo que sugiere la posible presencia de alguna especie de *Salmonella sp.* En la muestra del CC1 también se presentaron colonias con color verde-amarillo en medio VB, apoyando la presencia de *E. coli* en el medio ENDO. De los composteros sin aislar, ninguno presentó coloración roja en el medio VB (Figura 55).



**MC 10<sup>0</sup>**



**CAPG 10<sup>-1</sup>**



**CAPD 10<sup>-1</sup>**



**CC1 10<sup>0</sup>**



**CC2 10<sup>0</sup>**

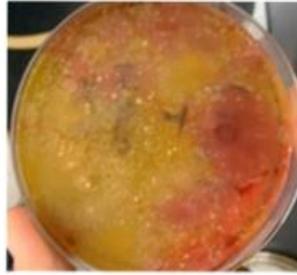


**CSPD 10<sup>-3</sup>**



**CSPG 10<sup>-1</sup>**

**Figura 54.** Fotografías de cultivos en medio ENDO y dilución



**MC 10<sup>-1</sup>**



**CAPD 10<sup>-2</sup>**



**CAPG 10<sup>-3</sup>**



**CC1 10<sup>-1</sup>**



**CC2 10<sup>-1</sup>**



**CSPD 10<sup>-2</sup>**



**CSPG 10<sup>0</sup>**

**Figura 55.** Fotografías de cultivos en medio VB y dilución

#### 4.3.2 Población de bacterias y hongos.

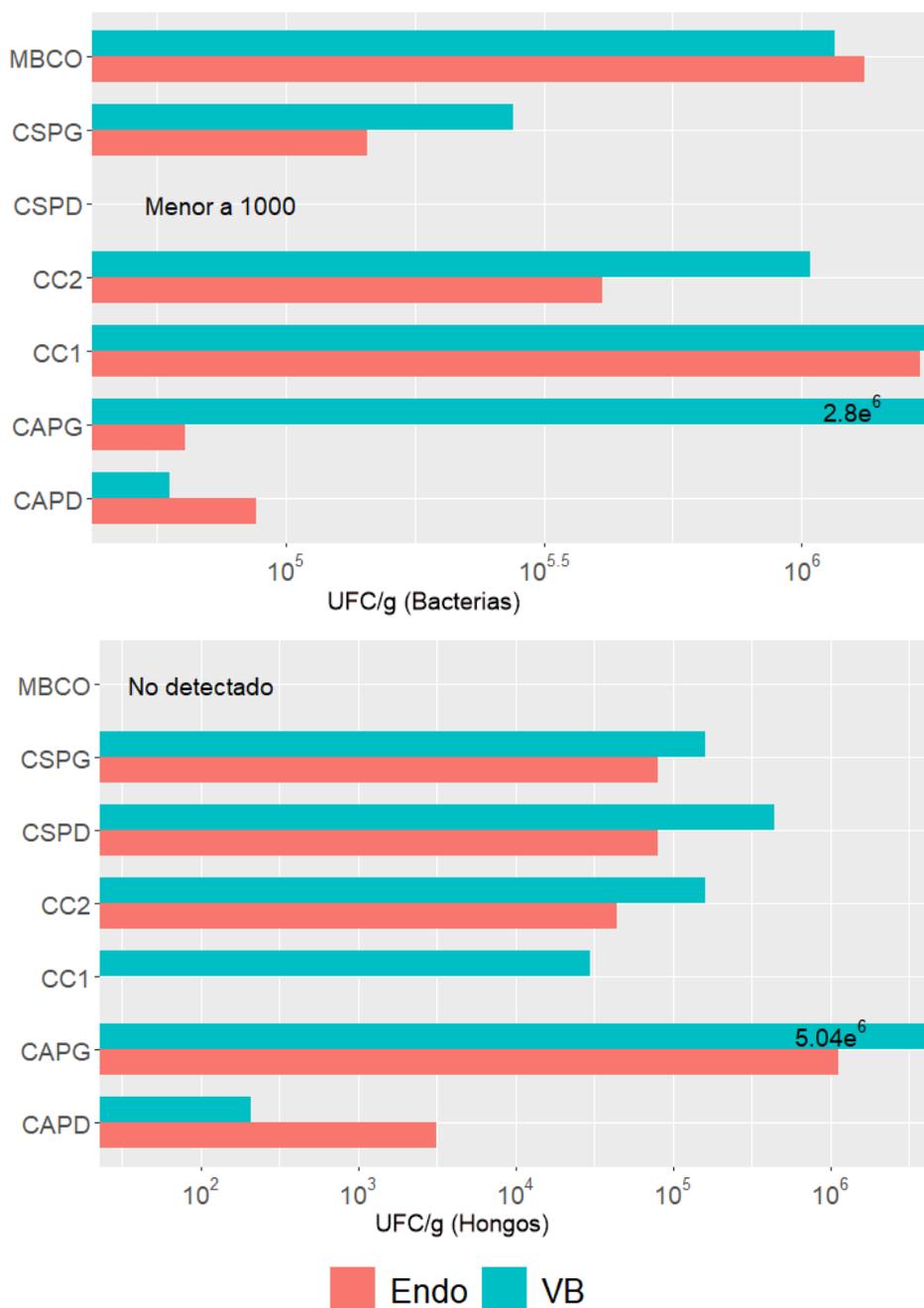
Las poblaciones bacterianas y fúngicas totales identificadas en ambos medios de las muestras de cada compostero y la muestra control se muestran en la Figura 56. La muestra control (MC), que corresponde a una muestra de composta en fase activa obtuvo una población del orden de  $10^6$  UFC de bacterias/g en ambos medios y no se pudo detectar ninguna UFC de hongos. Esto se podría considerar como una referencia de poblaciones microbiológicas en un estado inmaduro.

Las muestras de los CSPD y CAPG se cultivaron por 48 horas debido a que en las primeras 24 horas presentaron un crecimiento muy bajo. Una vez abiertas se observó que el cultivo se vio dominado por hongos con una alta diversidad de morfoespecies, especialmente en los CSPD y CAPG (Figura 55). Esto sugiere que estas muestras se encuentran en un estado avanzado de maduración (Bertoldi, 1983).

El CSPD presentó la población más baja de UFC de bacterias de todo el estudio en ambos medios, lo cual también es un buen índice de madurez (Illmer, 1997). El CAPG presentó la población de bacterias y hongos más alta de todo el estudio en el medio VB, llegando hasta cinco millones de UFC de hongos/g.

De los otros composteros, los CSPG y CAPD, CSPG presentaron una cantidad similar de hongos que CSPD, pero una carga bacteriana mucho más elevada, especialmente en medio VB, y el CAPD, aunque presentó una carga relativamente baja de bacterias, también tuvo una carga baja de hongos en ambos medios y en especial en VB. Por último, de las muestras

de los CC, el CC1 presentó una población de bacterias muy similar a la muestra control y ningún hongo en medio ENDO, y el CC2 presentó una cantidad de bacterias alta, cercana a la MC, pero también una gran cantidad de hongos similar a las muestras de los Composteros sin aislar.

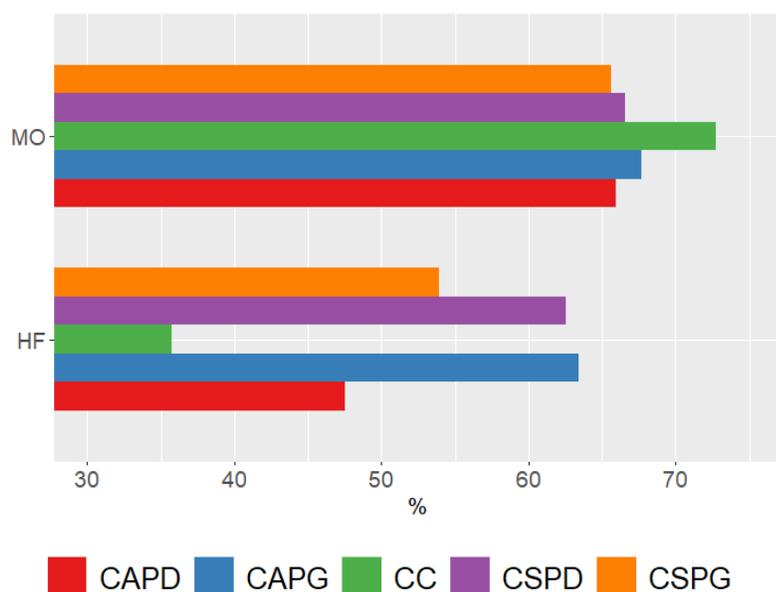


**Figura 56.** UFC de bacterias (arriba) y hongos (abajo) por gramo (eje horizontal) según medio de cultivo (color), y compostero (eje vertical)

## 4.4 Análisis fisicoquímico

### 4.4.1 Humedad final y Materia orgánica

La humedad final en los CSPD y CAPG (Figura 57) fue superior de lo que algunos autores consideran el límite superior adecuado de 60% (Cooperband, 2002; Onwosi et al., 2017). En comparación con otros estudios, Bhave y Joshi (2017) obtuvieron una humedad final de 49% en un tambo rotatorio del mismo tamaño, pero con mayor mezclado y aireación, y Vázquez Soto et al. (2020) obtuvieron contenidos de humedad similares de hasta 64-67% durante la operación de tambos rotatorios de una escala mucho mayor. En caso del CC la humedad final fue mucho menor que los demás composteros debido a que este escurrió lixiviado.



**Figura 57.** Porcentaje de Materia Orgánica (arriba) y Humedad Final (abajo) por tratamiento

El contenido de materia orgánica de todos los composteros fue muy similar (Figura 57), coincidiendo con valores obtenidos por otros autores como Arrigoni (2015) que obtuvo un contenido de materia orgánica final de 65%. Únicamente el CC tuvo un valor más elevado

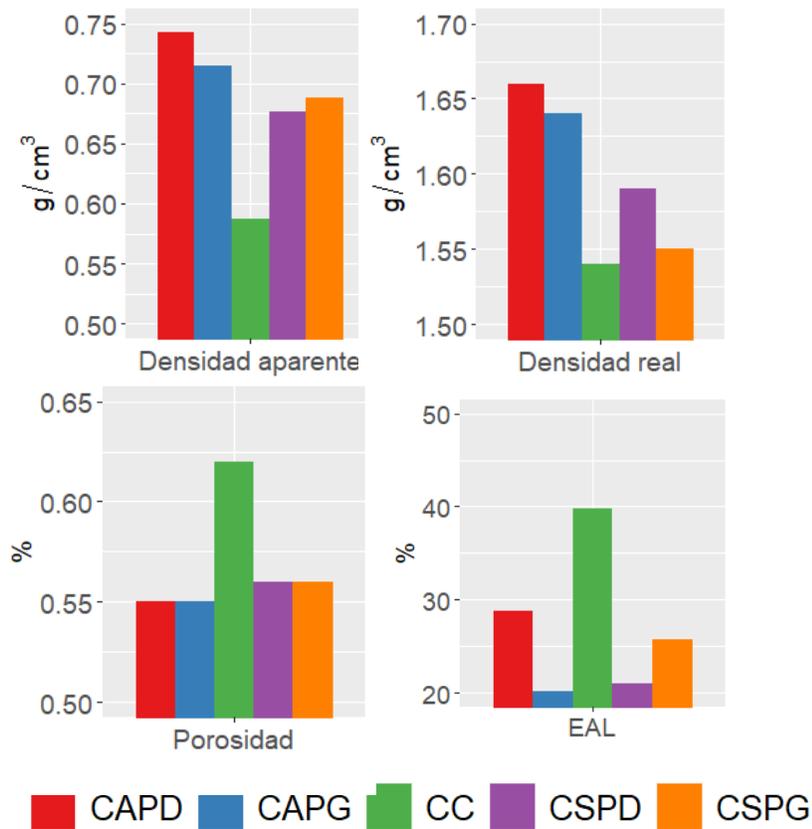
que los demás, indicando una descomposición incompleta. En cuanto a MO la NMX-AA-180-SCFI-2018 solo especifica que sea mayor a 20% para una composta terminada, y las categorías I, II y III con 50%, 30-50% y 20-30% para cada una.

#### 4.4.2 Densidad aparente y real, Porosidad, y Espacio de aire libre.

La densidad aparente y real fue menor en el CC debido a la presencia de la materia orgánica sin descomponer, lo que además resulto en una mayor porosidad (Figura 58).

Como referencia, Vázquez y Soto (2017) obtuvieron valores de densidad aparente de 0.44 hasta 0.83 g/cm<sup>3</sup> y Vazquez et al. (2020) reportan valores de densidad real de 1.69 hasta 1.81 g/cm<sup>3</sup>, con porosidad de 89-92% y E.A.L. de 28 a 56%.

Vázquez Soto (2020) mencionan que los valores de E.A.L. se incrementan con la disminución de humedad, por lo que se requeriría secar la composta final para alcanzar un nivel de EAL recomendado más adecuado para la fase de madurez de 67 % (Cerde et al. 2020).

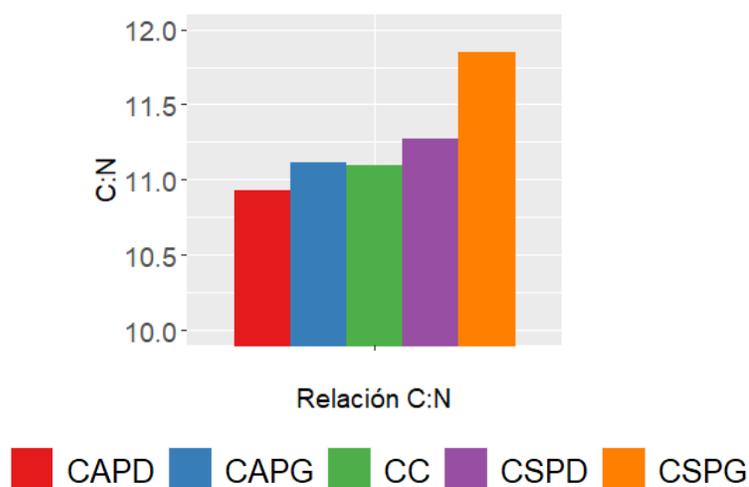


**Figura 58.** Densidad aparente y real en gramos por centímetro cúbico (superior), porosidad y espacio de aire libre en porcentaje (inferior)

#### 4.4.3 Relación C:N

Las muestras de composta de todos los composteros obtuvieron una relación C:N entre 10 y 12, con porcentajes de carbono de entre 32.9% y 35.5% y de nitrógeno de entre 2.8% a 3.1% (Figura 59). Aunque esta relación no coincide con el intervalo de 15 a 25 con un porcentaje de nitrógeno de 1 a 3% indicado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 es similar a aquellas obtenidas por otros autores que hicieron estudios relacionados con el compostaje de residuos orgánicos domiciliarios.

Por ejemplo, Arrigoni (2015) menciona haber obtenido tasas todavía menores, de entre 7.6 y 10.6 con porcentajes de nitrógeno total de entre 2.9 a 3.65%, Karnchanawong et al. (2011) obtuvieron una tasa de 15.8, y, Vázquez Soto *et al.* (2020) obtuvieron una concentración final de 2.5 a 3.6% de nitrógeno con relación C/N entre 10 y 15, y sugieren este intervalo como el ideal para una buena conservación de nitrógeno.



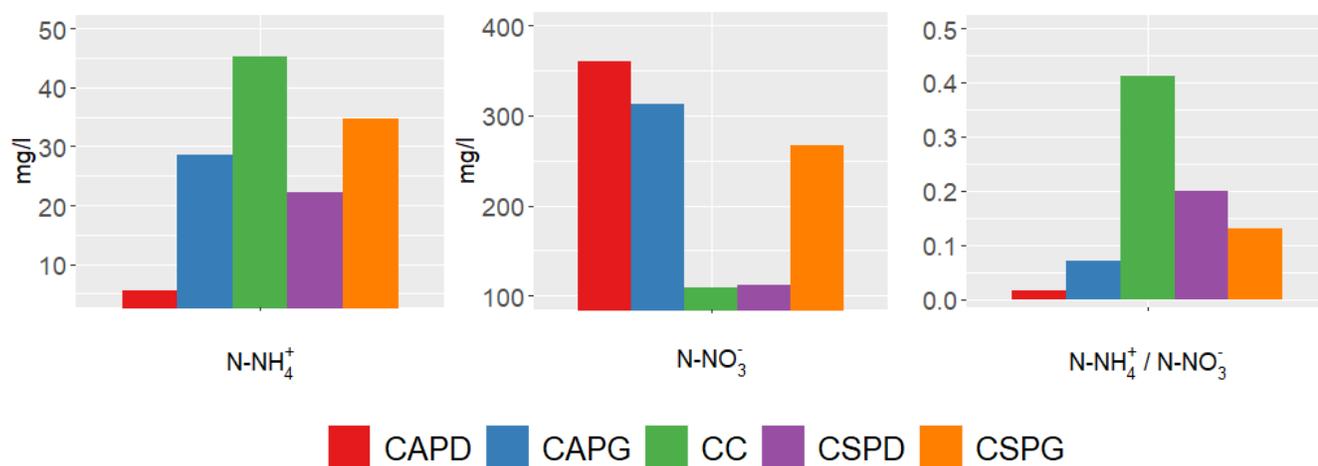
**Figura 59.** Relación C:N (eje vertical) por compostero

#### 4.4.3 Nitrógeno en forma de amonio y nitrato e Índice de nitrificación

La mayor concentración de amonio se encontró en la muestra del CC. El CSPD y CC presentaron una cantidad baja de nitrato en comparación con los demás composteros. La mayor concentración de nitrato se encontró en las muestras de los composteros aislados. Según la consideración de Zhang et al. (2016) que establecen un mínimo de 0.5 para considerar una composta como madura, todas las compostas tuvieron un índice de nitrificación (IN) aceptable. Sin embargo, según el criterio de Bernal et al., (1997) y Juárez

et al. (2015) únicamente los composteros aislados (CAPD y CAPG) se podrían considerar con un IN maduro (<0.16) (Figura 60).

La cantidad de Amonio y Nitrato coincidió con valores obtenidos por Bhave y Joshi (2017) quienes reportaron valores finales de 0.19-0.29% y 1.32-1.62% de Amonio y Nitratos del total de que obtuvieron mediante otros métodos (nitración de fenol y digestión ácida con lectura por espectrofotometría UV) (Bhave y Joshi, 2017) y se traducen en aproximadamente valores de 35.2 a 42.7 mg/kg y 239 a 274 mg/kg respectivamente. La NMX-AA-180-SCFI-2018 no tiene ninguna especificación respecto al nitrógeno en forma de amonio o nitrato.



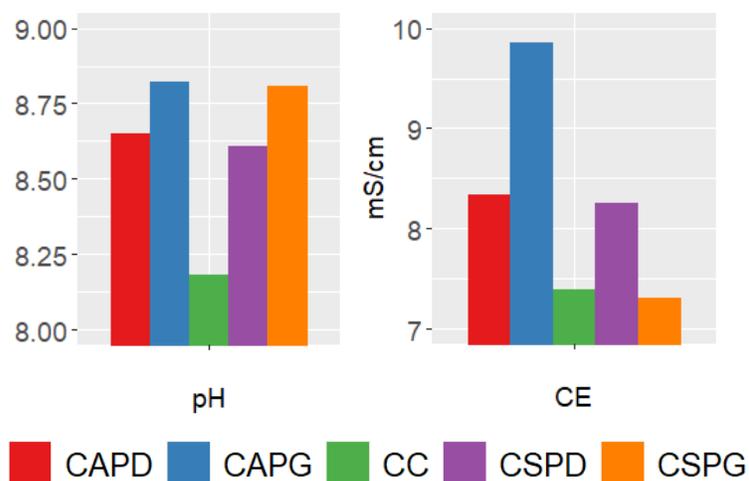
**Figura 60.** Nitrógeno en forma de amonio (izquierda) y en forma de nitrato (centro) e Índice de nitrificación (derecha) por compostero

#### 4.4.4 pH y Conductividad eléctrica

El pH de la mayoría de los composteros se mantuvo entre 8.5 y 9 con excepción del CC que fue más cercano a 8 el resto (Figura 61). Estos valores coinciden más con aquellos obtenidos por Juárez-Robles et al. (2017) y Arrigoni et al. (2015) y es más alto de lo que

indica la NMX-AA-180-SCFI-2018 que especifica un pH ideal para composta terminada de 6.7 a 8.

La CE de todos los tratamientos fue muy alta con respecto a los valores recomendados y coincidió con lo reportado por Hargreaves et al. (2008) sobre la alta salinidad de las compostas hechas con residuos de comida. La C.E. fue especialmente alta en CAPG. Para mejorar la calidad de la composta finalizada respecto a este parámetro se podría utilizar zeolita, un mineral que permite el intercambio libre de iones y puede adsorberlos en su superficie disminuyendo la salinidad de la composta. (Chan et al., 2016). La NMX-AA-180-SCFI-2018 especifica tres categorías de composta I, II y III con 0.5 a 4 mS/cm, 4 a 8 mS/cm, y 8 a 12 mS/cm para el parámetro de Conductividad Eléctrica.

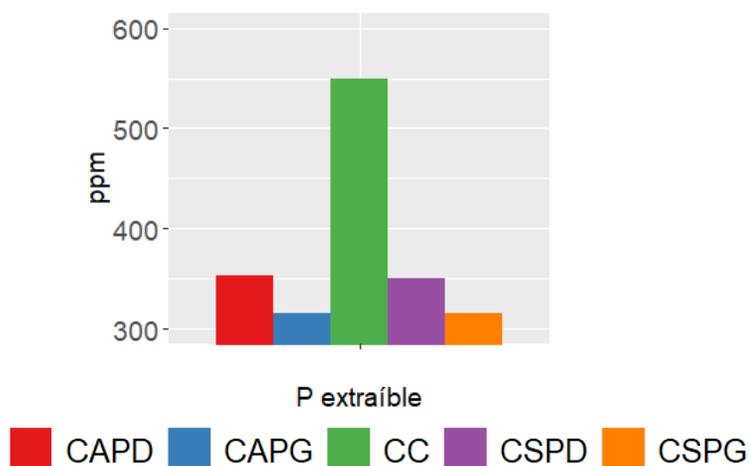


**Figura 61.** pH (izquierda) y conductividad eléctrica (derecha) en eje vertical por tratamiento

#### 4.4.5 Fósforo extraíble

La muestra del CC obtuvo una cantidad muy alta de fósforo (P) extraíble en comparación con las muestras de otros composteros (Figura 62). En comparación con otros estudios, Arrigoni (2015) obtuvo una cantidad mucho mayor de fósforo extraíble de 1'239 hasta 3'266 mg/kg utilizando la misma técnica de extracción con  $\text{NaHCO}_3$  con indicador de molibdato-ácido ascórbico. Además, realizó una extracción de P utilizando un método por cenizas y extracción con  $\text{HCl}$  y  $\text{HNO}_3$  donde reporta un total de entre 0.79 y 1.09% de fósforo en las muestras de sus composteros. Similarmente, Karnchanawong (2011) obtuvo 0.52% de fósforo total reportado en forma de  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizando método colorimétrico y digestión con ácido nítrico-ácido perclórico, y Bhave y Joshi (2017) reportan 1.03-1.01% de P total determinado por método colorimétrico, en digestión ácida con ácido vanadomolibdofosfórico. Vázquez y Soto (2017) mencionan haber obtenido de 0.50 a 1.02 % de P por espectrometría (500 – 1000 ppm).

La NMX-AA-180-SCFI-2018 solo indica como mínimo una concentración de fósforo total de 1% y no en su forma extraíble.



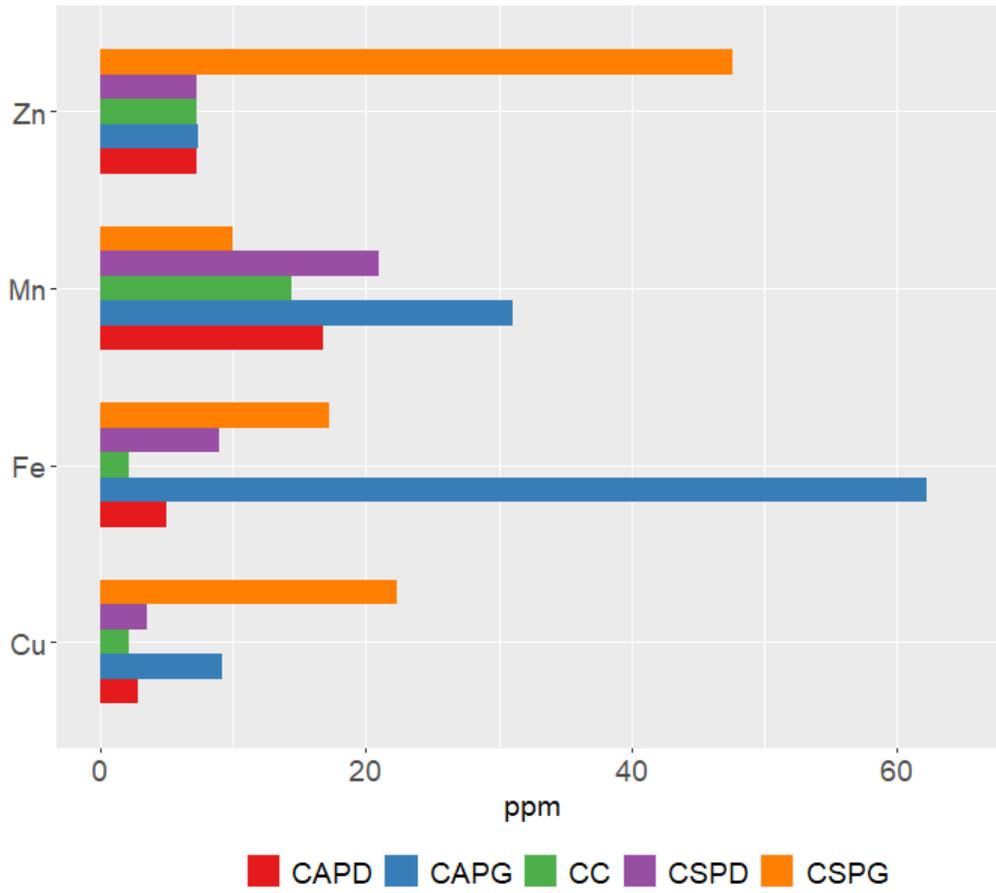
**Figura 62.** Fósforo extraíble en ppm (eje vertical) por tratamiento (color)

#### 4.4.6 Micronutrientes

La muestra del CAPG obtuvo una cantidad muy alta de hierro en comparación con los otros composteros, y el compostero CSPG obtuvo cantidades elevadas de zinc y cobre. (Figura 63). El nivel de hierro en el CAPG se puede explicar debido a la oxidación y lavado de las paletas gruesas ya que contienen una mayor cantidad de metal expuesta a humedad.

La NMX-AA-180-SCFI-2018 establece un límite de 200 y 500 ppm para Zn, y de 70 y 300 ppm para Cu para compostas de tipo I y III respectivamente. En cuestión de estos elementos traza, las muestras de todos los composteros se pueden considerar tipo I según la norma.

En comparación, en el estudio de Vázquez y Soto (2017) encontraron hasta 166 y 642 ppm de Cu y Zn respectivamente, aún dentro de la norma referida en el estudio, y a la vez tuvieron muestras contaminadas con concentraciones de hasta 3460-1030 y 542 ppm de Zn y Cu respectivamente, y otros metales pesados no considerados en este estudio como Pb, Hg y Cr en concentraciones de hasta 2'561, 58.86 y 1078 ppm respectivamente.



**Figura 63.** Micronutrientes en ppm (eje horizontal) por nutriente y tratamiento. (eje vertical y color)

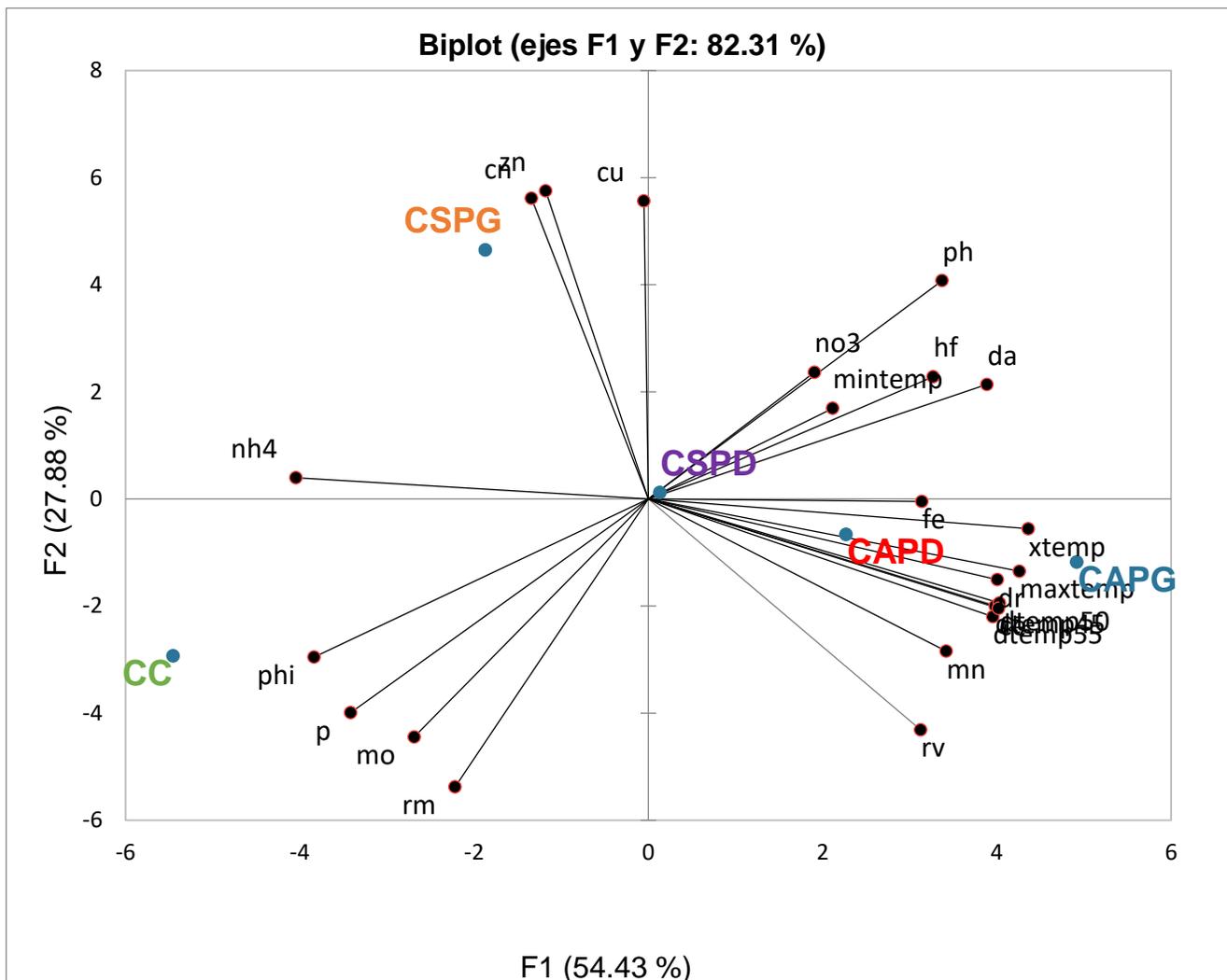
## 4.5 Análisis estadísticos

En el ACP (Figura 64) se muestra que el aumento de las variables relacionadas con temperatura y reducción de volumen se debió principalmente al CAPG, en menor medida a los CAPD y CSPD, y por último el CSPG.

Esto coincide con la observación de que el sistema de Paletas Delgadas generó una aireación óptima en los composteros sin aislamiento, y, por el contrario, los composteros con aislamiento tuvieron un mejor desempeño con paletas gruesas (Sección 4.1).

La Figura 65 muestra la matriz de correlación generada. Las correlaciones más altas se dieron entre las temperaturas promedio y máxima y la cantidad de días a más de 50 y 55 grados. De igual manera resultó una alta correlación entre la conductividad eléctrica y las anteriores variables.

La concentración de fósforo extraíble tuvo una correlación positiva con la porosidad y negativa con el pH, por lo que estos parámetros están fuertemente asociados a la conservación de fósforo. Por último, la concentración de amonio tuvo una correlación negativa con la densidad real y aparente, coincidiendo de nuevo con lo observado en el CC, en el que la descomposición fue más retrasada que los otros composteros.



**Figura 64.** Análisis de Componentes Principales, variables observadas (comportamiento de temperatura, reducción de volumen y masa, y parámetros fisicoquímicos) y tendencias

	xtem	mint	maxt	dt45	dt50	dt55	rm	rv	hf	mo	da	dr	phi	ph	ce	nh4	no3	cn	p	fe	cu	mn	zn
xtem	1.00																						
mint	0.26	1.00																					
maxt	0.90	0.55	1.00																				
dt45	0.96	0.05	0.85	1.00																			
dt50	0.97	0.08	0.87	1.00	1.00																		
dt55	0.94	0.11	0.88	0.98	0.99	1.00																	
rm	-0.43	-0.37	-0.27	-0.20	-0.22	-0.18	1.00																
rv	0.73	0.18	0.79	0.82	0.82	0.81	0.27	1.00															
hf	0.61	0.70	0.73	0.43	0.47	0.53	-0.68	0.17	1.00														
mo	-0.46	-0.71	-0.44	-0.21	-0.22	-0.16	0.85	0.01	-0.67	1.00													
da	0.80	0.55	0.72	0.64	0.64	0.56	-0.68	0.44	0.60	-0.86	1.00												
dr	0.88	0.41	0.87	0.85	0.84	0.79	-0.20	0.87	0.40	-0.47	0.83	1.00											
phi	-0.75	-0.68	-0.73	-0.55	-0.56	-0.52	0.80	-0.30	-0.79	0.93	-0.96	-0.71	1.00										
ph	0.69	0.47	0.57	0.48	0.50	0.47	-0.94	0.06	0.80	-0.87	0.84	0.48	-0.93	1.00									
ce	0.92	0.25	0.93	0.94	0.95	0.98	-0.20	0.79	0.64	-0.21	0.56	0.77	-0.56	0.49	1.00								
nh4	-0.84	-0.58	-0.86	-0.75	-0.75	-0.70	0.34	-0.75	-0.51	0.64	-0.91	-0.97	0.82	-0.59	-0.70	1.00							
no3	0.44	0.07	0.18	0.34	0.31	0.17	-0.50	0.18	-0.02	-0.63	0.76	0.56	-0.59	0.52	0.07	-0.59	1.00						
cn	-0.35	0.02	-0.46	-0.52	-0.50	-0.50	-0.66	-0.89	0.23	-0.35	-0.07	-0.61	-0.11	0.39	-0.46	0.46	0.00	1.00					
p	-0.66	-0.63	-0.61	-0.43	-0.45	-0.43	0.91	-0.09	-0.84	0.93	-0.87	-0.52	0.97	-0.98	-0.47	0.66	-0.50	-0.34	1.00				
fe	0.78	-0.06	0.64	0.78	0.80	0.84	-0.44	0.37	0.63	-0.15	0.38	0.40	-0.45	0.60	0.83	-0.33	0.00	0.00	-0.50	1.00			
cu	0.00	-0.11	-0.26	-0.15	-0.15	-0.18	-0.82	-0.67	0.29	-0.46	0.20	-0.32	-0.31	0.61	-0.20	0.23	0.29	0.90	-0.52	0.28	1.00		
mn	0.78	0.23	0.88	0.83	0.85	0.92	-0.03	0.75	0.62	-0.02	0.34	0.62	-0.38	0.31	0.96	-0.54	-0.20	-0.49	-0.31	0.79	-0.32	1.00	
zn	-0.27	-0.12	-0.50	-0.43	-0.43	-0.47	-0.69	-0.83	0.06	-0.40	0.06	-0.48	-0.15	0.42	-0.50	0.36	0.30	0.94	-0.35	-0.04	0.95	-0.60	1.00

**Figura 65.** Matriz de correlación entre variables de comportamiento de temperatura, reducción de volumen y masa, y parámetros fisicoquímicos

## Capítulo 5. Conclusión y Propuesta a futuro

### 5.1 Conclusión

Se revisaron artículos científicos relacionados con compostaje en general, compostaje doméstico y comunitario y tambos rotatorios. Basándose en los esquemas y propuestas de otros autores, se diseñó y construyó un prototipo de compostero de tambor rotatorio utilizando un tambo de PEAD reciclado fijo a un eje de rotación que reposa en un par de rodamientos que a su vez reposan en un par de soportes de acero unidos por barras. Se construyeron otras 3 réplicas, considerando que con cuatro prototipos en total se pudieran representar dos alternativas de dos características de diseño: paletas gruesas o delgadas, y, uso o no de aislante térmico.

Se realizó un experimento de compostaje de noviembre de 2022 a julio de 2023 en el que se invitó a seis hogares a integrarse a una composta comunitaria, y se acopiaron semanalmente sus residuos de cocina que fueron compostados utilizando los composteros prototipados (CAPD – CAPD – CSPG – CSPD) y el compostero control (CC). Como agradecimiento de la participación del proyecto, al final se entregó un costal de 20 kg de composta a cada hogar participante. La composta también se utilizó *in situ* para abonar cajones de cultivo (Figura 66). Se debe indicar en un próximo estudio separar del acopio semillas gruesas como aquellas de mango o de aguacate que son difíciles de triturar y además tienen mucha resistencia a la degradación y se mantienen prácticamente enteras aún transcurrida la fase activa, ya sea para poder darles un aprovechamiento aparte o un pretratamiento de secado y triturado previo al compostaje. También es importante separar

desde la fuente plásticos y otro tipo de materiales inapropiados que se puedan encontrar en los residuos orgánicos.

De todos los composteros, se obtuvieron compostas estables y los productos de origen animal añadidos a las compostas se degradaron de manera adecuada.

En los composteros aislados se mantuvieron temperaturas mayores y por más tiempo, y esto incidió en que en la composta obtenida de éstos no se encontrara presencia de UFC de *E. coli* o estuviera dentro del límite la NMX-AA-2018-SCFI, mientras que por otro lado en los CC se encontraron hasta casi 3 millones de UFC/g de *E. Coli*. La contaminación pudo suceder por la presencia de materia sin descomponer adecuadamente que atrajo fauna dentro del compostero.

Todos los composteros mostraron una buena conservación de nitrógeno a excepción del CC. Para mejorar el proceso de compostaje y la calidad final de la composta se podría utilizar una tasa de residuos frescos a leñosos mucho menor (de 2 a 3.5 partes de material fresco por cada parte de material leñoso) con un material leñoso más denso que ayude a disminuir la humedad y a generar más porosidad y espacio de aire libre, así como vigilar la evolución de pH para favorecer la conservación de fósforo. Los composteros deben idealmente vaciarse en cuanto termine la fase activa de manera que pueda disminuir su humedad y madurar adecuadamente en los cajones de vaciado. El nivel de salinidad en la composta producida es fitotóxico por lo que es importante disminuir la salinidad utilizando zeolita.

Los tambos y/o tambores rotatorios pueden ser altamente útiles para el manejo a nivel domiciliario de los residuos orgánicos generados en un hogar genérico: residuos de cocina y

de jardín, que con un manejo correcto y en proporciones adecuadas pueden transformarse en un producto útil para el jardín o huerto casero, o bien para mejorar el sustrato de las jardineras urbanas. Éstos pueden ser apropiados para garajes, terrazas o azoteas verdes. Sin embargo, si la producción de residuos es mayor, un solo compostero como el usado en este estudio puede ser insuficiente, por lo que para una generación mayor como la de un condominio o plaza comercial, se requeriría escalar su tamaño y funciones para así poder dar tratamiento a una mayor cantidad de residuos.



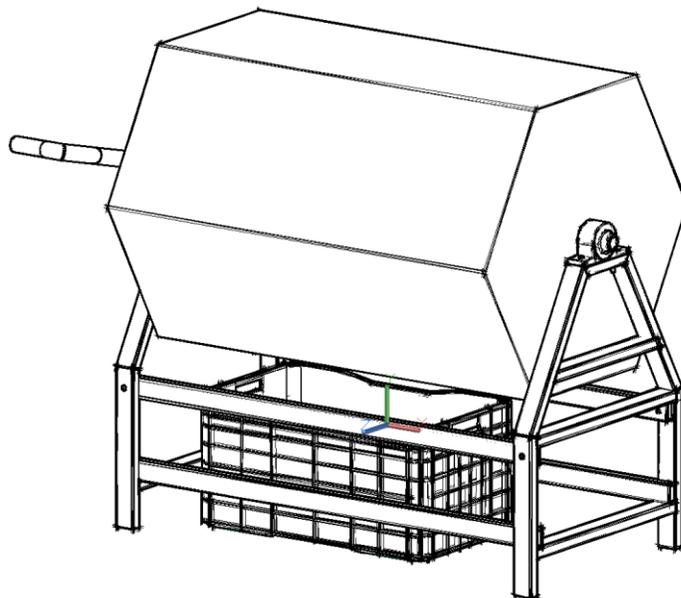
**Figura 66.** Huerto urbano abonado con composta producida: Calabaza, Pepino y Papas

## 5.2 Propuesta a futuro

En un próximo estudio, se diseñará un tambo rotatorio de mayor tamaño (650 o hasta 1300 litros) en forma de poliedro hexagonal fabricado con paredes de paneles de plástico u otro material reciclado (Figura 67).

Así mismo una nueva propuesta de modelación matemática para el compostaje “in situ” de otros residuos domésticos como heces de mascotas, papel y cartón, lo que requerirá un estudio más riguroso sobre la adecuada homogenización de la mezcla de composta y distribución de temperatura dentro del tambor reactor que asegure la completa desinfección de los residuos.

Por último, que el nuevo diseño experimental involucre pruebas de hipótesis contemplando el comportamiento de temperatura, la evolución de la respiración microbiana y una evaluación más rigurosa de los parámetros de calidad indicados por la NMX-AA-180-SCFI-2018.



**Figura 67.** Borrador de diseño de propuesta de compostero futuro

## Bibliografía

1. Abdullah, N., & Chin, N. L. (2010). Simplex-centroid mixture formulation for optimised composting of kitchen waste. *Bioresource Technology*, *101*(21), 8205–8210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.068>
2. Aboulam, S., Morvan, B., & Revel, J. C. (2006). Use of a rotating-drum pilot plant to model the composting of household waste on an industrial scale. *Compost Science and Utilization*, *14*(3), 184–190. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2006.10702282>
3. Adhikari, B. K., Trémier, A., Martinez, J., & Barrington, S. (2012). Home composting of organic waste - Part 1: Effect of home composter design. *International Journal of Environmental Technology and Management*, *15*(3–6), 417–437. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2012.049238>
4. Adhikary, S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences*, *03*(07), 905–917. <https://doi.org/10.4236/as.2012.37110>
5. Alexander, P. D. (2007). Effect of turning and vessel type on compost temperature and composition in backyard (amateur) composting. *Compost Science and Utilization*, *15*(3), 167–175. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2007.10702329>
6. Alkoaik, F. N., Abdel-Ghany, A. M., Al-Helal, I. M., Rashwan, M. A., Fulleros, R. B., & Ibrahim, M. N. (2019). Effect of insulation on the performance of a rotary bioreactor for composting agricultural residues. *Energies*, *12*(2), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en12020315>
7. Amlinger, F., Pollack, M., & Favoino, E. (2004). Heavy metals and organic compounds from wastes used as organic fertilisers. Final report for ENV. A. 2./ETU/2001/0024. *Final Report for ENV. A. 2./ETU/2001/0024.*, (July), 35.
8. Antonio Olivia ... [et al.]. (2018 ) Manual de buenas prácticas para producir compost hogareño / Violeta Silbert Voldman... [et al.] ; contribuciones de - 1a ed . - San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI, 2018.Libro digital, PDF
9. Arrigoni, J. P., Paladino, G., & Laos, F. (2015). Feasibility and Performance Evaluation of Different Low-Tech Composter Prototypes. *International Journal of Environmental Protection*, *5*(1), 1–8. <https://doi.org/10.5963/ijep0501001>
10. Arrigoni, J. P., Paladino, G., Garibaldi, L. A., & Laos, F. (2018). Inside the small-scale composting of kitchen and garden wastes: Thermal performance and stratification effect in vertical compost bins. *Waste Management*, *76*(March), 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.010>
11. Ashley, K., Cordell, D., & Mavinic, D. (2011). A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere*, *84*(6), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>
12. Awasthi, M. K., Pandey, A. K., Khan, J., Bundela, P. S., Wong, J. W. C., & Selvam, A. (2014). Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology*, *168*, 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048>
13. Baptista, M., Antunes, F., Gonçalves, M. S., Morvan, B., & Silveira, A. (2010). Composting kinetics in full-scale mechanical-biological treatment plants. *Waste Management*, *30*(10), 1908–1921. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.027>
14. Barrena Gómez, R., Vázquez Lima, F., & Sánchez Ferrer, A. (2006). The use of respiration indices in the composting process: A review. *Waste Management and Research*, *24*(1), 37–47. <https://doi.org/10.1177/0734242X06062385>
15. Barrena, R., Font, X., Gabarrell, X., & Sánchez, A. (2014). Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management*, *34*(7), 1109–1116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.008>
16. Behling, G. (2013). Kompostierung - Hygienische Aspekte. Recuperado de [http://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw\\_30\\_kompostierung\\_hygiene.pdf](http://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_30_kompostierung_hygiene.pdf)
17. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, *100*(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
18. Bhave, P. P., & Joshi, Y. S. (2017). Accelerated In-vessel Composting for Household Waste. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, *98*(4), 367–376. <https://doi.org/10.1007/s40030-017-0258-3>

19. Brinton, W. F., Evans, E., Droffner, M. L., & Brinton, R. B. (1995). A standardized Dewar test for evaluation of compost self-heating. *Biocycle*, 36(January 1995), 1–16
20. Bustamante, M. A., Restrepo, A. P., Alburquerque, J. A., Pérez-Murcia, M. D., Paredes, C., Moral, R., & Bernal, M. P. (2013). Recycling of anaerobic digestates by composting: Effect of the bulking agent used. *Journal of Cleaner Production*, 47, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.018>
21. Cantero Flores, A., Bailon Morales, R., Villanueva Arce, R., Calixto Mosqueda, M. del C., & Robles Martínez, F. (2016). Composta elaborada con residuos verdes como mejorador de un suelo urbano. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(2), 71–83.
22. Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., & Sánchez, A. (2018). Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresource Technology*, 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
23. Chan, M. T., Selvam, A., & Wong, J. W. C. (2016). Bioresource Technology Reducing nitrogen loss and salinity during ‘struvite’ food waste composting by zeolite amendment. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 200, 838–844. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.093>
24. Comisión para la cooperación ambiental. (CCA) (2017) *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte* <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>
25. Cooperband, L. (2002). The Art and Science of Composting A resource for farmers and compost producers. University of Wisconsin-Madison, Center for Integrated Agricultural Systems, 1–14. <https://doi.org/volume>
26. Das, M., Uppal, H. S., Singh, R., Beri, S., Mohan, K. S., Gupta, V. C., & Adholeya, A. (2011). Co-composting of physic nut (*Jatropha curcas*) deoiled cake with rice straw and different animal dung. *Bioresource Technology*, 102(11), 6541–6546. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.058>
27. Debernardi-Vázquez, T. de J., Aguilar-Rivera, N., & Núñez-Pastrana, R. (2020). Composting of byproducts from the orange (*Citrus sinensis* (L.) osbeck) and sugarcane (*saccharum* spp. hybrids) agroindustries. *Ingeniería e Investigación*, 40(3), 81–88. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n3.82877>
28. DEBERTOLDI, M., VALLINI, G., & PERA, A. (1983). The biology of composting: A review. *Waste Management & Research*, 1(2), 157–176. [https://doi.org/10.1016/0734-242x\(83\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0734-242x(83)90055-1)
29. Diario Oficial de la Federación (2018) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos
30. Eberhard, G. C. (1998) Comparing Open versus In-Vessel Composting. Asia-North-American Waste Management Conference
31. FCQAO. (1994). *Methods book for analysis of compost*.
32. Franke-Whittle, I. H., Confalonieri, A., Insam, H., Schlegelmilch, M., & Körner, I. (2014). Changes in the microbial communities during co-composting of digestates. *Waste Management*, 34(3), 632–641. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.009>
33. Gan, J., Montañón, G., Fajardo, C., Meraz, M., & Castilla, P. (2013). Co-tratamiento anaerobio de lixiviados producidos en una planta de composteo de desechos sólidos urbanos biodegradables en la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 541–551. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382013000300016&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382013000300016&lng=es&nrm=iso&tlng=en)
34. GC Isaza-Arias, MA Pérez-Méndez, JR Laines-Canepa, G Castañón-Nájera (2009) Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica. *Universidad y Ciencia*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. 25(3):233-243
35. Hargreaves, J. C., Adl, M. S., & Warman, P. R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123(1–3), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.004>
36. Illmer, P., & Schinner, F. (1997). Compost turning - A central factort for a rapid and high-quality degradation in household composting. *Bioresource Technology*, 59(2–3), 157–162. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00156-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00156-3)
37. Illmer, P., Meyer, E., & Schinner, F. (1997). Thermic insulation and sieve plates - Beneficial equipments for a rapid and high quality degradation in household composting? *Bodenkultur*, 48(2), 99–103.
38. Iyengar, S. R., & Bhave, P. P. (2006). In-vessel composting of household wastes. *Waste Management*, 26(10), 1070–1080. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.011>

39. Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
40. Jiménez Martínez, N. M. (2015). La gestión integral de residuos sólidos urbanos en México: entre la intención y la realidad. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 17, 29–56. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.17.2015.1419>
41. Juárez-Robles, B., De La Rosa-Gómez, I., Mañón-Salas, M. D. C., Hernández-Berriel, M. D. C., Vaca-Paulín, R., & De La Fuente, J. L. (2017). Calidad y tiempo de compostaje de biosólidos al variar las proporciones y pesos de los sustratos. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 95–104. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.12.065>
42. Jones, P., & Martin, M. (2003). *A Review of the Literature on the Occurrence and Survival of Pathogens of Animals and Humans in Green Compost. The Waste and Resources Action Programme*.
43. Kalamdhad, A. S., & Kazmi, A. A. (2009). Rotary drum composting of different organic waste mixtures. *Waste Management and Research*, 27(2), 129–137. <https://doi.org/10.1177/0734242X08091865>
44. Kalamdhad, A. S., Khwairakpam, M., & Kazmi, A. A. (2012). Drum composting of municipal solid waste. *Environmental Technology*, 33(3), 299–306. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.57291>
45. Karnchanawong, S., & Suriyanon, N. (2011). Household organic waste composting using bins with different types of passive aeration. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(5), 548–553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.006>
46. Kausar, H., Pal, S., Haq, I., & Khwairakpam, M. (2020). Evaluation of rotary drum composting for the management of invasive weed *Mikania micrantha* Kunth and its toxicity assessment. *Bioresource Technology*, 313(April), 123678. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123678>
47. Kim, E., Lee, D. H., Won, S., & Ahn, H. (2016). Evaluation of optimum moisture content for composting of beef manure and bedding material mixtures using oxygen uptake measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(5), 753–758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
48. Lazcano, C., Gómez-Brandón, M., & Domínguez, J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere*, 72(7), 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.016>
49. Lunag, M. N., Elauria, J. C., & Burguillos, J. D. (2021). Community-based bin design approach: an initial stage toward urban composting at a hill station, Philippines. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3832–3852. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00746-6>
50. Márquez B. P., Blanco Díaz M. J., Cabrera Capitán F. (2014) *Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de compostaje* Moreno Casco Joaquin & Moral Herrero R. *Compostaje Mundiprensa*
51. M. Bernal, C. Paredes, M. Sánchez-Monedero et al. (1998) Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes.
52. Munroe, G., Scott, J., Burlington, C., Scotia, N., Holsteins, K., & Pre, G. (2007). Manual of On-Farm Vermicomposting and Vermiculture Organic Agriculture Centre of Canada Acknowledgements EcoAction Program of Environment Canada and New Ground Vermicomposting, Halifax, Nova Scotia. *Organic Agriculture Centre of Canada*, 56. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/E-Learning/Moocs/Solid\\_Waste/W4/Manual\\_On\\_Farm\\_Vermicomposting\\_Vermiculture.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/E-Learning/Moocs/Solid_Waste/W4/Manual_On_Farm_Vermicomposting_Vermiculture.pdf)
53. Oberfeld, G., 1997. Hygieneaspekte bei der Eigenkompostierung. *Entsorgungspraxis* 15, 26-30.
54. Onwosi, C. O., Igbokwe, V. C., Odimba, J. N., Eke, I. E., Nwankwoala, M. O., Iroh, I. N., & Ezeogu, L. I. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 190, 140–157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
55. Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellon, L. F., & Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(1), 31–42. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n1.003>
56. Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L. F., Hoyos, L. V., Gonzales, S., Barrena, R., ... Sanchez, A. (2015). Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, 44, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.034>

57. Pace, S. A., Yazdani, R., Kendall, A., Simmons, C. W., & VanderGheynst, J. S. (2018). Impact of organic waste composition on life cycle energy production, global warming and Water use for treatment by anaerobic digestion followed by composting. *Resources, Conservation and Recycling*, 137(February), 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.030>
58. Pliego-Arreaga, R., Regalado, C., Amaro-Reyes, A., & García-Almendárez, B. E. (2020). Composteando el digestato de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 1–8. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62029966013>
59. Rentería-Tamayo, R., Vidriales-Escobar, G., González-Ortega, O., & Alatríste-Mondragón, F. (2020). Mathematical Modeling of the Mesophilic and Thermophilic Stages of a Composting Tubular Reactor for Sewage Sludge Sanitization. *Waste and Biomass Valorization*, 11(3), 955–966. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0436-1>
60. Richard, E. N., Hilonga, A., Machunda, R. L., & Njau, K. N. (2021). Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania : the case of Arusha City, 3, 1–13.
61. Rodríguez S. Marcos Arturo & Córdoba V. Ana (2006) Manual de compostaje municipal. Tratamiento de residuos sólidos. SEMARNAT – INE – GTZ.
62. Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A., & Sánchez, A. (2009). Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: A review and a correlation analysis. *Bioresource Technology*, 100(10), 2655–2666. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.049>
63. Sánchez, A. (2022). *Decentralized Composting of Food Waste : A Perspective on Scientific Knowledge*. 4(April), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.850308>
64. Salmerón-Gallardo Y.A. , Cabrera-Cruz R.B., Juárez-López A. L., Sampedro-Rosas M. L., Rosas-Acevedo J. L., y R.-A. J. C. (2017). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. Parte B: Mitigación de Biogás en Acapulco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(2), 12.
65. SEMARNAT (2018). Capítulo 7 Residuos. *Informe de la situación del medio ambiente*
66. SEMARNAT (2020) *Diagnóstico básico para la gestión Integral de los residuos*. Capitulo 2. Residuos Sólidos Urbanos
67. Schneider, J., Burg, J. M., Theilen, U., Weigand, H., & Brück, F. (2020). Towards optimized drum composting: evaluation of the radial mixing performance of a model substrate on the laboratory scale. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 41(12), 1606–1613. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1543354>
68. Setyaningrum, H., Masrifah, A. R., Susilo, A., & Haryadi, I. (2021). Durian rind micro composter model: A case of Kampung Durian, Ngrogung, Ponorogo, Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 226, 2019–2022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122600021>
69. Smith, S. R., & Jasim, S. (2009). Small-scale home composting of biodegradable household waste: Overview of key results from a 3-year research programme in West London. *Waste Management and Research*, 27(10), 941–950. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103828>
70. Storino Francesco (2017) *Compostaje descentralizado de residuos orgánicos domiciliarios a pequeña escala: Estudio del proceso y del producto*. Memoria de Tesis Doctoral Universidad Publica de Navarra
71. Storino, F., Arizmendiarieta, J. S., Irigoyen, I., Muro, J., & Aparicio-Tejo, P. M. (2016). Meat waste as feedstock for home composting: Effects on the process and quality of compost. *Waste Management*, 56, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.004>
72. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vogel, S. (1998). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. España: Mc Graw-Hill.
73. Turan, N. G. (2008). The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost. *Bioresource Technology*, 99(7), 2097–2101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.061>
74. Vázquez, M. A., Plana, R., Pérez, C., & Soto, M. (2020). Development of technologies for local composting of food waste from universities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph17093153>
75. Vázquez, M. A., & Soto, M. (2017). The efficiency of home composting programmes and compost quality. *Waste Management*, 64, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.022>
76. Wang, X., Pan, S., Zhang, Z., Lin, X., Zhang, Y., & Chen, S. (2017). Effects of the feeding ratio of food waste on fed-batch aerobic composting and its microbial community. *Bioresource Technology*, 224, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.076>

77. Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y., & Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.024>
78. Zhang, H., Li, G., Gu, J., Wang, G., Li, Y., & Zhang, D. (2016). Influence of aeration on volatile sulfur compounds ( VSCs ) and NH<sub>3</sub> emissions during aerobic composting of kitchen waste. *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.022>
79. Zhang, L., & Sun, X. (2015). Influence of bulking agents on physical , chemical , and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *WASTE MANAGEMENT*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.032>
80. Zimbro, M. J., & Power, D. A. (2009). *Difco and BBL manual: Manual of microbiological culture media*.
81. [Zurbrugg Christian \(2014\) Vermicomposting of Biowaste. \*Municipal Solid Waste Management in Developing Countries\*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. COURSERA \[www.coursera.org\]\(http://www.coursera.org\)](#)

## Apéndices

### Apéndice 1. Características de tambos rotatorios utilizados en diferentes estudios.

Características del tambor rotatorio	Referencias
Tambos verticales hexaédricos de 600 litros de polietileno reciclado, el mezclado se realiza en el eje vertical con espiral sin fin mecanizado que gira de manera anidada, alrededor de su propio eje y alrededor del tambor. Al fondo del tambor se colocó un tamiz con apertura de 12 mm a una distancia del suelo de manera que la composta madura se vaya almacenando en una cámara inferior (Figura 19).	Ilmer y Schinner (1997)
Tambor de 250 l fabricado en hoja de acero con grosor de 4 mm Montado en cuatro ruedas de caucho de las cuales dos están unidas a un eje que se hace girar mediante una manivela. El eje está a su vez unido a dos rodamientos que reposan sobre la estructura de acero de 1.2 m de altura y 0.76 por 1.07 m de base. Para la aireación cuenta en el lado largo con dos agujeros de 10 centímetros de diámetro cubiertos con rejilla de acero para ventilar y el ingreso de material se hace del lado de una tapa (Figura 20).	Kalamhdad y Kazmi (2009)
Tambor horizontal de lámina de acero de 200 litros que reposa sobre un par de chumaceras que a la vez reposan sobre un soporte. Cada tapa del cilindro está hecha de rejilla para permitir aireación. No cuenta con herramientas de mezclado, y el material ingresa por una puerta abatible en el lado largo (Figura 21).	Arrigoni et al. (2015)
Tambor vertical de acrílico anidado, un tambor contiene la composta dentro de otro tambor exterior de mayor tamaño. El tambor interior tiene su pared perforada y ambos tambors cuentan con una apertura en la tapa. Los atraviesa un eje central fijo a una chumacera de piso atornillada a una base. Alrededor del eje están soldadas un juego de 12 paletas de mezclado de 5 cm de ancho y 15 cm de largo giradas 45° sobre su propio eje dispuestas de manera intercalada. Los tambors exterior e interior tienen volúmenes de 80 y 140 litros, y, 25 y 31 litros para los reactores manual y mecanizado respectivamente, los tambors interiores de ambos tienen perforaciones de 0.6 mm (Figura 22).	Bhave y Joshi (2017)
Tambor horizontal de hoja de acero inoxidable de 3 mm de grosor y 200 litros de capacidad que gira alrededor de un tubo-eje fijo el cual tiene una ranura a través de la cual se provee aireación desde el centro. Cuenta con 25 mm de aislamiento térmico de lana de fibra de vidrio. El eje además cuenta con un “puerto” para el ingreso de aire desde el centro del tambor. El mezclado es mecanizado moviendo el tambor exterior, para ello se utiliza un motor de 0.25 hp a 3 rpm. La aireación se realiza con bomba a 5 litros/min (Figura 23).	Alkoaik et al. (2019)
Tambor horizontal de 750 litros de 0.8 m de diámetro por 1.5 m de largo con pistas en la superficie del tambor que reposan en dos pares de ruedas que lo hacen rotar a 2 rpm. Aireación se realiza con bomba a 50 litros/min. (Figura 24).	Aboulam et al. (2006)

<p>Tambo horizontal de 1'500 litros de acero inoxidable con un sistema de mezclado interno con un tirabuzón (espiral sin fin) que es accionado por un motor eléctrico.</p> <p>Todo el sistema se monta sobre otra estructura inclinable a través de bombas hidráulicas para el vaciado del material procesado (Figura 25).</p>	<p>Vázquez et al. (2020).</p>
--	-------------------------------

## Apéndice 2. Composiciones de composta utilizadas en diferentes estudios.

Materiales y Observaciones	Composición porcentual	Referencia
Residuos orgánicos y residuos de jardín frescos con tasas C/N de 14 y 50 respectivamente.	88% residuos orgánicos 12% residuos de jardín frescos (1 a 1 en volumen ó 8 a 1 en masa)	Vázquez M.A. et al. (2020)
Tres diferentes mezclas de: digestato, residuos orgánicos y aserrín respectivamente.	1) 53%, 28% y 19% 2) 65%, 28% y 10% 3) 53%, 36% y 11%	Espinosa-Salgado et al. (2020)
Cuatro diferentes mezclas de: digestato de residuos orgánicos, suelo arcilloso y estiércol. 65-30-05 resultado ser el más eficiente.	1) 50%, 30% y 20% 2) 60%, 40% y 10% 3) 65% 35% y 5% 4) 70%, 30%, y 0%	Juárez-Robles et al. (2017)
Residuos vegetales con diferentes porcentajes de carne y relación de materia fresca a agente de carga	1) 100% residuos vegetales, 1:0.6 2) 5% carne, 1:06 3) 15% carne, 1:06 4) 15% carne, 1:1.2	Storino et al. (2016)
La mezcla se alimentó a 3 diferentes tipos de composteros. Tasa C/N final de la mezcla 7.6-10	70% vegetales crudos y cocidos 10% carne 20% papel	Arrigoni et al. (2015)
Residuos orgánicos y hojas secas.	Proporción de 3.5 a 1 en masa.	Karnchanawong et al. (2011)
Residuos vegetales con: A) pasto fresco y residuos de comida B) estiércol y aserrín, y C) estiércol, residuos de papel y aserrín.	No se menciona, pero las tasas C/N finales de las mezclas para A, B y C fueron de 15, 22 y 30 respectivamente.	Kalahmdad y Kazmi (2009)
1) lodos de agua residual y paja de algodón 2) gallinaza, paja de algodón y agua de prensado de olivo 3) lodos de agua residual, paja de algodón y agua de prensado de olivo 4) lodos de agua residual y paja de maíz 5) lodos de agua residual, paja de maíz y agua de prensado de olivo 6) Estiércol de puerco, gallinaza y bagazo de sorgo 7) Residuos orgánicos y bagazo de sorgo	Composiciones: 1) 46.5% y 53.5% 2) 34.6%, 65% y 1.9 l / kg 3) 32.1%, 67.9% y 0.95 l / kg 4) 79% y 21% 5) 52.8%, 47.2% y 1.76 l / kg 6) 27%, 20% y 53% 7) 95% y 5%	Bernal et al. (1997)

