



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas

**Evaluación del efecto del uso de distintos materiales  
secantes y diferentes tipos de pretratamiento en el  
proceso de compostaje doméstico en composteras  
giratorias**

Andrés Alberto Monge Bolaños

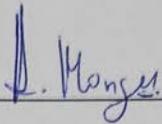
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2023

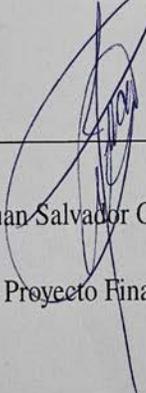
# Hoja de aprobación

Este trabajo final de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería de Biosistemas.



Andrés Alberto Monge Bolaños

Estudiante



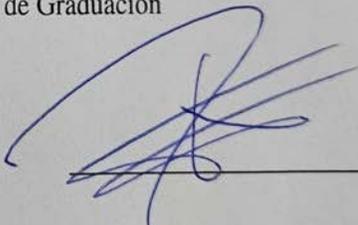
Dr. Juan Salvador Chin Pampillo

Director Proyecto Final de Graduación



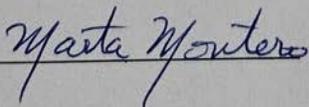
Dr. Ronald Aguilar Álvarez

Comité Asesor



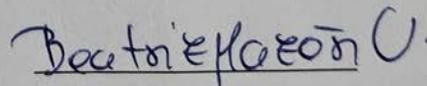
Ing. José Vinicio Arias Zúñiga

Comité Asesor



Dra. Marta Montero Calderón

Presidente Tribunal Examinador



Dra. Beatriz Mazón Villegas.

Miembro Tribunal Examinador

## Dedicatoria

---

*Para mis familias por su apoyo y cariño.*

*Para los que se fueron, los que nos acompañan y los que están por venir.*

# Agradecimientos

---

*A la vida por permitirme seguir aprendiendo.*

*Al profesor Juan Chin por creer en mi y en el compostaje.*

*A los asesores Ronald Aguilar y Vinicio Arias por ayudarme a concluir esta fase de mi vida.*

*A la profesora Anayansi, por compartir su carisma, tiempo y conocimiento.*

*A Patricia y al equipo del CIA por la atención y los ensayos realizados.*

*A los asistentes del CICA, Irene, Grattia, Marino, María Laura y a la profesora Mayela por la asistencia brindada.*

*A Feli, Ana y a todo el equipo de Huacamole por su motivación y aporte al estudio.*

*A Francis y al equipo de Pollos Susy por ayudarnos a crecer el proyecto.*

*A los profesores de la EIB, por sus palabras y enseñanzas que recuerdo cada día.*

*A Ensio y a Rebe de la Escuela por su atención y apoyo.*

*Al equipo de la Soda de Ingeniería por ayudarnos a aprender más.*

*A don Manuel y Don Ramón por aportarme sus conocimientos en instalaciones eléctricas.*

*Al profesor Jesús Bejarano por su alegría, disposición y excelentes consejos.*

*A los compañeros de la Universidad con quien tuve la bendición de compartir y estudiar.*

# Índice general

<b>Hoja de aprobación</b>	<b>ii</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Índice General</b>	<b>v</b>
<b>Índice de abreviaturas</b>	<b>x</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Resumen</b>	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1. Justificación del proyecto . . . . .	2
1.2. Alcance del proyecto . . . . .	4
1.3. Objetivos . . . . .	5
1.3.1. General . . . . .	5
1.3.2. Específicos . . . . .	5
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1. Residuos domésticos . . . . .	6
2.1.1. Residuos sólidos biodegradables . . . . .	6

2.1.2.	Materiales secantes . . . . .	6
2.2.	Proceso de Compostaje . . . . .	8
2.2.1.	Generalidades . . . . .	8
2.2.2.	Composteras . . . . .	9
2.2.3.	Pretratamientos . . . . .	11
2.2.4.	Microorganismos . . . . .	12
2.2.5.	Factores del compostaje . . . . .	12
2.2.5.1.	Temperatura . . . . .	12
2.2.5.2.	Aireación . . . . .	14
2.2.5.3.	Relación C/N . . . . .	14
2.2.5.4.	Contenido de humedad . . . . .	16
2.3.	Monitoreo en el compostaje . . . . .	16
2.4.	Diseño experimental factorial . . . . .	18
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>19</b>
3.1.	Zona de estudio . . . . .	19
3.2.	Equipos y suministros . . . . .	20
3.2.1.	Descripción de los componentes del sistema de compostaje . . . . .	20
3.2.2.	Descripción de los componentes del sistema de monitoreo . . . . .	21
3.2.2.1.	Sistema de monitoreo del Ambiente externo (SM-A) . . . . .	22
3.2.2.2.	Sistema de monitoreo de las composteras giratorias (SM-C) . . . . .	23
3.3.	Caracterización de los materiales . . . . .	25
3.4.	Diseño experimental . . . . .	27

3.4.1.	Primera Etapa: Variables de estudio . . . . .	27
3.4.1.1.	Capacidad de absorción de agua de los MS . . . . .	27
3.4.1.2.	pH . . . . .	28
3.4.1.3.	Contenido humedad . . . . .	29
3.4.1.4.	Relación C/N . . . . .	29
3.4.1.5.	Variables evaluadas por los sistemas de monitoreo . . . . .	29
3.4.2.	Segunda Etapa: Logística de recolección y pretratamiento . . . . .	29
3.4.2.1.	Valoración ambiental del estudio . . . . .	31
3.5.	Manejo de datos . . . . .	32
3.5.1.	Calibración de los sensores . . . . .	32
3.5.2.	Procesamiento de datos . . . . .	33
3.5.3.	Análisis de estadística . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>35</b>
4.1.	Caracterización del Material Secante . . . . .	35
4.2.	Caracterización del pretratamiento . . . . .	37
4.3.	Análisis de los materiales secantes en el proceso . . . . .	38
4.4.	Análisis de los pretratamientos en el proceso . . . . .	44
4.5.	Análisis del compost producido con base en los MS . . . . .	47
4.6.	Análisis del compost producido con base en los pretratamientos . . . . .	50
4.7.	Diseño y evaluación del sistema de monitoreo de las condiciones internas de la compostera durante el proceso de compostaje . . . . .	53
4.7.1.	Costo económico del SM . . . . .	53

4.7.2.	Calibración de los sensores . . . . .	54
4.7.3.	Evaluación del SM-Amb.ext . . . . .	54
4.7.4.	Evaluación del SM-Compostera . . . . .	55
4.7.4.1.	Temperatura de Matriz . . . . .	56
4.7.4.2.	Atmósfera interna de la compostera: . . . . .	57
4.7.5.	Evaluación de la correlación entre las variables de los SM . . . . .	60
4.8.	Valoración ambiental del estudio realizado . . . . .	61
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>65</b>
	<b>Apéndice A: Equipo de compostaje y pretratamiento</b>	<b>71</b>
	<b>Apéndice B: Diagrama de flujo del procesamiento de datos</b>	<b>72</b>
	<b>Apéndice C: Proporción teórica ideal entre el material secante y los residuos sólidos biodegradables para un proceso de compostaje óptimo.</b>	<b>73</b>
	<b>Apéndice D: Gráficos resumen de la temperatura de matriz</b>	<b>74</b>
	D1: Picado Fino + Pellet de madera . . . . .	74
	D2: Picado Fino + Cartón para huevos . . . . .	75
	D3: Picado Grueso + Cartón para huevos . . . . .	76
	D4: Picado Grueso + Pellet de madera . . . . .	77
	<b>Apéndice E: Evaluación de la integridad de los sensores ambientales</b>	<b>78</b>

<b>Apéndice F: Resumen de los datos obtenidos para el análisis de correlación entre las variables de los sistemas de monitoreo.</b>	<b>79</b>
<b>Apéndice G: Reporte de ensayos del Centro de Investigaciones Agronómicas.</b>	<b>81</b>
Apéndice G1: Análisis químico completo de los RSB al inicio de cada ciclo . . . . .	81
Apéndice G2: Análisis de la relación C/N del compost producido. . . . .	82
<b>Apéndice H: Códigos generados en el estudio</b>	<b>83</b>
Apéndice H1: Método de actualización OTA . . . . .	83
Apéndice H2: Calibración de los sensores . . . . .	84
Apéndice H3: Sistema de Monitoreo de Ambiente externo. . . . .	89
Apéndice H4: Sistema de Monitoreo de las Composteras . . . . .	93
Apéndice H5: Depuración de datos . . . . .	101

## Índice de abreviaturas

**MS:** Material Secante.

**RSB:** Residuos Sólidos Biodegradables.

**SM-C:** Sistema de Monitoreo de las Composteras.

**SM-Amb:** Sistema de Monitoreo del Ambiente externo.

**K:** Coeficiente de capacidad de absorción del agua de los MS.

**C1-Trat1:** Compostera/Tratamiento 1: Picado Fino + Pellet.

**C2-Trat2:** Compostera/Tratamiento 2: Picado Fino + Cartón.

**C3-Trat3:** Compostera/Tratamiento 3: Picado Grueso + Cartón.

**C4-Trat4:** Compostera/Tratamiento 4: Picado Grueso + Pellet.

**C.H.:** Contenido de humedad.

**Relación C/N:** Relación Carbono-Nitrógeno.

**IFTTT:** If This Then That. Servicio de automatización.

**I2C:** Inter-Integrated Circuit.

**C++:** Lenguaje de Programación basado en C.

**TLC:** Teorema del Limite Central.

**IDE:** Integrated development environment (Entorno de desarrollo integrado).

**CIA:** Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

**CICA:** Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental de la Universidad de Costa Rica.

**LAIMEC:** Laboratorio de Aplicaciones Isotópicas y Metabolismo de Contaminantes.

**GWP:** Global Warming Potential (Potencial de calentamiento global).

# Índice de figuras

1.	Perfil de tiempo de la temperatura de matriz y el pH promedio durante un proceso de compostaje en pila (Ajmal et al., 2020) . . . . .	8
2.	Tipos de composteras domésticas: (a) Método en Pila, (b) Método Takakura (c) Rotativa artesanal (d) Rotativa de doble cámara comercial. . . . .	10
3.	Perfil de temperatura de matriz en un proceso de compostaje en tambor rotatorio (Ajmal et al., 2020) . . . . .	13
4.	Evolución de la variable relación C/N para varios residuos orgánicos durante el proceso de compostaje (Azim et al., 2018). . . . .	15
5.	Zona de estudio con las composteras evaluadas, los sistemas de monitoreo y el material secante; (a) Vista externa, (b) Vista interna. . . . .	19
6.	Componentes del sistema de compostaje utilizado para recibir y procesar los RSB, previo a la adición a las composteras. . . . .	20
7.	Compostera giratoria de doble cámara comercializada por 360 Soluciones Verdes. . . . .	21
8.	Componentes utilizados en ambos sistemas de monitoreo diseñados (a) Microcontrolador ESP32 (TTGO T-Display v1.1), (b) Protoboard y adaptador de corriente. . . . .	22
9.	Imágenes ilustrativas del sistema de monitoreo de ambiente externo (a) Sensor (Sparkfun BME280), (b) Vista superior del sistema de monitoreo . . . . .	23
10.	Sensores utilizados en el sistema de monitoreo para las composteras: <b>a:</b> Sensor DHT 21; <b>b:</b> Sensor DS18B20; <b>c:</b> Sensor DFRobot I2C Oxygen. . . . .	24
11.	Imagen ilustrativa del sistema de monitoreo de las composteras: (a) Vista superior, (b) Vista lateral. . . . .	25

12.	Imagen de la diversidad y dimensiones de los materiales utilizados en el estudio, a) Residuos sólidos biodegradables de ambas fuentes, b) materiales secantes. . . . .	26
13.	Caracterización fisicoquímica del material secante (a) Contenido de humedad, (b) Capacidad de absorción del agua, ( $\kappa$ ). . . . .	28
14.	Evaluación del pH en el compost producido al finalizar cada ciclo de compostaje: (a) Medidor portátil de pH marca Hanna (Modelo HI99121), (b) tubos falcon utilizados para la disolución. . . . .	29
15.	Resultados obtenidos para el contenido de humedad y la capacidad de absorción de los MS al inicio de cada ciclo. . . . .	35
16.	Imagen descriptiva del pretratamiento realizado a los RSB previo al ingreso a las composteras: (a) picado fino, (b) picado grueso. . . . .	38
17.	Temperaturas registradas por encima de los 40 °C durante los ciclos de compostaje evaluados (a) : Compostera 2, (b) Compostera 3. . . . .	43
18.	Gráfico descriptivo de las variables ambientales externas durante el periodo de temperatura máxima registrada en la temperatura de matriz de los 4 tratamientos evaluados. . . . .	44
19.	Demostración del lixiviado recolectado en la compostera 3 durante la tercera se- mana del segundo ciclo. . . . .	45
20.	Imágenes comparativas de la mezcla de compostaje durante la segunda semana, de la primer fase activa (a) Compostera 1: Picado fino + pellet, (b) Compostera 2: Picado fino + cartón. . . . .	46

21.	Imágenes comparativas de la mezcla de compostaje durante la segunda semana, de la primer fase activa (a) Compostera 3: Picado grueso + cartón, (b) Compostera 4: Picado grueso + pellet. . . . .	47
22.	Distribución de los datos registrados en los 4 tratamientos durante los 3 ciclos de compostaje para la variable C.H.( %). . . . .	48
23.	Gráfica de la interacción presente en los factores evaluados para la variable contenido de humedad ( %). . . . .	48
24.	Ejemplo comparativo de la granulometría del compost final producido en tratamientos con material secante diferente: (a) Compostera 1, (b) Compostera 3. . . . .	49
25.	Presencia de comunidades microbianas en el compost producido observado en los tratamientos con cartón: (a) Compostera 2, (b) Compostera 3. . . . .	50
26.	Gráfica de interacción entre los factores, pretratamiento y material secante, evaluados para la relación C/N. . . . .	52
27.	Evolución de la variable pH de los cuatro tratamientos para cada ciclo. . . . .	53
28.	Curva de calibración obtenida para las variables temperatura y humedad relativa de los sensores BME280, DHT21 y DS18B20 utilizados. . . . .	55
29.	Frecuencia de datos obtenidos durante la fase activa del primer ciclo: (a) Compostera 2, (b) Compostera 3. . . . .	57
30.	Gráficos descriptivos del comportamiento de las variables del sistema de monitoreo de las composteras relacionadas con la atmósfera interna: Segundo Ciclo: (a) Compostera 1, (b) Compostera 3. . . . .	58
A1.	Diagrama de flujo para el recibo, pretratamiento y adición de los materiales en el proceso de compostaje. . . . .	71

B1. Flujo de trabajo para el procesamiento de datos recolectados por los sistemas de monitoreo. . . . .	72
D1. Temperatura de matriz promediada en C-1 durante los 3 ciclos de evaluación. . . .	74
D2. Temperatura de matriz promediada en C-2 durante los 3 ciclos de evaluación. . . .	75
D3. Temperatura de matriz promediada en C-3 durante los 3 ciclos de evaluación. . . .	76
D4. Temperatura de matriz promediada en C-4 durante los 3 ciclos de evaluación. . . .	77
E1. Descripción: (a) DHT21 en la C-4 al finalizar el 3er ciclo de compostaje, (b) Partículas adheridas al filtro del sensor DFRobot (c) Acumulación de agua alrededor del sensor DFrobot (d) Condensación excesiva alrededor de las aberturas del sistema de monitoreo con la compostera . . . . .	78
G1. Resultados obtenidos mediante un análisis químico completo de abonos orgánicos en estado solido para los RSB al inicio de cada ciclo de compostaje. . . . .	81
G2. Resultados obtenidos del análisis de la relación CN del compost producido al finalizar cada ciclo de compostaje para los 4 tratamientos. . . . .	82

## Índice de tablas

1.	Diseño experimental factorial $2^2$ . . . . .	30
2.	Distribución temporal de los ciclos y fases del estudio. . . . .	31
3.	Cuadro resumen de la cantidad de material secante ideal para un proceso de compostaje doméstico al 60 % de humedad con base en 1 kg de residuos sólidos. . . . .	36
4.	Resumen de los valores obtenidos para los residuos sólidos biodegradables al inicio de cada ciclo de compostaje para las variables de interés: Contenido de humedad, relación Carbono/Nitrógeno y pH. . . . .	39
5.	Valores registrados del contenido de humedad de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje. . . . .	40
6.	Valores registrados de la relación C/N de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje. . . . .	40
7.	Valores registrados del pH de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje. . . . .	41
8.	Costo económico de la fabricación del sistema de monitoreo propuesto para la evaluación de las condiciones internas en las composteras giratorias. . . . .	54
9.	Resumen de los datos registrados para las variables del SM-Amb.ext durante el estudio realizado. . . . .	55
10.	Tabla resumen para la variable temperatura de matriz de compostaje obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación. . . . .	56
11.	Tabla resumen para la variable temperatura de ambiente interna obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación. . . . .	59

12.	Tabla resumen para la variable humedad relativa interna obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación. . . . .	59
13.	Tabla resumen para la variable concentración de oxígeno en el ambiente interno obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación. . . . .	60
F1.	Correlación de Pearson entre la variable temperatura de matriz de compostaje con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa. . . . .	79
F2.	Correlación de Pearson entre la variable temperatura ambiental interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa. . . . .	79
F3.	Correlación de Pearson entre la variable humedad relativa interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa. . . . .	79
F4.	Correlación de Pearson entre la variable concentración de oxígeno ambiental interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa. . . . .	80

## RESUMEN

El compostaje es un proceso de transformación biológica que permite la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Esta técnica se ha vuelto relevante en Costa Rica, donde hasta un 60 % de los residuos sólidos recolectados por las municipalidades son biodegradables, con un incremento estimado en la generación por parte de las ciudades del 4 % anual en la última década. En respuesta a esta situación, han surgido iniciativas para la revalorización de estos residuos como el Plan Nacional de Compostaje derivado del Plan de Descarbonización 2018-2050 (Gobierno de la República de Costa Rica, 2019). Dentro de estas estrategias, destaca la promoción del compostaje doméstico como una alternativa efectiva del tratamiento puntual de la fuente de residuos sólidos biodegradables con beneficios agregados, como la generación de abono, reducción de la contaminación y desarrollo de una economía circular.

La función del material secante es fundamental en el compostaje, ya que contribuye directamente a equilibrar la humedad y facilitar una estructura favorable para la degradación bajo condiciones aeróbicas. Con el objetivo de profundizar en la optimización del proceso de compostaje doméstico se desarrolló un diseño experimental factorial tipo  $2^2$ , en el cual se evaluó el efecto de dos factores, el pretratamiento y el material secante (MS); a dos niveles, picado fino y picado grueso, y pellet de madera y cartón para huevos. El estudio se realizó en el cantón de Escazú, San José, durante los meses de Octubre 2022 a Febrero 2023. Se establecieron 4 tratamientos distintos: C1: Fino-Pellet, C2: Fino-Cartón, C3: Grueso-Cartón y C4: Grueso-Pellet y se corrieron tres ciclos de compostaje con una duración de dos meses cada ciclo, dividido en una fase activa de adición de material y una fase pasiva de cese de la adición y maduración del compost. Para comparar el uso e influencia de los factores, se caracterizó la capacidad de absorción del agua de los MS y se evaluaron las variables fisicoquímicas: pH, contenido de humedad y la relación C/N de los residuos antes y después de cada ciclo en el CICA y CIA. En conjunto, se implementó una metodología de monitoreo continua para las condiciones internas de las composteras basado en la placa de desarrollador de bajo costo ESP32 y los sensores: DHT21 (temperatura ambiental y humedad relativa interna), DS18B20 (temperatura de matriz de compostaje) y DFrobot I2C sensor de oxígeno (concentración de oxígeno ambiental interna).

Mediante el sistema de monitoreo de ambiente externo, se registró una temperatura ambiental media de  $19.5 \pm 0.9$  °C y una humedad relativa media de  $78.2 \pm 5.2$  % durante el periodo de

evaluación. Los residuos sólidos biodegradables (RSB) utilizados se recolectaron semanalmente de dos fuentes y homogeneizados previo al ingreso a la compostera. Los pellet de madera son comercializados por la empresa 360 Soluciones Verdes y el cartón para huevos se obtuvo producto del reciclaje del hogar de los participantes.

Durante los tres ciclos de compostaje, el cartón para huevos presentó un menor contenido de humedad, con un valor de  $10.6 \pm 0.9\%$  y una capacidad de absorción promedio de  $2.8 \pm 0.7 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}}$ , respecto al pellet con  $12.3 \pm 0.8\%$  y  $1.9 \pm 0.1 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}}$ . Sin embargo, este valor depende del área superficial del MS y se encontró que la degradación del cartón para huevos es lenta y no permite homogeneizar los RSB correctamente durante el proceso de compostaje. Mediante la evaluación de las varianzas (ANOVA), se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados respecto al tipo de material secante utilizado en las variables contenido de humedad (C.H.) y relación C/N.

Se generó un proceso más eficiente de acuerdo con el C.H. y la relación C/N para los tratamientos con pellet, al producir un compost con una granulometría más favorable, y valores cercanos al rango recomendado en la literatura (C.H.: 73.2% a 78.2%; C/N: 20 a 24.1) respecto a los valores obtenidos en el cartón para huevos (C.H.: 80.6% a 84.3%; C/N: 16.6 a 20.9). Todos los tratamientos presentaron una evolución favorable para la variable pH con una media final entre 5.9 y 8.4. Sin embargo, de acuerdo con la temperatura, los tratamientos con cartón alcanzaron las temperaturas máximas con  $42.8 \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $43.8 \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que promueve directamente la actividad biológica en el proceso de compostaje.

La implementación del sistema de monitoreo continuo para las composteras generó una cantidad promedio de 9564 mediciones por ciclo para la temperatura de matriz. En cuanto a los sensores ambientales, se registraron interrupciones asociadas al mantenimiento del sistema de monitoreo debido las condiciones ambientales internas adversas como condensación y presencia de insectos y partículas.

Para generar una proporción adecuada durante el proceso de compostaje, con base en 1 kg de residuos sólidos, se puede utilizar aproximadamente 160 g de pellet y 120 g de cartón, o bien, 70 g de cada material secante, utilizando las composteras domésticas giratorias de doble cámara de 160 L. Su uso puede representar ahorros significativos en la gestión de residuos para la industria y el consumidor, al aprovechar eficientemente recursos de desecho comunes. Cabe destacar, la necesidad de reducir el tamaño del cartón para huevos para obtener rendimientos favorables.

## ABSTRACT

Composting is a biological transformation process that allows the decomposition and stabilization of organic matter. This technique has become relevant in Costa Rica, where up to 60 % of the solid waste collected by municipalities is biodegradable, with an estimated increase in generation by cities of 4 % annually in the last decade. In response to this situation, initiatives have emerged for the revaluation of these residues, such as the National Composting Plan derived from the Decarbonization Plan 2018-2050 (Gobierno de la República de Costa Rica, 2019). Among these strategies, the promotion of domestic composting stands out as an effective alternative for the specific treatment of the source of biodegradable solid waste with added benefits, such as the generation of fertilizer, pollution reduction, and the development of a circular economy.

The function of the drying material is fundamental in composting, as it directly contributes to balancing moisture and facilitating a favorable structure for degradation under aerobic conditions. With the aim of delving into the optimization of the domestic composting process, a 2<sup>2</sup> factorial experimental design was developed, in which the effect of two factors, pretreatment and drying material (DM); at two levels, fine chopping and coarse chopping, and wood pellet and egg carton, was evaluated. The study was conducted in the canton of Escazú, San José, during the months of October 2022 to February 2023. Four different treatments were established: C1: Fine-Pellet, C2: Fine-Carton, C3: Coarse-Carton, and C4: Coarse-Pellet and three composting cycles were run with a duration of two months each cycle, divided into an active phase of material addition and a passive phase of cessation of addition and compost maturation. To compare the use and influence of the factors, the water absorption capacity of the DMs was characterized, and the physicochemical variables were evaluated: pH, moisture content, and the C/N ratio of the residues before and after each cycle in the CICA and CIA. Together, a continuous monitoring methodology was implemented for the internal conditions of the composters based on the low-cost ESP32 developer board and the sensors: DHT21 (ambient temperature and internal relative humidity), DS18B20 (composting matrix temperature), and DFrobot I2C oxygen sensor (internal ambient oxygen concentration).

Through the external environment monitoring system, an average ambient temperature of  $19.5 \pm 0.9$  °C and an average relative humidity of  $78.2 \pm 5.2$  % were recorded during the evaluation period. The biodegradable solid wastes (BSW) used were collected weekly from two sources and homogenized before entering the composter. The wood pellets are marketed by the company 360

Soluciones Verdes, and the egg carton was obtained from the recycling of the participants' homes.

During the three composting cycles, the egg carton had a lower moisture content, with a value of  $10.6 \pm 0.9 \%$ , respecto al pellet con . and an average absorption capacity of  $2.8 \pm 0.7 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}}$ , compared to the pellet with  $12.3 \pm 0.8 \%$  and  $1.9 \pm 0.1 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}}$ . However, this value depends on the surface area of the DM, and it was found that the degradation of the egg carton is slow and does not allow the BSW to be homogenized correctly during the composting process. Through the evaluation of variances (ANOVA), significant differences were found between the evaluated treatments regarding the type of drying material used in the variables moisture content (M.C.) and C/N ratio.

A more efficient process was generated according to the M.C. and the C/N ratio for the treatments with pellet, by producing compost with a more favorable particle size, and values close to the range recommended in the literature (M.C.: 73.2 % to 78.2 %; C/N: 20 to 24.1) compared to the values obtained in the egg carton (M.C.: 80.6 % to 84.3 %; C/N: 16.6 to 20.9). All treatments showed a favorable evolution for the pH variable with a final average between 5.9 and 8.4. However, according to temperature, treatments with carton reached maximum temperatures with  $42.8 \pm 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $43.8 \pm 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ , which directly promotes biological activity in the composting process.

The implementation of the continuous monitoring system for the composters generated an average of 9564 measurements per cycle for the matrix temperature. As for the environmental sensors, interruptions were recorded associated with the maintenance of the monitoring system due to adverse internal environmental conditions such as condensation and the presence of insects and particles.

To generate an appropriate proportion during the composting process, based on 1 kg of solid waste, approximately 160 g of pellet and 120 g of carton can be used, or 70 g of each drying material, using the 160 L dual-chamber rotating domestic composters. Its use can represent significant savings in waste management for the industry and the consumer, by efficiently taking advantage of common waste resources. It is worth noting the need to reduce the size of the egg carton to obtain favorable yields.

# INTRODUCCIÓN

## 1.1. Justificación del proyecto

Desde el año 2010, Costa Rica comenzó la implementación de la Ley para la Gestión Integral de los Residuos - N°8839, con el objetivo de regular la gestión y el uso eficiente de los recursos mediante acciones que incentiven soluciones para su tratamiento (Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica, 2010). Los residuos sólidos biodegradables (RSB) presentan un interés público y académico, dado que los tratamientos que predominan actualmente, son la quema a cielo abierto o la acumulación y depósito en el subsuelo. Sumado a esto, las instalaciones donde se realizan estas actividades, presentan ya excedentes en sus capacidades de manejar eficientemente los volúmenes producidos; además de los daños ambientales asociados a la operación (Vinet y Zhedanov, 2011).

El aumento en la generación de los residuos sólidos producidos en zonas urbanas, se estima en 4 % anual en la última década, y hasta un 60 % del total, son residuos revalorizables orgánicos (Diaz y Otoma, 2014). Actualmente, se estima alrededor de 3500 toneladas diarias de residuos, las cuales son transportadas hacia rellenos sanitarios, donde no reciben un tratamiento adecuado y suelen generar riesgos a la salud de la comunidad y los suelos (Bermúdez et al., 2020). A esto se suma, que en general los desperdicios de comida pueden llegar a alcanzar hasta 45 % del volumen en rellenos sanitarios, especialmente en países en desarrollo (Keng et al., 2020); con solo una fracción cercana al 1 % de los residuos orgánicos es valorizada y procesada adecuadamente en el país (Vinet y Zhedanov, 2011). Por ejemplo, la implementación de modelos y estrategias que mitiguen el efecto negativo de la gestión ineficiente de los residuos orgánicos, es de vital importancia para el bienestar de las comunidades y el desarrollo de la sociedad, como lo son las logísticas de recolección y transformación de los residuos mediante el compostaje (Ramírez y Castro, 2019).

De acuerdo con el Plan Nacional de Compostaje, derivado del Plan de Descarbonización (Gobierno de la República de Costa Rica, 2019); el compostaje doméstico es una alternativa del tratamiento puntual de la fuente de residuos sólidos biodegradables y forma parte del eje temático siete: Gestión integral de residuos. Algunos obstáculos identificados al tratar estos residuos mediante la adopción del compostaje son: la escalabilidad, la infraestructura específica y un costo-beneficio

positivo para los operadores (González-Sierra et al., 2019). Además, la mala gestión de los residuos orgánicos genera múltiples inconvenientes como la producción de anaerobiosis que genera malos olores, filtración de compuestos en el subsuelo y liberación de patógenos, convirtiendo la actividad en un proceso poco atractivo (Ismael et al., 2013).

Es aquí donde se destaca la distinción entre el compostaje industrial y el doméstico, debido a la variabilidad de sistemas y los inconvenientes asociados con la estandarización del proceso (Mason y Milke, 2005). Entre las soluciones brindadas, para descentralizar el tratamiento de los residuos, el compostaje doméstico promueve un método influyente en la disminución del residuo acumulado y aporta rutas alternas para generar insumos que se integren positivamente a la economía y al ambiente (González-Sierra et al., 2019).

La implementación de un método de compostaje se basa en la biomasa disponible, su ubicación, presupuesto y los incentivos que se generen de esta práctica (Vega, 2008). Sin embargo, la heterogeneidad en la biomasa utilizada, y la carencia de incentivos y voluntad ciudadana, genera un faltante de estándares que distancia al usuario de realizar un tratamiento adecuado y de bajo costo de los residuos producidos en su hogar (Manu et al., 2019).

Para degradar adecuadamente los residuos orgánicos domésticos, es necesario implementar pretratamientos, como picado y secado, para propiciar las reacciones biológicas de degradación (Ismael et al., 2013). Además, la incorporación de materiales secantes es vital para controlar la humedad, la emisión de gases y el lixiviado producido, lo que promueve las condiciones adecuadas en las cuales los microorganismos descomponedores realizan su actividad biológica. Estos materiales, además de favorecer el proceso de compostaje son residuos comunes que se revalorizan y se evita su descarte innecesario (Xu et al., 2021).

Tomando en cuenta lo anteriormente expuesto y considerando el vacío de información, acerca de los efectos que tienen diversas prácticas sobre el proceso del compostaje doméstico y su producto final, se llevó a cabo este proyecto, el cual evaluó el efecto del uso de dos materiales secantes diferentes y la aplicación de dos procesos de pretratamiento distintos de la biomasa sobre este proceso y el compost resultante. Se selecciona el cartón para huevos y los pellets de madera por su disponibilidad, costo económico, capacidad de absorción y como alternativa al descarte de residuos mediante la revalorización del material y la promoción de una economía circular.

La aplicación de estos materiales secantes y pretratamientos permite una gestión de compostaje doméstico más eficiente, con un producto final de mejor calidad y reduce la contaminación derivada de un manejo incorrecto.

Los resultados que se obtuvieron, servirán como insumos para producir información que permita realizar el compostaje doméstico de una manera más eficiente, a la vez que se obtendrá un producto con mejores características, e incentiva a los usuarios a incorporar prácticas sostenibles en las rutinas del hogar y en las comunidades. También, permitirá evitar consecuencias negativas derivadas de un manejo deficiente como malos olores y lixiviados de la compostera, en cuanto aporta procedimientos efectivos, para la integración de los usuarios con el objetivo de desarrollo sostenible siete del Plan de Descarbonización 2020-2050 relacionado con la revalorización y gestión integral de los residuos.

## **1.2. Alcance del proyecto**

El ser humano es responsable por la producción y disposición de los residuos generados diariamente y su efecto sobre los ecosistemas. Las operaciones asociadas a la recolección y tratamiento de los residuos biodegradables se han vuelto una actividad laboriosa e intensamente energética, que impacta negativamente al ambiente y a las comunidades alrededor de los centros de tratamiento (Manu et al., 2019).

Con el fin de mitigar el impacto ambiental, diferentes organizaciones gubernamentales alrededor del mundo han establecido metas y acuerdos para tratar y disminuir el volumen de desechos aprovechables que llegan a los rellenos sanitarios (González-Sierra et al., 2019). El tratamiento de los residuos desde el marco legislativo, en modelos como el de la Unión Europea, clasifican como principal prioridad la prevención del residuo y promueven el compostaje a pequeña escala (Tatàno et al., 2015).

El proceso del compostaje se basa en parámetros de control, como temperatura, emisión de gases, consumo de oxígeno y contenido de humedad; los cuales están ampliamente estudiados para el manejo industrial y con reactores específicos (Mason y Milke, 2005). En cambio, a escala doméstica, no está disponible la información sobre cómo inciden los procesos y materiales a degradar, en los parámetros de control (Guidoni et al., 2018).

Dado que el compostaje doméstico se realiza en espacios reducidos y con una gran diversidad de residuos, no es inherente al proceso que se alcance las condiciones adecuadas para producir un producto apto para la reincorporación en suelos (Ismael et al., 2013). En países latinoamericanos, el enfoque dado al manejo de los residuos orgánicos producidos en los hogares, se ha basado en la disposición final y en mitigar el impacto ecológico que los rellenos sanitarios generan (Diaz y Otoma, 2014). A su vez se suma, que hay impedimentos para reciclar algunos materiales de uso cotidiano como tipos de cartones, los cuales precisan ser separados y tratados antes de su disposición final (Herrera, 2017).

Es por lo anterior, que el presente proyecto determinó los efectos de las prácticas del pretratamiento, picado fino y picado grueso, y del uso de dos materiales secantes, cartón para huevos y pellets de madera, con el fin de aportar información al vacío que existe en la sistematización del proceso y producto final del compostaje doméstico.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

Evaluar el efecto de dos materiales secantes y dos pretratamientos, en el proceso de compostaje doméstico y en la calidad del compost producido en una compostera giratoria, mediante el uso de un sistema de monitoreo continuo de bajo costo.

#### **1.3.2. Específicos**

- Comparar el uso de dos materiales secantes, cartón para huevos y pellets de madera, en el compostaje doméstico realizado en una compostera giratoria para evaluar el proceso de compostaje y la calidad del compost producido.
- Contrastar la influencia de dos procesos de pretratamiento, picado fino y picado grueso, sobre el proceso de compostaje doméstico en una compostera giratoria para evaluar el proceso de compostaje y la calidad del compost producido.
- Evaluar una metodología de monitoreo continuo de las condiciones internas para determinar el desempeño del proceso de compostaje mediante el uso de un sistema de monitoreo de bajo costo adaptado a composteras giratorias.

# MARCO TEÓRICO

## 2.1. Residuos domésticos

### 2.1.1. Residuos sólidos biodegradables

Diferentes autores han descrito la biomasa proveniente de residuos domésticos con base en propiedades fisicoquímicas como contenido de carbono, nitrógeno, humedad y otros nutrientes. Ismael et al., [2013](#) encontraron que los restos agrícolas y del hogar presentan altas proporciones de nitrógeno, así como del contenido de humedad. Lo anterior, se ve reflejado durante la fase activa de descomposición, ya que los microorganismos consumen entre 15 a 30 veces más carbono y una relación alta en C/N inhibe el proceso de degradación aeróbica (Azim et al., [2018](#)).

Azim et al., [2018](#) muestra una caracterización de RSB procedentes de hogares, donde restos vegetales tienen relaciones C/N de 10/15; pastos de 10/20, y en residuos domésticos de 26/45. Para un procesamiento de los residuos en el compostaje doméstico, se debe añadir entre 1/10 a 1/5 del total en peso de material secante, para dar condiciones de degradación ideales a los residuos sólidos biodegradables. Los residuos de cocina y de frutas pueden presentar relaciones variadas de C/N, desde 15.6 hasta 34.8, respectivamente dependiendo de su origen (Epstein, [2011](#)).

### 2.1.2. Materiales secantes

Los materiales secantes son fundamentales en el proceso de compostaje, ya que ayudan a equilibrar la humedad y a mantener una estructura porosa en la pila de compost. Se utilizan como enmienda para generar una mejor estructura entre partículas, regulando el contenido de agua y brindando espacio para el flujo de aire. Son comúnmente utilizados para alcanzar una relación ideal de C/N en el compostaje y mejorar las condiciones iniciales para el proceso (Yang et al., [2013](#)). Entre los materiales secantes disponibles comercialmente y en la mayoría de hogares, se encuentran el cartón corrugado utilizado para el transporte de huevos y los pellets de madera comprimida.

Los materiales secantes como aserrín, burucha, cartón y pellets, se utilizan para contrarrestar el alto contenido de nitrógeno de los residuos del hogar. Además, los materiales secantes pueden influenciar procesos como la emisión de gases internos, actividad microbiana y la generación de

lixiviados (Guidoni et al., 2018). El tamaño recomendado para su incorporación en sistemas de compostaje es de 2.54 cm a 3.81 cm (1 pulg a 1.5 pulg) (Epstein, 2011).

Los comprimidos, o también llamados pellets son un material densificado que se puede obtener de biomasa residual, y son utilizados en varias industrias como combustible y material secante. Su alta densidad, permite un fácil transporte y almacenado, además de un mayor volumen y capacidad de absorción de humedad. Se comercializa como un material secante efectivo debido a su capacidad para absorber la humedad, y su rica composición en carbono. Los comprimidos se obtienen al comprimir aserrín y virutas de madera bajo alta presión, lo que resulta en un producto compacto, de fácil manejo y estandarizado (Lela et al., 2016). Al agregarlos al compost, los pellets de madera se expanden y descomponen lentamente, proporcionando una fuente constante de carbono y mejorando la estructura del compost. Asimismo, favorecen la aireación y evitan la acumulación de malos olores, mejorando la calidad y eficiencia del proceso de compostaje.

Otro material de fácil acceso es el cartón corrugado empleado en el transporte de huevos. Este material orgánico y biodegradable, está compuesto principalmente por fibras de celulosa, lignina y hemicelulosa, y proviene de residuos de papel y cartón, los cuales son pulverizados y mezclados para reducir el tamaño de las fibras. Posterior, son agregados aditivos como resinas y pigmentos que mejoran la resistencia y dan color. Una vez la mezcla lista, se vierte en moldes con la forma del cartón para huevos, y se presan con calor para endurecer la pulpa. Este tipo de cartón tiene una estructura ligera y aireada que permite la circulación de aire y la retención de humedad (Ozola et al., 2019).

En el compostaje, el cartón corrugado actúa como una fuente de carbono y ayuda a mantener una relación adecuada de carbono/nitrógeno, favoreciendo el crecimiento de microorganismos y la degradación de los residuos orgánicos. Además, su estructura porosa facilita la aireación y evita la compactación de la pila, lo que contribuye a mantener un ambiente óptimo para la descomposición.

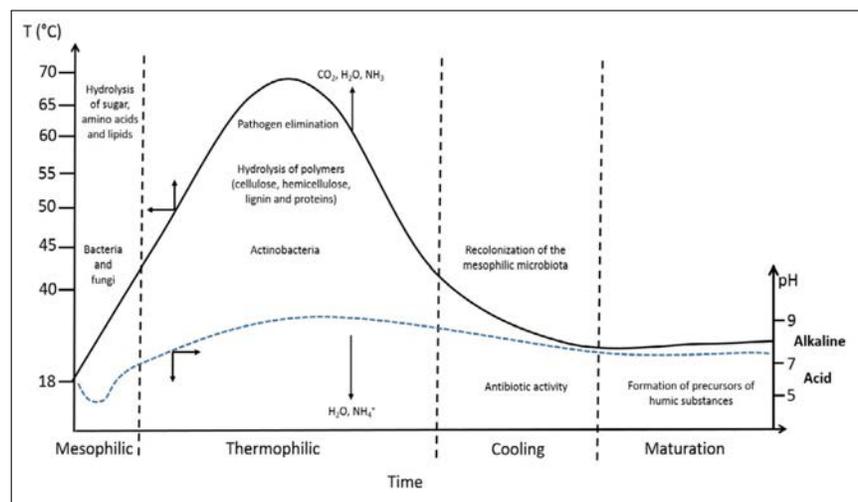
La degradación del cartón en el compostaje se basa en la relación C/N, contenido de lignina y tamaño del residuo. Al tener un mayor contenido de lignina se disminuye la velocidad de las reacciones de degradación por el aumento en el costo energético del proceso, y la especificidad microbiana necesaria. También, el tamaño del material tendrá un efecto directo sobre la exposición ante agentes degradantes, por lo que aumentará la velocidad del proceso (Zhang y Sun, 2016).

## 2.2. Proceso de Compostaje

### 2.2.1. Generalidades

El compostaje es un proceso biológico por el cual los residuos orgánicos son degradados bajo condiciones aerobias de temperatura y humedad adecuadas, para obtener un producto estable, rico en nutrientes (Manu et al., 2019). La biomasa es degradada por comunidades microbianas que interactúan bajo regímenes mesófilos y termófilos; liberando calor, vapor de agua y gases durante el proceso de degradación. Posteriormente, la materia orgánica es reorganizada en moléculas estables y ocurre una liberación de ácidos húmicos, en la fase de maduración (Azim et al., 2018).

Es posible descomponer el proceso del compostaje en dos fases principales, la fase activa y la fase de maduración, las cuales caracterizan los procesos que gobiernan la degradación del material (Walling et al., 2020). La fase activa del compostaje, es considerada la fase de descomposición, en la cual el biosistema experimenta procesos biológicos a diferentes temperaturas. Entre temperatura ambiente y hasta los 40 °C, las comunidades de microorganismos mesófilos comienzan a degradar los compuestos simples del sustrato como celulosa y liberan calor en grandes proporciones. Seguidamente, conforme aumenta la temperatura, arriba de los 40 °C, la población microbiana es reemplazada por descomponedores termofílicos, los cuales aumentan el pH producto de la liberación de amonio y la degradación de proteínas (Figura 1), (Azim et al., 2018).



**Figura 1.** Perfil de tiempo de la temperatura de matriz y el pH promedio durante un proceso de compostaje en pila (Ajmal et al., 2020)

La complejidad del proceso reside en que está intrínsecamente relacionado con reacciones biológicas y a la interacción entre el sustrato, el contenido de humedad, la temperatura, la aireación y la inoculación microbiana a través del tiempo (Seng et al., 2016). Tomando en cuenta esta complejidad, la caracterización de estos factores del sistema de estudio es imprescindible para describir el comportamiento del proceso y calidad del producto, en especial para el compostaje a pequeña escala (Guidoni et al., 2018).

En el contexto doméstico, existen una variedad de sistemas de compostaje que permiten adaptarse a espacios reducidos, en contraste con el método de pila que es utilizado para el tratamiento en varias escalas (Ismael et al., 2013). Además, comercialmente hay una oferta de dispositivos como las composteras giratorias y composteras verticales de plástico o madera que requieren una mayor inversión.

### **2.2.2. Composteras**

El compostaje doméstico es una práctica sostenible que permite a los hogares reciclar sus propios residuos orgánicos y obtener un abono natural para enriquecer el suelo de jardines y macetas. Existen diversos tipos de composteras domésticas diseñadas para adaptarse a diferentes espacios y necesidades, siendo las composteras giratorias una opción popular debido a su facilidad de uso y eficiencia en el proceso de compostaje.

Las composteras giratorias, también conocidas como composteras rotativas o tambor compostador, son recipientes cerrados y herméticos, con capacidad que varía desde los 50 hasta los 400 litros, dependiendo del modelo y las necesidades del usuario. Están montadas sobre un soporte que permite girar el tambor fácilmente, lo que facilita la aireación y mezcla de los residuos sin necesidad de removerlos manualmente.

El funcionamiento de las composteras giratorias se basa en introducir los residuos orgánicos en el tambor y se cierra la tapa, asegurando un ambiente controlado y evitando olores desagradables, insectos o animales. Se recomienda girar el tambor al menos una vez al día, lo que permite una mejor aireación y mezcla de los materiales, promoviendo el proceso de descomposición. Además, algunas composteras giratorias cuentan con compartimentos separados que permiten añadir nuevos residuos mientras se madura el compost en otro compartimento.

Es posible encontrar múltiples diseños para el compostaje, donde se abarca varias estructuras con diferentes mecanismos para obtener un resultado similar. Dentro del proceso doméstico, se observa en la **Figura 2**, diseños comúnmente utilizados para compostaje a pequeña escala, como un sistema de pila abierto con una estructura de madera que contiene el material. Estos métodos son utilizados para trabajar de pequeña a gran escala, y presenta una influencia importante de las condiciones externas, además de la necesidad de un constante volteo para incorporar las capas externas en la degradación (Seng et al., 2016). Un método sencillo y de bajo costo es el Takakura, el cual consiste en una inoculación inicial de la biomasa con microorganismos fermentativos y descomponedores sobre el cual es introducido al sustrato por degradar, y se cubre para fomentar la proliferación de la comunidad microbiana deseada (Hernández et al., 2015). Este método es altamente eficiente y es utilizado comúnmente para acelerar el tratamiento de los residuos domésticos, aunque presenta limitaciones para su escalamiento (Chaves-Arias et al., 2019).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 2.** Tipos de composteras domésticas: (a) Método en Pila, (b) Método Takakura (c) Rotativa artesanal (d) Rotativa de doble cámara comercial.

Las composteras giratorias de uso doméstico, permiten en espacios reducidos como residencias urbanas, tratar los residuos orgánicos generados. Pueden albergar una o dos cámaras para el volteo y maduración continua del compostaje. Estas composteras están diseñadas para una mayor frecuencia de adición de material. A su vez, es necesario incorporar materiales secantes, para obtener el producto deseado, generar una estructura adecuada para la comunidad microbiana y reducir la liberación de lixiviados (Ismael et al., 2013).

### **2.2.3. Pretratamientos**

Para facilitar los procesos biológicos y generar una mejor condición inicial para el material por degradar, se practica la reducción del tamaño de las partículas que componen los residuos orgánicos previo al ingreso a un sistema de compostaje. Un tamaño de partícula adecuado facilita la aireación y la actividad microbiana, lo que acelera la descomposición y un compostaje homogéneo, evitando así, la formación de áreas anaeróbicas dentro de la compostera. Para ello, se considera importante triturar o cortar los residuos en trozos pequeños para asegurar una mayor superficie de contacto y facilitar la acción de los microorganismos.

Los pretratamientos realizados a la materia prima biodegradable son necesarios para alcanzar mejores tiempos de degradación, y productos homogéneos (Francou et al., 2008). El picado del material, altera la granulometría del material y reduce el espacio poroso de la matriz generando una liberación de líquidos, compactación y disminución del flujo de aire por la matriz interna de la biomasa (Azim et al., 2018). Sin embargo, se considera un proceso necesario para generar las condiciones iniciales óptimas que permitan el compostaje (Guidoni et al., 2018). Además, los pretratamientos liberan ácidos orgánicos y gases como metano, acelerando la degradación y disminuyendo inicialmente el pH del sustrato (Xu et al., 2021).

El diámetro ideal de partículas luego del pretratamiento, ronda entre 5 - 30 cm, para evitar la compactación o exceso de aire, provocando una disminución de la temperatura, y por ende, inhibición del proceso (Fallas Conejo y Fallas, 2016). Aunque otros autores, han encontrado buenos resultados con tamaños menores de partícula, utilizando trituradoras (Ismael et al., 2013), y picado a 1cm (Yang et al., 2013).

#### **2.2.4. Microorganismos**

Los microorganismos desempeñan un papel esencial en el proceso de compostaje al participar activamente en la transformación y migración de nutrientes. En el compostaje, las bacterias y hongos contribuyen a la descomposición de materia orgánica y la liberación de nutrientes esenciales para las plantas.

Entre las bacterias presentes en el compost, se encuentran *Pseudomonas*, *Burkholderia* y *Zymomonas*, que contribuyen a la transformación del nitrógeno. Además, otros microorganismos, como ciertos hongos y bacterias, favorecen la solubilización de fósforo y potasio, lo que permite que estos nutrientes estén más disponibles para las plantas. Estos microorganismos mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo y enriquecen el compost con elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (Sánchez et al., 2017)

Los actinobacterias, también conocidos como actinomicetos, son un grupo de bacterias filamentosas gram-positivas que desempeñan un papel fundamental en el proceso de compostaje debido a su capacidad para crecer a altas temperaturas y degradar compuestos complejos. Pueden descomponer materiales lignocelulósicos y convertirlos en sustancias más estables, como precursores de sustancias húmicas. Además, algunas actinobacterias producen antibióticos que actúan contra microorganismos patógenos y promueven el crecimiento de las plantas (Sánchez et al., 2017)

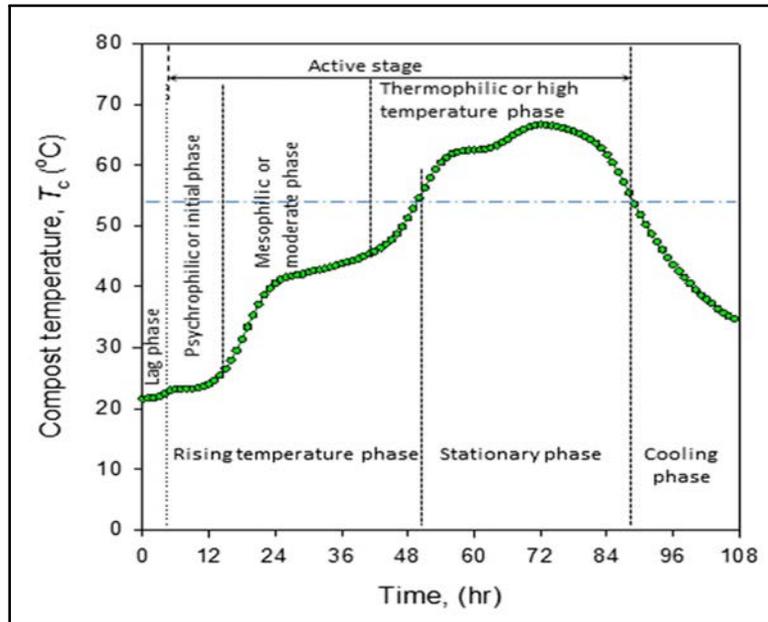
El conocimiento de los tipos de bacterias y hongos que contribuyen a la descomposición y transformación de nutrientes, así como su fisiología, es importante para desarrollar estrategias de enriquecimiento del compost. Una de las estrategias efectivas es la inoculación de microorganismos específicos para solubilizar fósforo y potasio y transformar el nitrógeno (Kuok et al., 2012).

#### **2.2.5. Factores del compostaje**

**2.2.5.1. Temperatura** Para regular el proceso de compostaje adecuadamente es necesario generar parámetros iniciales y de monitoreo bajo condiciones óptimas. La temperatura es un factor fundamental que se utiliza como indicador clave del proceso de compostaje y presenta una relación directa con la degradación de la biomasa ya que influye en la actividad de los microorganismos responsables de la descomposición. Debido a la actividad microbiana, la temperatura puede elevarse rápidamente y es preferible que se experimenten temperaturas mayores o iguales a 60°C, para inhibir

patógenos, y semillas de plantas no deseadas en el producto final (Herrera, 2017).

En general, el compostaje se desarrolla en tres fases térmicas: mesofílica (20-45°C), termofílica (45-65°C) y de enfriamiento (temperaturas descendentes). Una exposición prolongada a temperaturas por encima de los 60°C, puede desacelerar el proceso, al inhibir el desarrollo de los microorganismos descomponedores de cadenas largas de polímeros, lignina y celulosa (Azim et al., 2018) (Figura 3).



**Figura 3.** Perfil de temperatura de matriz en un proceso de compostaje en tambor rotatorio (Ajmal et al., 2020)

Con el fin de monitorear el proceso, la temperatura es utilizada como parámetro para determinar los mejores momentos para humedecer y ventilar la matriz del compostaje (Walling et al., 2020). Se ha reportado que la temperatura es una variable que afecta el proceso, más que las variaciones en el pH y la relación C/N en el sustrato, por la influencia en la inhibición de las actividades metabólicas de los microorganismos (Herrera, 2017).

Los estudios en compostajes domésticos han reflejado, una dificultad para alcanzar condiciones óptimas, generalmente dado por la carencia de una proporción adecuada de C/N y un alto contenido de humedad del material inicial. Estos factores junto con la temperatura, alteran las condiciones internas en las cuales los microorganismos degradan el sustrato y liberan calor (Yang et al., 2013). A diferencia, en el compostaje industrial, la medición de los parámetros de

control es imprescindible para mantener el proceso continuo o aprovechar calor u reducir los gases invernadero emitidos a gran escala (Seng et al., 2016).

**2.2.5.2. Aireación** El compostaje es un proceso aeróbico, lo que significa que requiere oxígeno para llevarse a cabo de manera eficiente. La aireación es fundamental para proporcionar oxígeno a los microorganismos y evitar la formación de condiciones anaeróbicas. El volteo o la aireación forzada son métodos comunes para mejorar el contenido de oxígeno en el compost. Las composteras giratorias facilitan la aireación al permitir girar fácilmente el tambor, lo que promueve la entrada de aire y evita la compactación de los residuos.

La oxigenación requerida en sistemas de compostaje a gran escala, usualmente es necesaria para remover los excesos de calor y elevar la concentración de oxígeno en el sistema. Los microorganismos aeróbicos precisan de concentraciones del 5 % de oxígeno para mantener una degradación adecuada de la biomasa (Fallas Conejo y Fallas, 2016).

También, la aireación está relacionada con la porosidad del material, ya que el oxígeno llena estos compartimentos y permite el flujo de aire. A su vez, el aumento en la humedad del sistema, reduce el contenido de oxígeno y la capacidad de movilizar el aire por el sustrato, generando así, zonas anaerobias. El consumo de oxígeno se da en mayor cantidad al inicio de la degradación del sustrato, por parte de los microorganismos. Posteriormente se reduce, conforme se madura y se estabiliza el material (Azim et al., 2018).

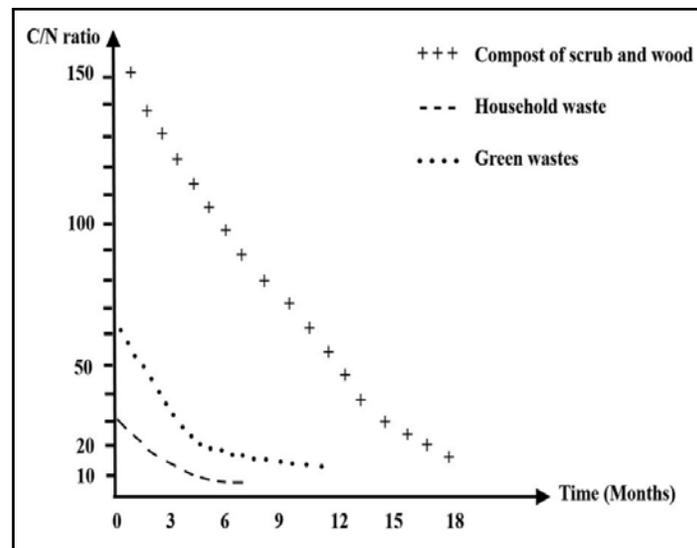
En la degradación, son liberados gases producto de la actividad microbiana como el CO<sub>2</sub> y el metano, que se mezclan en el espacio intersticial, desplazando el vapor de agua presente en los poros del sustrato (Bustamante et al., 2013). La concentración del dióxido de carbono en el sistema no debe superar el 15 %, lo cual, corresponde a un máximo aproximado de 6 % de oxígeno (Azim et al., 2018).

**2.2.5.3. Relación C/N** La relación de carbono/nitrógeno (C/N), representa la proporción de nutrientes presente en el sustrato, e influye en el ritmo de digestión de los microorganismos, los cuales descomponen 30 partes de celulosa por cada parte de nitrógeno. Estos compuestos son utilizados como fuente de energía y de síntesis de proteínas y amino ácidos en los microorganismos. La degradación de la biomasa genera sustratos solubles e insolubles, gases y pérdida de masa por

reducción del agua contenida, en proporciones relativas a la biomasa inicial. La textura del material se vuelve más fina y el volumen se reduce entre el 25 % al 50 % del original (Azim et al., 2018).

El sustrato del compostaje se compone de capas de nutrientes y diferentes compuestos, donde comunidades microbianas diversas degradan las moléculas simples hasta las complejas, liberando calor en el proceso. Lo anterior, se ve reflejado en un aumento de la temperatura que promueve las reacciones biológicas y la capacidad de sanitizar el proceso (Zhang y Sun, 2016). Por último, el sustrato es convertido en un producto final, llamado humus, el cual es un material madurado con baja actividad microbiana, rico en carbono, nutrientes y una relación C/N cercana a 10 (Azim et al., 2018).

La relación de C/N influye en la actividad microbiana y la velocidad de descomposición mediante el consumo por parte de los microorganismos del carbono como fuente de energía y el nitrógeno para la síntesis de proteínas. Una relación C/N óptima durante el proceso de compostaje se encuentra entre 25:1 y 30:1, lo que permite un compostaje eficiente y evita la producción de malos olores y la liberación de amoníaco. En comparación con materiales con proporciones mayores de C/N entre sí, como madera y arbustos, pueden durar hasta 18 meses para degradarse totalmente, a diferencia de residuos doméstico que presentan lapsos menores de tiempo para la maduración de hasta 7 meses (Azim et al., 2018), (Figura 4).



**Figura 4.** Evolución de la variable relación C/N para varios residuos orgánicos durante el proceso de compostaje (Azim et al., 2018).

**2.2.5.4. Contenido de humedad** El agua presente en el biosistema proviene del agua generada por los microorganismos al momento de descomponer los materiales y en su mayoría se pierde por evaporación y filtración. El contenido de humedad del compost se ve influenciado por el movimiento del agua en el aire en su interior, y los espacios porosos del sistema. El flujo de materiales y nutrientes dentro del biosistema es permitido por el agua, la cual promueve el proceso de degradación aerobia. El control de la humedad del compost es una forma de predecir el comportamiento del compostaje, ya que los procesos metabólicos pueden inhibirse cuando el contenido de humedad desciende por debajo de 50 % (Azim et al., 2018).

### **2.3. Monitoreo en el compostaje**

El estudio de los parámetros de compostaje, se ha basado en el monitoreo del proceso y de la calidad del producto final; con un menor enfoque en las condiciones iniciales como proporción C/N, contenido de humedad y tamaño de partícula (Azim et al., 2018). Para sistemas de compostaje abierto, como pilas, la medición de la temperatura es realizada mediante la inserción de termómetros, de forma periódica en diferentes puntos de la matriz. Otros parámetros como relación C/N, pH, humedad y sólidos volátiles son analizados tomando muestras y llevadas al laboratorio (Ismael et al., 2013).

Para el monitoreo del proceso de compostaje, se cuenta con metodologías continuas o puntuales de las mediciones, y con equipos de alto o bajo costo económico para el análisis principalmente de la temperatura de la matriz como indicador de calidad del proceso de compostaje (Jordão et al., 2017). Sin embargo, poco se ha estudiado sobre el comportamiento en composteras domésticas y su influencia en los factores de monitoreo y en el producto final (Guidoni et al., 2018).

Los autores (Jordão et al., 2017) propusieron un diseño de bajo costo, con el fin de monitorear las condiciones internas mediante un dispositivo controlador. Este equipo registra la temperatura de la matriz en diferentes puntos y se almacenan los datos en una tarjeta SD. La implementación de equipos de monitoreo interno, permite al usuario reducir las horas de operación y tener una mejor perspectiva del funcionamiento del sistema. Otros autores, propusieron un software embebido para una compostera inteligente mediante la integración de varios sensores en el monitoreo del proceso de compostaje, como concentración de oxígeno, peso, contenido de humedad de la matriz y tempe-

ratura, así como una interfaz interactiva y controles para equipos como aspersores y ventiladores (Sepúlveda-Cisneros et al., 2021).

Los microcontroladores utilizados son dispositivos electrónicos integrados que combinan un procesador, memoria y periféricos en un solo chip. Estos dispositivos han ganado popularidad en las últimas décadas debido a su capacidad para controlar y gestionar una amplia variedad de dispositivos electrónicos y sistemas integrados, como sensores, actuadores y motores. Algunos de los microcontroladores más comunes en el mercado incluyen las familias AVR de Microchip (anteriormente Atmel), ARM Cortex-M de diferentes fabricantes y la popular plataforma Arduino.

Algunas características clave que distinguen a los microcontroladores incluyen el tamaño de la memoria (RAM y Flash), la velocidad del reloj, la cantidad y el tipo de periféricos integrados y el consumo de energía. Al elegir un microcontrolador y un protocolo de comunicación para una aplicación específica, es crucial considerar factores como el rendimiento, la facilidad de uso, la cantidad de dispositivos a conectar y las limitaciones del hardware (Sepúlveda-Cisneros et al., 2021).

Su finalidad es controlar y comunicarse con otros dispositivos como sensores y motores, utilizando diversos protocolos de comunicación que permiten la transmisión de datos entre dispositivos de manera eficiente y confiable. Algunos de los más comunes en el ámbito de los microcontroladores incluyen:

**UART** (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter): permite la transmisión sincrónica de datos entre dispositivos a través de solo dos cables (RX y TX) sin la necesidad de un reloj externo.

**SPI** (Serial Peripheral Interface): permite la transmisión sincrónica de datos empleando cuatro cables (MOSI, MISO, SCK y SS) y es utilizado para la comunicación a alta velocidad entre dispositivos cercanos con el uso de un reloj externo.

**I2C** (Inter-Integrated Circuit): utiliza solo dos cables (SDA y SCL) para conectar múltiples dispositivos en un mismo canal, con cada dispositivo asignado a una dirección única y los dispositivos pueden actuar tanto como transmisores o receptores de datos.

## **2.4. Diseño experimental factorial**

El diseño experimental factorial es una técnica estadística utilizada para estudiar cómo múltiples factores influyen en una variable de respuesta. Estos diseños permiten analizar la relación entre los factores y la respuesta de manera eficiente, al mismo tiempo que proporcionan información sobre las interacciones entre los factores. Un diseño factorial completo considera todas las posibles combinaciones de niveles de los factores en el experimento. Se puede comparar los efectos principales de cada factor, así como las interacciones entre ellos y brindar información valiosa del objeto de estudio.

Un diseño experimental factorial  $2^2$  permite evaluar la robustez de las interacciones frente a cambios en los niveles de los factores, lo que es útil para comprender cómo el sistema se comportará en diferentes condiciones y para identificar oportunidades de mejora. El diseño permite generar cuatro tratamientos experimentales que combinan los niveles de ambos factores y permiten estudiar el efecto individual de cada uno, así como las interacciones entre ellos. En el contexto del compostaje doméstico, un diseño experimental factorial puede ser útil para analizar cómo diferentes variables como pretratamientos y materiales secantes afectan el proceso de compostaje y la calidad del producto final.

# MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1. Zona de estudio

El estudio fue realizado en el lote familiar del estudiante, localizado en San Antonio de Escazú, San José, a una altitud de 1321 m.s.n.m. Se adaptó un área abierta y techada para la incorporación de un espacio para almacenar el material secante y para las composteras giratorias (Figura 5a). Se estableció una extensión eléctrica para alimentar con electricidad el espacio y respaldado por un sistema de energía ininterrumpible (UPS) para protección contra picos de voltaje y caídas de corriente. A su vez, se colocó una doble cortina de sarán para limitar el ingreso de agua y partículas al interior (Figura 5b).



(a)



(b)

**Figura 5.** Zona de estudio con las composteras evaluadas, los sistemas de monitoreo y el material secante; (a) Vista externa, (b) Vista interna.

El periodo de evaluación de los ciclos de compostaje fue desde octubre 2022 a Febrero 2023. Durante el estudio, el registro de las condiciones atmosféricas externas fue realizado mediante el SM-Amb.ext, como se detalla en 3.2.2. Se registró una temperatura ambiental externa media de  $19.75 \pm 0.87$  °C, un mínimo de  $13.71 \pm 0.87$  °C y un máximo de  $27.43 \pm 0.87$  °C. La humedad relativa externa media registrada fue de  $79.42 \pm 5.17$  %, con un mínimo de  $30.43 \pm 5.17$  %, y un máximo de 99 %.

## 3.2. Equipos y suministros

### 3.2.1. Descripción de los componentes del sistema de compostaje

Con el propósito principal de recibir, homogeneizar y efectuar el pretratamiento apropiado de los residuos, se conformó un sistema de compostaje utilizado durante los ciclos de compostaje (Figura 6). Para ello, se estableció un flujo de trabajo visualizado en el Apéndice (A).



*Figura 6. Componentes del sistema de compostaje utilizado para recibir y procesar los RSB, previo a la adición a las composteras.*

1. **Tómbola:** Se adaptó un recipiente de 60 L de capacidad que permitió recibir, contener y homogeneizar mediante el volteo manual, varios baldes de RSB frescos de ambas fuentes.
2. **Cama africana:** Se construyó una estructura elevada del suelo de 1.1 x 1.1 m, la cual permitió drenar el material fresco de líquidos en exceso, dividir los RSB para muestreo y pretratamiento y la remoción de objetos no deseados.
3. **Baldes con doble fondo:** Se utilizan baldes plásticos de polietileno de 5 gal con doble fondo para recolectar y contener los RSB desde la la homogeneización hasta la adición a las composteras. Se hacen agujeros de hasta 2 cm de diámetro para permitir un drenado del lixiviado.

4. **Trituradora:** Para realizar el pretratamiento picado fino de los residuos orgánicos, se utiliza la trituradora (Trapp TR-200) de motor eléctrico y con una potencia de 1.25 CV a 50 Hz.
5. **Compostera doméstica giratoria:** Se utilizó la compostera (360 Soluciones Verdes KS-100) comercializada en el país, de plástico reciclado y doble cámara. Cuenta con una capacidad de 10 a 11 kg por semana, un volumen de 160 L y se destina a hogares de 2 a 6 personas (Figura 7).

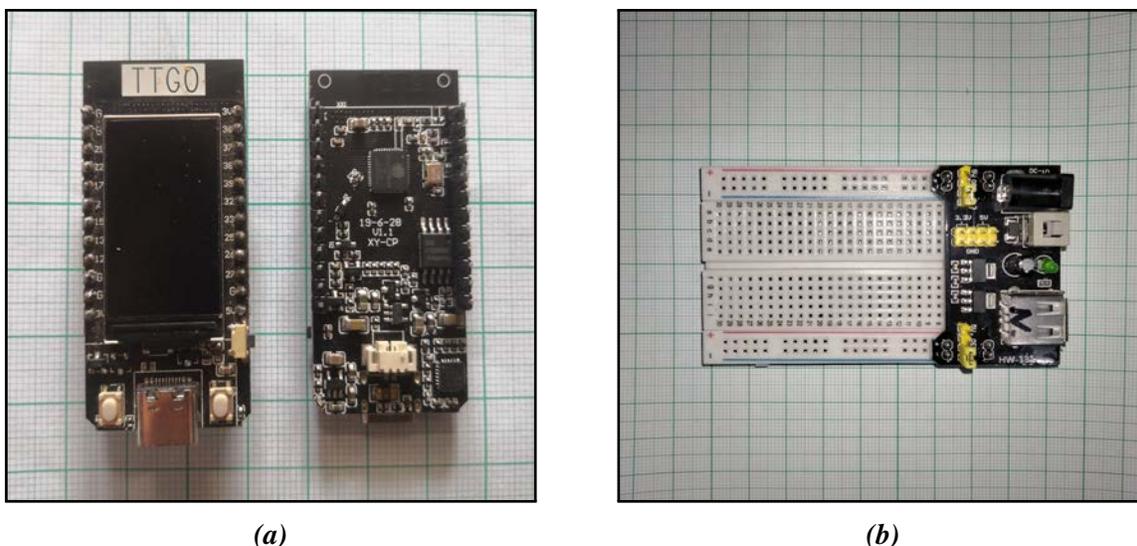


*Figura 7. Compostera giratoria de doble cámara comercializada por 360 Soluciones Verdes.*

### **3.2.2. Descripción de los componentes del sistema de monitoreo**

Para la evaluación de las condiciones externas e internas en las composteras, se crearon dos sistemas de monitoreo continuo utilizando la placa de desarrollador basado en el microcontrolador ESP32 (LilyGo™ TTGO T-Display v1.1) como mando principal para recibir y enviar los valores obtenidos de los diferentes sensores. Este dispositivo cuenta con un procesador de doble núcleo (Xtensa LX6) con una frecuencia de hasta (240 MHz), una memoria SRAM interna (520 kb) usada para almacenar datos temporales y variables utilizadas por el programa y una memoria flash (4MB) para almacenar el firmware (Figura 8a).

Este dispositivo ofrece soporte para Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth (4.2 BLE) integrado y 21 pines para propósitos generales. Incluye una pantalla (IPS ST7789V) a color de 1.14" con una resolución de 135 x 240 píxeles; y dos botones individuales, simplificando así la visualización e integración de funciones. El ESP32 se adiciona a una protoboard junto con el adaptador de energía, el cual permite llevar 3.3 V al circuito desde la instalación eléctrica establecida en el lugar



**Figura 8.** Componentes utilizados en ambos sistemas de monitoreo diseñados (a) Microcontrolador ESP32 (TTGO T-Display v1.1), (b) Protoboard y adaptador de corriente.

y conectar los demás componentes del SM (Figura 8b).

El microcontrolador es programado utilizando el lenguaje de programación Arduino, basado en C++ en el entorno de desarrollo Arduino IDE 1.8.13. Los datos recolectados de los sensores son registrados directamente en una hoja de cálculo de Google independiente para cada SM con una frecuencia de 10 minutos. Esto se lleva a cabo mediante una plataforma de automatización IFTTT (If This Then That) que permite a los usuarios crear cadenas de declaraciones condicionales, llamadas «applets», que se utilizan para automatizar tareas entre diferentes aplicaciones y dispositivos conectados a Internet. De forma que permite, crear un flujo de trabajo para conectar el ESP32 con una cuenta de Google y la herramienta de Google Sheets. Ambos sistemas fueron resguardados de las condiciones externas mediante una carcasa adquirida en el mercado local y adaptada para tal fin (Figura 9 y 11).

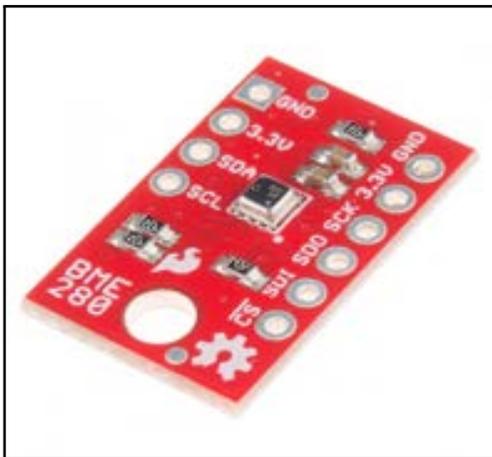
### 3.2.2.1. Sistema de monitoreo del Ambiente externo (SM-A)

Para el monitoreo de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa (%) de la atmósfera externa, se escogió el sensor (Sparkfun BME280), el cual utiliza un sensor de humedad capacitivo de un polímero higroscópico y un sensor de presión piezorresistivo de silicio, y deriva la temperatura de estas mediciones. Se utiliza el protocolo de comunicación I2C, las librerías y conexiones asociadas para la comunicación con este sensor dada la disminución de cables y no es necesario una alta

frecuencia de medición. El rango de voltaje de alimentación del sensor es de 1.71 V a 3.6 V. El consumo de energía del sensor varía en función del modo de operación y las tasas de muestreo seleccionadas para la medición de temperatura, humedad y presión (Figura 9a).

Para la configuración del sensor, se utilizó el modo «Weather Monitoring», en el cual se varían los parámetros: tasa de muestreo, tiempo de espera y los ciclos de filtrado para aumentar la precisión, resolución y disminuir el consumo de energía del sensor. Se utilizó el modo forzado en el cual, el sensor realizará una medición cada vez que se le solicite y luego volverá al modo de reposo para reducir el consumo de energía. La tasa de muestreo se aumentó x4 y se remueve el tiempo de espera, dado que se define el modo forzado. El registro de datos se realizó cada 5 minutos (Apéndice H).

El sensor (Sparkfun BME280) tiene una precisión de  $\pm 1.0$  °C en el rango de -40 a 85 °C y para la humedad relativa una precisión de  $\pm 3$  % en el rango de 20 a 80 %. En promedio, el consumo de corriente es de aproximadamente 12  $\mu$ A en modo normal, 5  $\mu$ A en modo de espera y 0.1  $\mu$ A en modo de reposo.



(a)



(b)

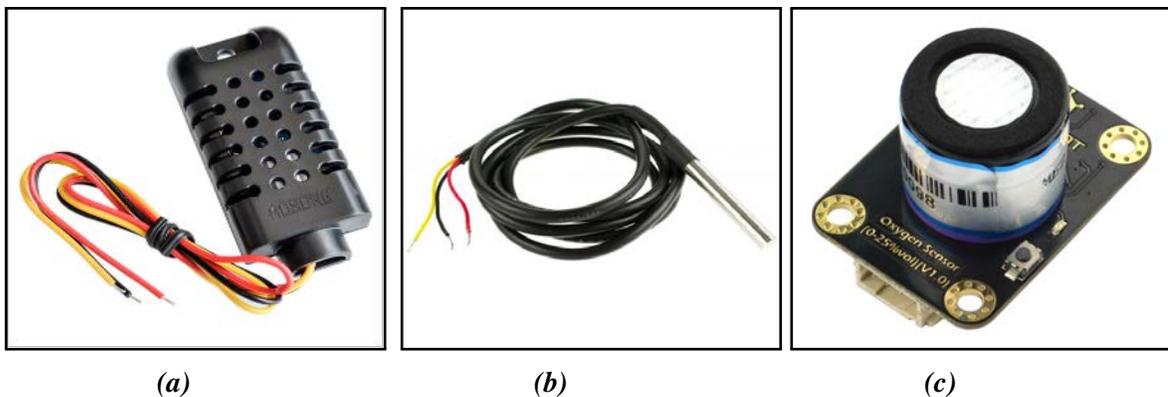
**Figura 9.** Imágenes ilustrativas del sistema de monitoreo de ambiente externo (a) Sensor (Sparkfun BME280), (b) Vista superior del sistema de monitoreo

### 3.2.2.2. Sistema de monitoreo de las composteras giratorias (SM-C)

Para la evaluación de la temperatura y humedad relativa de la atmósfera interna, se escogió el sensor DHT21. Este sensor, utiliza una sonda capacitiva de polímero higroscópico para medir la humedad y un termistor NTC de cerámica para medir la temperatura, los cuales están contenidos

en una carcasa incluida para su protección. Presenta un rango de medición de  $-40$  a  $80$  °C y  $0$  -  $100$  % de humedad relativa y es utilizado en aplicaciones de monitoreo ambiental y control de climatización. Este sensor cuenta con una precisión y exactitud de:  $\pm 0.5$  °C en temperatura y  $\pm 2$  % en humedad relativa;  $\pm 0.2$  °C en temperatura y  $\pm 2$  % en humedad relativa., respectivamente. Opera con un rango de voltaje de alimentación de  $3.3$  a  $5.5$  V. Su consumo de corriente en reposo es de aproximadamente  $0.5$  mA y durante la medición, puede aumentar hasta  $2.5$  mA (Figura 10).

Para la concentración de oxígeno en la atmósfera interna, se escogió el sensor (DFRobot Oxygen I2C). Los cuales son instrumentos de precisión enfocados para mediciones de gases, ph, entre otros. Este es un sensor de oxígeno de alta sensibilidad diseñado para detectar la concentración de oxígeno en el aire. Su interfaz de comunicación I2C permite un fácil traspaso de información con microcontroladores como el ESP32 y se emplea en aplicaciones de calidad del aire y monitoreo ambiental. Funciona con un voltaje de alimentación de  $3.3$  a  $5.5$  V y su consumo de corriente es de aproximadamente  $20$  mA en reposo y alrededor de  $25$  mA durante la medición. El fabricante detalla una precisión de  $\pm 0.2$  % y una exactitud igual. Su rango de medición se establece en  $0$  -  $25$  % de concentración de oxígeno en volumen (vol %) (Figura 10).



**Figura 10.** Sensores utilizados en el sistema de monitoreo para las composteras: **a:** Sensor DHT 21; **b:** Sensor DS18B20; **c:** Sensor DFRobot I2C Oxygen.

Para la evaluación de la matriz de compostaje, se seleccionó el sensor (Dallas Semiconductor, DS18B20). Este sensor de temperatura digital, utiliza el protocolo «One Wire» para proporcionar lecturas en un rango de  $-55$  a  $125$  °C. Se caracteriza por utilizar un solo cable para la transmisión de datos y la alimentación del dispositivo y se utiliza en aplicaciones donde el espacio y la cantidad de cables son limitados. Aunque la velocidad de transmisión de datos es relativamente baja en comparación con otros protocolos, como I2C. Este sensor puede funcionar

con un rango de voltaje de alimentación de 3.0 a 5.5 V y su consumo de corriente en reposo es de aproximadamente 1  $\mu$ A, mientras que durante la conversión de temperatura, puede aumentar hasta 1.5 mA. La precisión y exactitud brindada por el fabricante se establece en  $\pm 0.5$  °C en el rango de -10 a 85 °C (Figura 10).

El sistema de monitoreo construido, reemplaza las tapas que cierran las cámaras con un set de sensores para cada cámara. El microcontrolador permanece afuera de la compostera durante todo el tiempo, y el adaptador de la sonda de temperatura de matriz está adherido en el exterior de la compostera. Se implementa la funcionalidad «OTA» (Over-The-Air) para facilitar la actualización del código sin la utilización de cables (Figura 11; Apéndice G).



**Figura 11.** Imagen ilustrativa del sistema de monitoreo de las composteras: (a) Vista superior, (b) Vista lateral.

### 3.3. Caracterización de los materiales

Para representar la composición de los RSB producidos a nivel doméstico y mantener un suministro constante, se recolectaron en baldes suministrados los residuos de la cocina de dos fuentes: el restaurante vegano Huacamole en Barrio Escalante y Soda Pollos Susy en Zetillal. El material inicial es homogeneizado mediante el uso del sistema de compostaje y caracterizado con análisis Químico completo al inicio de cada ciclo en el CIA.

Estos residuos consisten de tubérculos como papas, camote y yuca (43 %), frutas como piña, plátanos, cítricos (36 %), vegetales como restos de repollo y lechuga (14 %) y otros como granos y

cáscaras de huevo (6 %) en base húmeda. No se incluyeron líquidos, carnes, huesos, quesos, masa y material descompuesto al momento de la recolección (Figura 12a).



**Figura 12.** Imagen de la diversidad y dimensiones de los materiales utilizados en el estudio, a) Residuos sólidos biodegradables de ambas fuentes, b) materiales secantes.

Los pellets de madera comprimida son manufacturados por la compañía Pelletics, y provienen de residuos maderables. Se comercializan en presentaciones de 17 kg y 35 kg; con un precio de €9900 y €18000 por la empresa 360 Soluciones Verdes. Las dimensiones del pellet no sobrepasan los 30 mm de largo y 6 mm de diámetro, con un contenido de humedad menor al 10 %. Este material está listo para usar desde la venta. Dado el origen diverso de los residuos sus parámetros químicos pueden variar, de acuerdo con Epstein, 2011 se documenta que el papel y el aserrín presentan relaciones altas de carbono, al orden de 173 y 511 respectivamente. Este producto presenta una alta densidad, ya que se expande al absorber el agua, permite reutilizar un residuo de la industria maderera y se promueve como material secante para composteras giratorias, cajas para necesidades de animales y combustible, sin contener aditivos (Figura 12b).

El cartón para huevos es un material fibroso a base de biopolímeros como celulosa, lignina y hemicelulosa que provienen de la pared celular de las plantas. Este material se obtiene mediante la recolección por parte de participantes en el estudio y del centro de reciclaje de San Antonio Escazú. Se fabrica con el fin de ser utilizado para el transporte de huevos para consumo humano y se encuentra comúnmente en presentaciones de 12 hasta 30 huevos y dimensiones de alrededor de 30 cm de largo, 11 cm de ancho y 7 cm de alto dependiendo del tamaño de la bandeja. Se

puede utilizar como complemento al proceso de compostaje, al cortarse en pequeños tamaños de aproximadamente 5 cm de largo y 4 cm de ancho, de forma que favorezca el balance en el contenido de humedad y la descomposición del material (Figura 12).

### **3.4. Diseño experimental**

#### **3.4.1. Primera Etapa: Variables de estudio**

Para el análisis del proceso y producto del compostaje doméstico en composteras giratorias, se realizó en el LAIMEC la evaluación del contenido de humedad y capacidad de absorción del agua de los MS, y de forma complementaria, se obtuvo la composición inicial de los RSB mediante un análisis químico completo en el CIA al inicio de cada ciclo. Al final de cada ciclo, se evaluó el pH y el contenido de humedad para los RSB en el LAIMEC y la evaluación de la relación C/N es brindada mediante análisis de abonos sólidos en el CIA. Para las condiciones internas en las composteras, se evaluó de forma continua las variables: temperatura de matriz de compostaje, temperatura ambiente interna, humedad relativa interna y concentración de oxígeno del ambiente interno.

##### **3.4.1.1. Capacidad de absorción de agua de los MS**

La capacidad de absorción del agua se estimó mediante el procedimiento elaborado por los autores Matkowski et al., 2020; con el fin de determinar el potencial absorbente del material bajo condiciones similares a la matriz de compostaje y aportar información a su posible comportamiento.

Primero, se recolecta una porción del material secante, se corta en pequeñas secciones y se etiqueta en un recipiente aparte, para obtener el C.H. inicial del MS mediante el uso de la balanza para humedad (Radwaq PMR50). Una vez obtenido el C.H, se procede a realizar la prueba de inmersión donde se colocan las muestras en un papel filtro de peso conocido y se introducen las muestras en contenedores dentro de un beaker de 250 mL. Luego, se procede a verter agua destilada hasta cubrir totalmente la muestra y se inicia un temporizador de 30 minutos. Una vez concluido el tiempo, se retiran de los beakers y se colocan en un sostenedor con huecos para que drenen por 5 minutos, y posteriormente se pesan de nuevo las muestras (Figura 13).

Una vez obtenido el contenido de humedad inicial de las muestras y la variación de la masa



(a)



(b)

**Figura 13.** Caracterización fisicoquímica del material secante (a) Contenido de humedad, (b) Capacidad de absorción del agua, ( $\kappa$ ).

durante la prueba de inmersión, se utiliza la ecuación derivada del trabajo de Matkowski et al., 2020 para generar el coeficiente  $\kappa$  que describe la capacidad del MS para absorber el agua.

$$\mathbf{k} = \frac{m_{s1} - m_{s0}}{m_{s0} \left(1 - \frac{MC}{100}\right)} \quad (1)$$

Donde:

$k$  = Coeficiente de absorción del agua [ $\frac{gH_2O}{gms}$ ]       $MC$  = C.H. previo a la inmersión en agua [%]

$m_{s0}$  = Masa de la muestra antes de la inmersión [g]

$m_{s1}$  = Masa de la muestra luego de la inmersión [g]

**3.4.1.2. pH** Para el análisis del pH, se utilizó un medidor portátil (Hanna HI99121) para muestras sólidas y la técnica de triplicado, para obtener los valores del compost producido al final de cada ciclo. Para ello, se calibra el equipo a temperatura ambiente con las soluciones buffer a 4.00 y 7.00. Posterior, se procede a rotular los tubos falcon, se toman muestras de 4g de compost y se colocan en los tubos falcon etiquetados, de acuerdo con el tratamiento. Se añade 40 mL de agua ultrapura de tipo I (Milli-Q) a cada tubo y se homogeneiza la muestra a 88 R.P.M., mediante el uso del tambor rotador 360 durante 1 hora. Luego, se deja reposar por 20 minutos. Una vez finalizado el tiempo, se inserta la sonda del equipo en la fase líquida y se registra el valor en cada repetición. Previo y posterior a cada medición, se limpia la sonda con agua milli-Q y se seca con una toalla de papel (Figura 14a).



(a)



(b)

**Figura 14.** Evaluación del pH en el compost producido al finalizar cada ciclo de compostaje: (a) Medidor portátil de pH marca Hanna (Modelo HI99121), (b) tubos falcon utilizados para la disolución.

**3.4.1.3. Contenido humedad** Primero, se rotula y se pesan los recipientes vacíos que contendrán las muestras de compost. Seguidamente, se preparan 4 muestras por tratamiento, dos de 25 g y dos de 50 g y se introducen en los recipientes rotulados a la estufa del laboratorio. Posterior, se configura la temperatura y periodo de la estufa, por 24 horas a 105 °C y se cierra el compartimento. Una vez finalizado el periodo, se retiran, se espera 15 minutos para que descienda la temperatura y se pesan de nuevo las muestras.

**3.4.1.4. Relación C/N** Para la obtención de las muestras del compost producido, se vertió el contenido de la compostera en una superficie extensa y se procedió a dividir en 4 secciones y tomar de diferentes puntos muestras representativas para obtener una muestra de 600 g.

**3.4.1.5. Variables evaluadas por los sistemas de monitoreo** Para evaluar el proceso de compostaje domestico en las composteras giratorias de doble cámara, se establecieron las variables de monitoreo continuo: temperatura de la matriz y para la atmósfera interna: temperatura, humedad relativa y concentración de oxígeno. De forma complementaria, se registra la temperatura ambiental y la humedad relativa externa en la zona de estudio, junto con observaciones del olor, la presencia de insectos y lixiviados durante los ciclos de compostaje.

### **3.4.2. Segunda Etapa: Logística de recolección y pretratamiento**

Se estableció un diseño experimental factorial de tipo  $2^2$  para la comparación de los factores, pretratamientos y MS, como variables independientes, evaluados en dos niveles (pellets de madera

y cartón para huevos como materiales secantes; picado fino y picado grueso como pretratamientos) con el fin de evaluar el proceso y producto del compostaje doméstico en composteras giratorias de doble cámara (Tabla 1).

**Tabla 1.** *Diseño experimental factorial 2<sup>2</sup>*

Tratamiento	Pretratamiento	Material Secante
Compostera 1	Fino	Pellet
Compostera 2	Fino	Cartón
Compostera 3	Grueso	Cartón
Compostera 4	Grueso	Pellet

Con base en una evaluación cuantitativa de los residuos previo a los ciclos de compostaje, se observó que el picado fino genera en promedio diámetros de partícula menores a cinco cm, con materiales como semillas y algunos tubérculos manteniendo en parte el diámetro posterior al procesado. En cuanto, al picado grueso, mantiene en promedio los diámetros originales de los residuos. Los pellets de madera se encuentran listos para usar y en cuanto el cartón para huevos, se corta en pequeños pedazos de aproximadamente 5 cm de largo para su incorporación a la mezcla de compostaje (Figura 12b).

Se generó una logística para la recolección semanal de los RSB y el pretratamiento de los residuos en la cual se homogenizan mediante el uso de la tómbola y posterior se colocaron en baldes con agujeros para el drenado del material. Seguidamente, se extiende en una cama africana para la remoción de materiales no deseados, toma de muestras, picado grueso y división del material hacia los baldes con agujeros para almacenar y procesar en el caso del picado fino, los RSB frescos (Apéndice: A1). El ciclo de compostaje se conforma de dos fases, utilizando la doble cámara de manera simultánea en cada compostera. El estudio abarcó tres ciclos completos, dividido en dos fases de 27 días cada una definidas por la capacidad total de las composteras y el volumen que ocupa la mezcla de RSB y MS. La fase activa, se caracteriza por la adición de material y en la fase pasiva, se eliminan las adiciones de material nuevo y comienza la maduración de la matriz de compostaje (Tabla 2).

Se generó un inóculo previo al estudio, y se agregó 1kg a cada compostera al inicio del primer ciclo. La adición del material nuevo (RSB+MS), se realizó cada dos días mediante la incorporación de 2.8 kg de RSB y 0.280 kg de MS, con base en el volumen de la compostera, del

**Tabla 2.** Distribución temporal de los ciclos y fases del estudio.

Ciclo	Fase Activa	Fase Pasiva
I-ciclo	22 Oct - 17 Nov	18 Nov - 14 Dic
II-ciclo	18 Nov - 14 Dic	14 Dic - 09 Ene
III-ciclo	14 Dic - 09 Ene	10 Ene - 06 Feb

material secante y la proporción 1:10; para un total de 3.08 kg por adición. Para ello, se pausan las mediciones del SM-C, se retira la sonda de temperatura de la matriz de compostaje y se añade el material nuevo. Posterior, se colocan las tapas originales de plástico y se realiza el volteo. Una vez terminado, se coloca nuevamente la sonda del sensor DS18B20 en el centro de la pila generada en el interior, y el SM-C en vez de las tapas. Las mediciones son pausadas por 5 minutos mediante una función incorporada en el código (Figura 11, Apéndice G). La aireación se brindó mediante el volteo de las composteras dos veces al día con tres giros por evento. Se evaluaron las condiciones internas de la matriz y del ambiente en las composteras mediante los sistemas de monitoreo creados para tal fin.

### 3.4.2.1. Valoración ambiental del estudio

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción potencial generadas por el tratamiento de los residuos sólidos mediante el compostaje en lugar de la disposición en relleno sanitario; se tomó como referencia el criterio de emisión de gases invernadero propuesto por el Instituto Meteorológico Nacional Instituto Meteorológico Nacional et al., 2022. Se extrajeron los factores de emisión para el metano (CH<sub>4</sub>) y para el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) derivados del tratamiento por compostaje o la disposición en relleno sanitario y se multiplicó por la cantidad de residuos procesados para determinar la cantidad de gas invernadero generado. Seguidamente, se utiliza el potencial de calentamiento global de cada gas en un horizonte de 100 años, respecto al CO<sub>2</sub> para cuantificar las emisiones en una medida en común y generar una comparación. En cuanto a la masa de RSB, se utiliza el valor resultante de la cantidad de material procesado por las 4 composteras en un ciclo de compostaje.

### 3.5. Manejo de datos

#### 3.5.1. Calibración de los sensores

El experimento se realizó en el LAIMEC, con el fin de obtener la incertidumbre estándar asociada a las mediciones de temperatura y humedad relativa de los sensores BME280, DHT21 y DS18B20, con el equipo (HOBO MX230A) de la EIB, como referencia. Este dispositivo cuenta con un rango de operación: 0 a 100 % y -40 a 70 °C, con precisión de  $\pm 2,5$  % del 10 % al 90 % y  $\pm 0,2$  °C de 0 a 70 °C. Se utilizó la incubadora (JeioTech IL-11A), para registrar las mediciones de los sensores de forma simultánea desde 20 a 45 °C, con una frecuencia de 5 minutos, en el cual las temperaturas se estabilizaron a la temperatura inicial con 5 mediciones similares y posterior, en la temperatura final. Se utilizó un grado de confianza de 95 %, para la aplicación de las expresiones 2 y 3 utilizadas para obtener la incertidumbre estándar y la curva de calibración basada en un modelo de regresión lineal con los coeficientes ajustados mediante el método de mínimos cuadrados, (Jordão et al., 2017):

$$\sigma_{xi} = \pm t_{95, n-1} \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Donde:  $\sigma_x$ , desviación estándar de las mediciones.  
 $\sigma_{xi}$ , incertidumbre estándar de la media.  $n$ , número de mediciones.  
 $t_{95, n-1}$ , valor crítico t para un nivel de confianza del 95 % y n-1 grados de libertad.

$$\epsilon_y = \pm t_{95, N-2} \sqrt{\frac{\sum (y_t - ax_{si} - b)^2}{N - 2}} \quad (3)$$

Donde:  $x_{si}$ , temperatura del sensor,  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).  
 $\epsilon_y$ , incertidumbre expandida de la variable dependiente.  $N$ , número de mediciones.  
 $a, b$ , coeficientes del modelo de regresión lineal.  
 $y_t$ , temperatura de referencia.

### 3.5.2. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos a partir de los valores obtenidos de los sistemas de monitoreo, se utilizó la plataforma de Google Drive para el almacenamiento de los datos y su posterior descarga al computador. Se utilizó los software Excel para el ordenamiento y registro de resultados y Tableau Public para la previsualización y evaluación de los tratamientos. Posterior, se utiliza el editor de código fuente Visual Studio Code para implementar una depuración y seccionamiento de las hojas de cálculo de datos basado en el lenguaje de programación Python. En el cual, se realiza una extracción del día y hora, remoción de datos erróneos de cada sensor, segregación entre las variables de temperatura de matriz y las variables relacionadas con el ambiente interno. Finalmente, se producen tres archivos en formato .csv con los valores depurados, excluidos y el promedio por hora por día (Apéndice B1).

### 3.5.3. Análisis de estadística

Los análisis estadísticos, se realizaron con el software <sup>TM</sup>MiniTab, de acuerdo con el diseño experimental y tomando en cuenta un nivel de significancia de ( $\alpha = 0,05$ ). Para la evaluación de la normalidad de los datos, se empleó estadística descriptiva y las pruebas de Ryan-Joyner para grupos de datos menores a 50, y la prueba de Kolmogorov-Smirnov para datos superiores.

A su vez, se considera mediante el Teorema del Límite Central (TLC) que la suma o el promedio de un número suficientemente grande de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas (iid) se aproxima a una distribución normal, independientemente de la forma de la distribución original de las variables aleatorias individuales. La velocidad a la que la distribución de la suma o el promedio de las variables aleatorias (iid) se aproxima a una distribución normal depende del tamaño de la muestra ( $n$ ) y de la distribución original de las variables aleatorias individuales; a medida que el tamaño de la muestra aumenta, la aproximación a la normalidad mejora. Por lo que, de cumplirse que no existe una violación extrema de la normalidad en los datos, es posible considerar pruebas paramétricas para la evaluación de los datos del SM (Sheldon Ross, 2013).

Para verificar la la homogeneidad de las varianzas se utilizó la prueba de Levene. La evaluación de la varianza de las medias en los tratamientos, se realiza mediante un análisis paramétrico

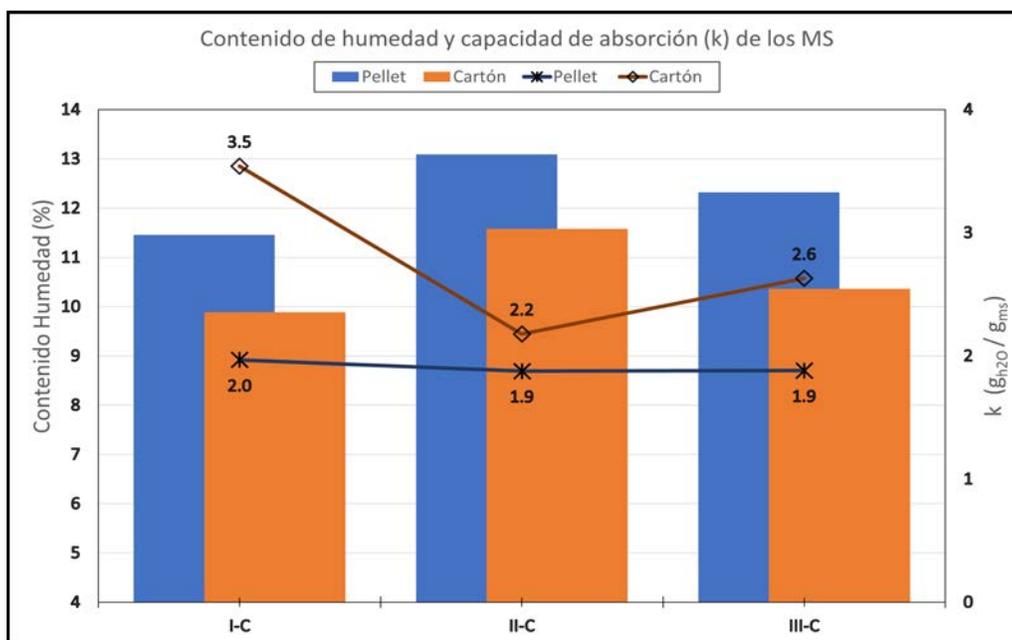
ANOVA de dos vías con medidas repetidas para determinar si existen diferencias significativas. Posterior, se realiza una prueba de Tukey para realizar comparaciones múltiples entre las medias de diferentes grupos. Caso no cumpla con los supuestos de normalidad, se procede a realizar un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis. Se realiza una evaluación de las diferencias entre inicio y final de cada tratamiento al analizar las diferencias generadas por el proceso de compostaje. Para evaluar la correlación y determinar la relación estadística entre los datos obtenidos de los SM interno y externo, se utilizó el coeficiente de Pearson.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1. Caracterización del Material Secante

Los pellets de madera mostraron un contenido de humedad promedio del  $12.3 \pm 0.8 \%$ , y un coeficiente de variación del  $6.6 \%$ . Esto indica un comportamiento consistente a lo largo de los tres ciclos de compostaje, aunque es un valor ligeramente superior al  $10 \%$  estimado por el fabricante. En contraste, el cartón para huevos obtuvo un contenido de humedad promedio menor de  $10.6 \pm 0.9 \%$ , y un coeficiente de variación del  $8.2 \%$ .

En cuanto a la capacidad de absorción, los pellets de madera promediaron  $(1.9 \pm 0.1 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}})$  y un coeficiente de variación del  $2.6 \%$ , lo que evidencia una capacidad de absorción constante. Por otro lado, el cartón para huevos mostró un valor superior de  $\kappa$  promedio de  $(2.8 \pm 0.7 \frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{ms}}})$  y un coeficiente mayor de variación del  $24.9 \%$ . Es decir, este material es capaz de absorber aproximadamente 2.8 veces su peso en agua cuando está seco, promoviendo un equilibrio de la humedad y de las condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos durante el proceso de compostaje (Figura 15),(Richard, 1992).



**Figura 15.** Resultados obtenidos para el contenido de humedad y la capacidad de absorción de los MS al inicio de cada ciclo.

Se encontró una mayor variabilidad en la capacidad de absorción del cartón de huevos en

comparación con los pellets de madera, con un coeficiente de absorción promedio mayor. Lo que refleja la influencia de factores que pertenecen a la composición del cartón como la procedencia del papel utilizado para producirlo, las capas de papel corrugado de las que se conforma y el área superficial a la cual se expone al agua, respecto al ensayo de capacidad de absorción realizado (Ozola et al., 2019), (Matkowski et al., 2020).

Dada la composición diferente de los MS, su aporte a la mezcla de compostaje puede alterar no solo la estructura, el volumen y el contenido de humedad, pero también los parámetros relación C/N y pH. Ambos materiales secantes tienen un contenido de carbono relativamente alto respecto al nitrógeno, dada su composición principalmente de celulosa y lignina (Ozola et al., 2019), (Epstein, 2011). Lo anterior, relacionado con su capacidad de absorción, puede indicar una retención mayor del agua y una degradación más lenta por parte del cartón para huevos. En el caso de los pellets de madera, dado que se manufacturan con residuos de maderas, su acidez puede variar en mayor cantidad respecto al cartón para huevos, influyendo el proceso y producto del compostaje.

Una aproximación a la cantidad adecuada de material secante a utilizar durante un proceso de compostaje doméstico, se basa en la masa de agua que es necesaria remover de los residuos, la capacidad de absorción de cada material secante y el contenido de humedad deseado. Al estimar un contenido de humedad inicial promedio de los RSB del 79 % basado en los análisis de químico completo realizados, y una humedad óptima del 60 % durante el proceso de compostaje, se determinó la cantidad en kg de material seco necesario que se puede añadir, con base en 1 kg de RSB (Cuadro 3). El desglose de las relaciones para los cálculos se presenta en el apéndice C.

**Tabla 3.** Cuadro resumen de la cantidad de material secante ideal para un proceso de compostaje doméstico al 60 % de humedad con base en 1 kg de residuos sólidos.

Masas de ingredientes (kg)	Escenarios		
	RSB + MS: Pe- llet de madera (kg)	RSB + MS: Car- tón para huevos (kg)	RSB + MS: 50/50 (kg)
$M_{\text{inicial de RSB}}$	1	1	1
$M_{\text{inicial de agua en los RSB}}$	0.79	0.79	0.79
$M_{\text{agua deseada en el proceso}}$	0.49	0.46	0.47
$M_{\text{agua por absorber}}$	0.30	0.33	0.32
$M_{\text{MS necesaria}}$	0.16	0.12	0.14

En el caso del cartón de huevos, se puede asociar visualmente la masa necesaria con una bandeja de cartón para huevos de 30 unidades y en el caso de los pellets, equivale a una cantidad de pellets que se ajusten cómodamente en la palma de la mano sin rebasarla. Se destaca que las dimensiones del cartón de huevos deben ser reducidas considerablemente para poder ser introducidas a la compostera, dado su alto volumen y baja densidad. Aunque, mantener el balance óptimo de la humedad durante este proceso puede ser retador y requiere del monitoreo de diversos parámetros como la aireación y la temperatura de matriz para alcanzarse (Azim et al., 2018). La reducción del tamaño de partícula afecta la degradabilidad del sustrato y la cinética de compostaje mediante la disminución de los espacios porosos y la movilización de líquidos y gases a través de los residuos, inhibiendo así la actividad microbiana (Ajmal et al., 2020).

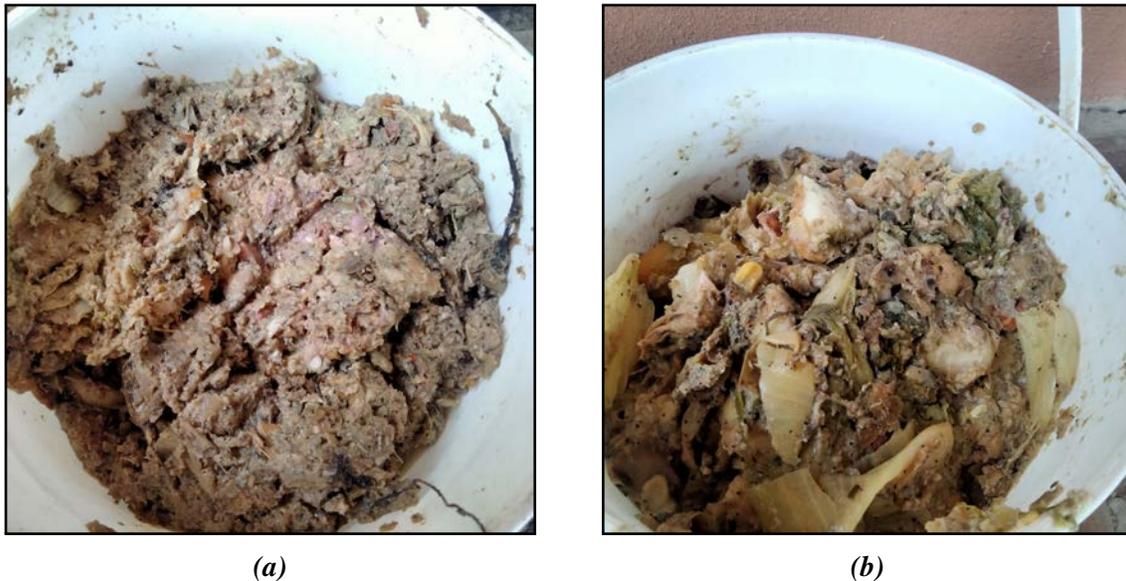
Al comparar ambos resultados, se puede considerar que el cartón para huevos tenderá a acumular una mayor cantidad de agua basado en su contenido de humedad pero también en su capacidad de absorción. Además, dada la estructura de ambos materiales, el pellet de madera pierde su forma original fácilmente, en cuanto el cartón para huevos mantiene su forma una vez saturada la capacidad de absorción del MS. Este comportamiento puede ser de relevancia, al mantener una estructura porosa a los RSB, lo que favorece la aireación y ayuda a prevenir la compactación del compost.

## **4.2. Caracterización del pretratamiento**

El tamaño de las partículas es un factor importante que afecta el proceso de compostaje mediante el aumento o disminución de la aireación, la retención de humedad, la velocidad de compostaje, parámetros como la relación C/N y el control de insectos y olores (Azim et al., 2018). Generalmente, los usuarios domésticos no realizan un pretratamiento a los residuos previo al compostaje. A la hora de verter los residuos en un recipiente o compostadora, se realiza un picado mínimo o nulo del material, lo que obtiene diámetros por encima de los 5 cm.

El pretratamiento con equipos como machuconas o trituradoras implica un mayor consumo energético, pero reduce el tamaño de partícula por debajo de los 5 cm, facilitando la homogeneización de la mezcla de compostaje y ejerciendo una influencia sobre la producción de metano y disponibilidad de nutrientes (Yang et al., 2013). A su vez, genera una liberación temprana de los

líquidos contenidos en las estructuras de los RSB, reduciendo su volumen y facilitando la degradación. El aumento en el área superficial del RSB permite un mayor contacto para el establecimiento de los microorganismos. Sin embargo, la disminución del tamaño de partícula puede limitar la aireación y aumentar la retención de humedad, a causa de la reducción de los espacios porosos en la matriz de compostaje (Azim et al., 2018) (Figura 16a).



**Figura 16.** Imagen descriptiva del pretratamiento realizado a los RSB previo al ingreso a las composteras: (a) picado fino, (b) picado grueso.

El picado grueso se caracteriza por ser un pretratamiento leve, realizado con las manos o con equipos encontrados en el hogar como cuchillo o pala, donde el usuario reduce el tamaño de algunos materiales de mayor tamaño previo al compostaje, sin comprometer una cantidad de tiempo y energía significativa. Este pretratamiento conlleva un mayor volumen en la compostera, una liberación lenta de los lixiviados y una mezcla más heterogénea (Figura 16b).

### **4.3. Análisis de los materiales secantes en el proceso**

La evaluación del proceso desde los MS, se estableció mediante el análisis de los datos obtenidos de las variables del sistema de monitoreo, en conjunto con las variables pH, C.H. y relación C/N de los RSB, evaluadas al inicio y al final de cada ciclo de compostaje. Así como, se tomaron en consideración aspectos cualitativos como el volumen utilizado en cada compostera y la presencia de insectos.

El análisis químico completo de los RSB previo a los ciclos de compostaje, cuantificó diferentes elementos con base en la concentración inicial en el RSB, con énfasis en las variables de estudio: contenido de humedad, pH y relación C/N (Tabla 4). Se destacó una alta variabilidad en los minerales y se observó que los elementos N, K y Ca tienen los porcentajes más altos en masa. En cuanto a las concentraciones en mg/kg, el Fe es el elemento más abundante, seguido por Zn y Mn. Los elementos Cu y B presentaron las concentraciones más bajas (Apéndice G).

**Tabla 4.** Resumen de los valores obtenidos para los residuos sólidos biodegradables al inicio de cada ciclo de compostaje para las variables de interés: Contenido de humedad, relación Carbono/Nitrógeno y pH.

RSB	C.H. (%)	C/N	pH
I - C	84	24.8	5.4
II - C	77	34.6	4.2
III - C	77	34.7	4.5
Promedio	79.17	31.37	4.70
Desviación	4.10	5.69	0.62
Coef. de Variación (%)	5.2	18.1	13

De acuerdo con los tratamientos evaluados, la evolución de la variable contenido de humedad entre el inicio y el final de cada ciclo de compostaje se mantuvo cerca del valor inicial, con una media de 82.61 % y 82.64 % para los tratamientos con cartón, y 76.5 % y 75.61 % para los tratamientos con pellet. Se destaca el hecho que, los tratamientos con cartón aumentaron su contenido de humedad a valores cercanos al inicial en vez de disminuirse en el tiempo, como se observó con el pellet independiente del pretratamiento. Lo que indica una absorción considerable del agua durante el proceso de compostaje (Tabla 5). Este comportamiento es reflejado en la compostera 4, donde se obtuvo diferencias negativas en todos los ciclos, generando una reducción del contenido de humedad congruente con los resultados observados para un material secante y mitigando el efecto de la acumulación excesiva del agua que puede generar procesos anaeróbicos no deseados durante el proceso de compostaje (Guidoni et al., 2018).

Respecto a la variable **relación C/N**, se encontró que las medias de los tratamientos disminuyeron en todos los tratamientos evaluados con variaciones de hasta -15.6 en los tratamientos con cartón. Una disminución en la relación C/N es típicamente un signo positivo, ya que sugiere que la descomposición de la materia orgánica está ocurriendo de manera efectiva. Lo que sugiere que

**Tabla 5.** Valores registrados del contenido de humedad de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje.

Compostera	Ciclo	Inicio (%)	Final (%)	Diferencia (%)
C1	1	84	76.19	-7.81
	2	77	78.15	1.15
	3	77	75.17	-1.83
C2	1	84	83.03	-0.97
	2	77	84.25	7.25
	3	77	80.56	3.56
C3	1	84	82.87	-1.13
	2	77	82.79	5.79
	3	77	82.27	5.27
C4	1	84	77.35	-6.65
	2	77	73.17	-3.83
	3	77	76.32	-0.68

estos tratamientos pueden ser eficientes para promover la descomposición de los RSB y el crecimiento microbiano. Esto podría implicar un mejor aprovechamiento de los nutrientes disponibles, resultando en un compost de mayor calidad y más eficiente para el uso en el suelo (Azim et al., 2018), (Tabla 6).

**Tabla 6.** Valores registrados de la relación C/N de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje.

Compostera	Ciclo	Inicio	Final	Diferencia
C1	1	24.8	24.1	-0.7
	2	34.6	23.1	-11.5
	3	34.7	20	-14.7
C2	1	24.8	16.6	-8.2
	2	34.6	19	-15.6
	3	34.7	20.8	-13.9
C3	1	24.8	18.1	-6.7
	2	34.6	20.9	-13.7
	3	34.7	19.7	-15
C4	1	24.8	23.7	-1.1
	2	34.6	23.5	-11.1
	3	34.7	22.3	-12.4

Al comparar estos resultados con los tratamientos 1 y 4, es posible inferir que el proceso

de compostaje podría haber sido más efectivo en la compostera 2 y 3 dada la mayor reducción observada. Sin embargo, los tratamientos con pellets generaron una proporción cercana a 25:1 al final de cada ciclo, con una mayor estabilidad en los valores obtenidos para la compostera 4. Aunque los resultados indican que los tratamientos no presentaron condiciones óptimas, generando procesos incompletos de compostaje para el tiempo evaluado (Ismael et al., 2013).

En lo que respecta a la variable **pH**, la tendencia general reveló un incremento durante el ciclo de compostaje entre 1.7 y 3.8 unidades en todos los tratamientos. De acuerdo con las 4 fases de la evolución del pH durante el compostaje, al inicio se espera un descenso del pH producto de la liberación de ácidos orgánicos y una liberación de CO<sub>2</sub>. Posterior, conforme se descomponen y volatilizan los compuestos fácilmente degradables, aumenta el pH y se produce amoníaco (Azim et al., 2018). Esto conduce a valores de pH entre 7 y 8, los cuales fueron observados en los 4 tratamientos (Tabla 7).

**Tabla 7.** Valores registrados del pH de los residuos sólidos biodegradables para cada tratamiento al inicio y al final de cada ciclo de compostaje.

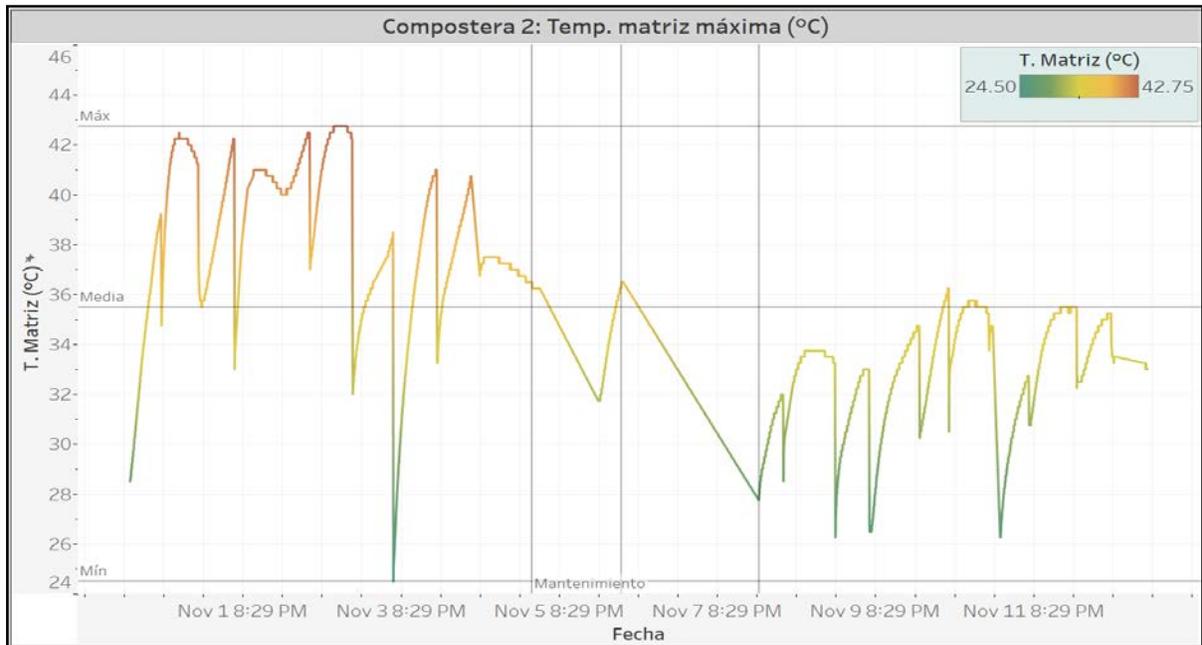
Compostera	Ciclo	Inicio	Final	Diferencia
C1	1	5.4	8.38	2.98
	2	4.2	5.89	1.69
	3	4.5	8.1	3.6
C2	1	5.4	8.11	2.71
	2	4.2	7.84	3.64
	3	4.5	7.74	3.24
C3	1	5.4	8.39	2.99
	2	4.2	7.94	3.74
	3	4.5	7.75	3.25
C4	1	5.4	8.2	2.8
	2	4.2	7.44	3.24
	3	4.5	8.3	3.8

Los tratamientos evaluados ejercieron una influencia considerable en el pH, produciendo valores finales dentro del rango de 8.4 a 7.4 al finalizar el ciclo. Estos valores se encuentran dentro del rango superior adecuado para un compost maduro, lo cual favorece la actividad de la mayoría de los microorganismos responsables de la descomposición en el compostaje (Ismael et al., 2013), e indica un inicio de la estabilización de la mezcla de compost.

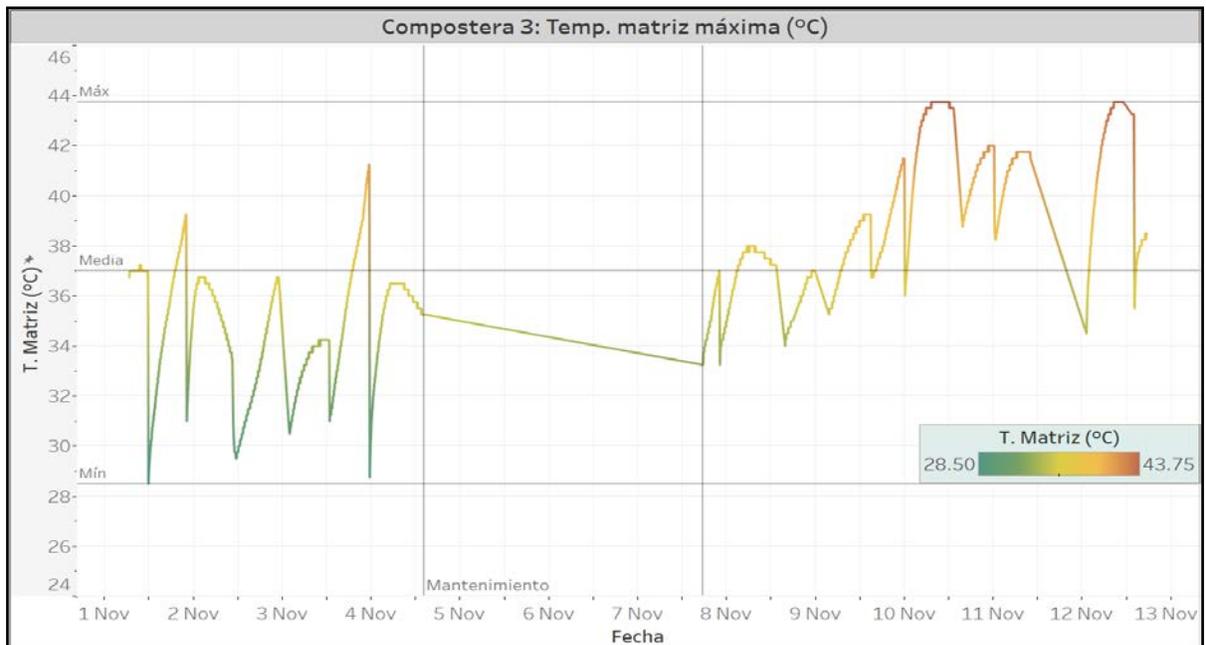
La evaluación de las variables del sistema de monitoreo durante el proceso de compostaje, mostró un registro de temperaturas mayores por encima de los 40 °C, en los tratamientos con cartón para huevos, 2 y 3. Estos valores se presenciaron durante la fase activa del primer ciclo de compostaje iniciando en el día 9 y concluyendo en el día 12, con temperatura de  $40 \pm 0.7^\circ\text{C}$  a  $42.75 \pm 0.7^\circ\text{C}$  en la compostera 2 y al día 19 en la compostera 3, con un máximo de  $43.75 \pm 0.7^\circ\text{C}$ . Sin embargo, se encontró una media de  $33.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$  y  $34.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$ , respectivamente; con una cantidad similar de mediciones (870 vs 816) sobre los 40 °C. Durante el periodo de máxima temperatura de matriz, la temperatura ambiental interna registrada es de  $28.8 \pm 0.9^\circ\text{C}$  para la compostera 2 y en la compostera 3, se carece de registro dada la remoción del sensor para mantenimiento. Las líneas diagonales representan una discontinuidad en las mediciones, relacionado con el primer mantenimiento hecho a los sistemas de monitoreo, a razón de la aparición de hongos en las placas y la primera saturación de los sensores ambientales por parte de la condensación, comenzando en la compostera 2 y 3 (Figura 17).

También, se observó que estas altas temperaturas de matriz se mantuvieron con una diferencia considerable respecto a la temperatura ambiental externa con valores cercanos a  $20^\circ\text{C} \pm 0.9^\circ\text{C}$  y una humedad relativa alta de 90 %. Las condiciones ambientales externas durante los días de mayor temperatura, reflejan un comportamiento particular relacionado con la llegada de un temporal, en el cual se mantuvo la humedad relativa por encima de 80 % y la temperatura ambiental externa se mantuvo entre  $23 \pm 0.9^\circ\text{C}$  y  $18 \pm 0.9^\circ\text{C}$  (Figura 18).

Los tratamientos 2 y 3, se caracterizaron por una alta actividad interna durante el proceso de compostaje, basada en la condensación y en la cantidad de organismos vivos como moscas y larvas, observados en abundancia en cada tratamiento. La presencia de larvas de mosca soldado (*Hermetia illucens*) en estos tratamientos, se observó desde la semana dos hasta el final de cada ciclo. De acuerdo con Liu et al., 2020, las larvas precisan de una alta disponibilidad de materia orgánica, temperaturas entre 25 °C y 30 °C, con una humedad cercana a 70 % para desarrollarse y desempeñan un papel esencial en la descomposición y reciclaje de los nutrientes asociado a sistemas de compostaje. Estas condiciones fueron observadas y respaldadas respecto a la temperatura de matriz registrada durante el proceso de compostaje, donde se mantuvo principalmente en el rango mesófilico, degradando los RSB entre 20 a 40 °C. Lo anterior, promueve el descenso del pH, dada

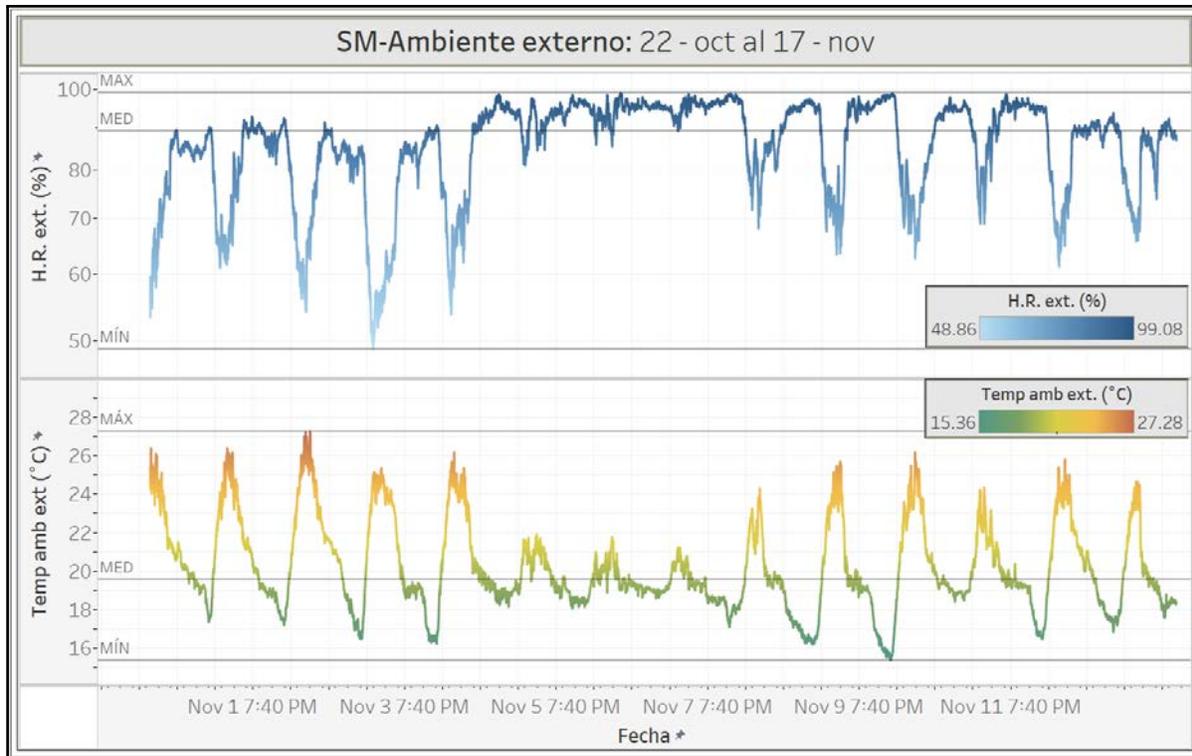


(a)



(b)

**Figura 17.** Temperaturas registradas por encima de los 40 °C durante los ciclos de compostaje evaluados (a) : Compostera 2, (b) Compostera 3.



**Figura 18.** Gráfico descriptivo de las variables ambientales externas durante el periodo de temperatura máxima registrada en la temperatura de matriz de los 4 tratamientos evaluados.

la liberación de ácidos orgánicos de los carbohidratos y lípidos degradados por los microorganismos descomponedores, generando también, calor al degradar los residuos orgánicos (Ajmal et al., 2020).

Dado que las moscas soldado admiten un rango amplio de pH, el comportamiento observado durante el ciclo de compostaje, puede relacionarse con la estructura y disponibilidad de los nutrientes, más que con la acidez de la mezcla de compostaje ((Liu et al., 2020)(Figura 19).

#### 4.4. Análisis de los pretratamientos en el proceso

El pretratamiento juega un papel importante en habilitar los nutrientes contenidos en los RSB, mediante el aumento en el área superficial del material y la acción por parte de los microorganismos. Los tratamientos con picado grueso pueden facilitar un acceso más gradual a los nutrientes, permitiendo un suministro constante de alimento para las larvas y descomponedores a lo largo del tiempo. Sin embargo, disminuyen la homogenización de la mezcla de compostaje, produciendo cúmulos en el interior de la compostera y aumentando el volumen ocupado en la cámara, con la misma cantidad de material añadido.



**Figura 19.** Demostración del lixiviado recolectado en la compostera 3 durante la tercera semana del segundo ciclo.

Por otro lado, el pretratamiento con picado fino aunque permite una liberación más rápida de los nutrientes y favorece la homogeneización de la mezcla de compostaje, presentó desafíos significativos, como la compactación de la mezcla durante el compostaje, la generación de olores ácidos por la posible proliferación de microorganismos anaeróbicos y la menor presencia de insectos descomponedores. Este último aspecto podría ser particularmente problemático en el caso de compostajes domésticos que dependen de estos insectos para la descomposición de los residuos, lo que podría explicar la menor presencia de moscas soldado en los tratamientos 1 y 4. Además, la estructura más compacta del material picado fino, podría reducir la aireación y dificultar la movilidad de las larvas, lo que también puede afectar su proliferación y desarrollo (Liu et al., 2020). De acuerdo con las observaciones realizadas en el presente estudio, se puede afirmar que el pretratamiento fino ayuda a homogeneizar la mezcla de compostaje y genera una mejor estructura para el proceso de compostaje. Sin embargo, este pretratamiento puede causar una mayor compactación generando condiciones anaerobias en la mezcla de compostaje (**Figura 20**).

Para un proceso de compostaje, el rango de humedad óptimo se estima entre 40 % a 60 %. Los valores fuera del rango reducen la actividad microbiana al reducir la disponibilidad del oxígeno y agua en la matriz (Azim et al., 2018). El pretratamiento fino durante el proceso de compostaje, mostró una compactación en la mezcla de compostaje y por consiguiente un menor volumen, lo



(a)



(b)

**Figura 20.** Imágenes comparativas de la mezcla de compostaje durante la segunda semana, de la primer fase activa (a) Compostera 1: Picado fino + pellet, (b) Compostera 2: Picado fino + cartón.

que permite un mayor ingreso de material durante el ciclo de compostaje (**Figura 20**). Esto podría ser beneficioso para aumentar la eficiencia del sistema y reducir el volumen de residuos sólidos biodegradables. Sin embargo, el riesgo de generar condiciones que promuevan la proliferación de microorganismos anaeróbicos plantea importantes desafíos que necesitan ser abordados.

Aunque se encontraron las menores temperaturas de matriz en los pretratamientos con picado fino, se percibieron olores ácidos, en especial en la compostera 1. Lo que puede indicar la liberación de ácidos orgánicos por la ruptura del material y la homogeneización por parte del material secante utilizado. También, puede deberse por una baja relación de C/N durante la primera etapa del compostaje, lo que podría generar amoníaco y reaccionar con otros compuestos en la compostera para liberar los olores característicos presenciados (Guidoni et al., 2018).

Dado que el pretratamiento disminuye el tamaño de partícula y permite liberar el agua contenida en las estructuras de los RSB, se observó que en las composteras 3 y 4, este proceso fue más lento y generó mejores condiciones para los microorganismos, de acuerdo con la temperatura de matriz observada durante los ciclos de evaluación. También, los compuestos lignocelulosos presentes en los RSB y MS, se consideran lentamente susceptibles a la descomposición o mineralización y son los más resistentes a los procesos de degradación en el compostaje (Epstein, 2011).

Por lo que, se genera una degradación más lenta cuando se mantienen estas estructuras casi intactas, como observado en los pretratamientos con picado grueso (Figura 21).

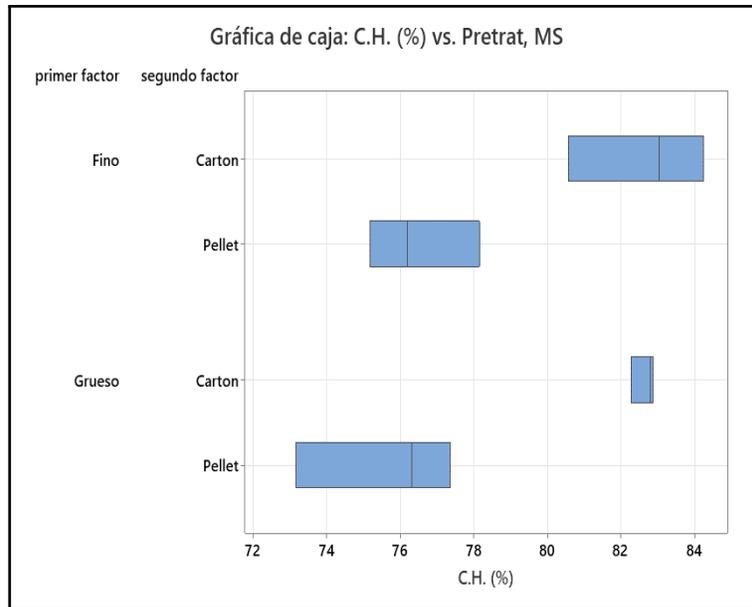


**Figura 21.** Imágenes comparativas de la mezcla de compostaje durante la segunda semana, de la primer fase activa (a) Compostera 3: Picado grueso + cartón, (b) Compostera 4: Picado grueso + pellet.

#### 4.5. Análisis del compost producido con base en los MS

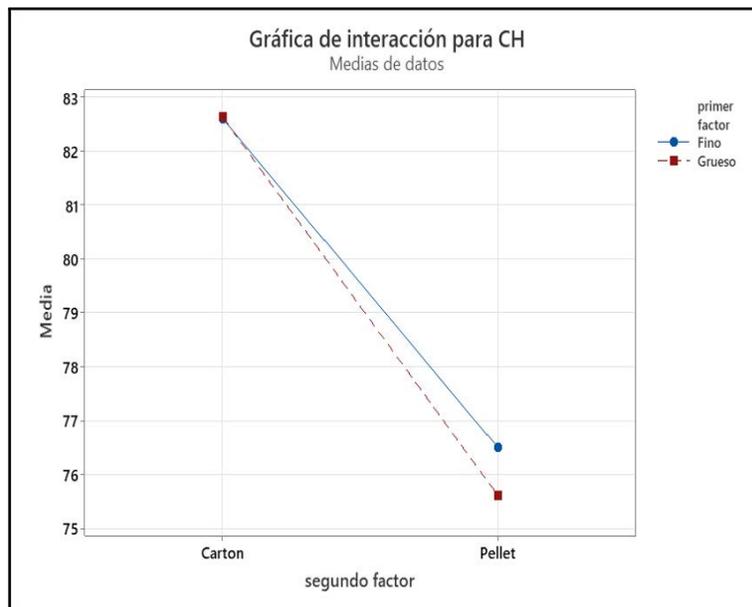
Los materiales secantes empleados en el compostaje promueven un equilibrio de humedad adecuado, mejoran la aireación y aceleran el proceso de descomposición de los residuos orgánicos al balancear la relación C/N. Esta práctica puede potenciar el rendimiento del proceso y dar lugar a un compost estable. El análisis de varianza (ANOVA) demostró que el segundo factor, que corresponde a los materiales secantes, tuvo un efecto significativo ( $F = 53.0$ ,  $p < 0.001$ ) en el compost producido. La significancia estadística indica que hay diferencias importantes en el contenido de humedad del compost producido al utilizar cartón de huevos o pellets de madera como material secante. El uso de cartón de huevos resultó en un compost con un mayor contenido de humedad (82.6 %) en comparación con los pellets de madera (76.1 %) con una confianza del 95 % y un  $R^2$  ajustado de 82.3 % (Figura 22).

El análisis de interacciones entre los factores mostró un aumento en el contenido de humedad a través del ciclo de compostaje, para los tratamientos con cartón. Esta diferencia podría atribuirse a la mayor capacidad de absorción de humedad del cartón de huevos, que retiene una cantidad de



**Figura 22.** Distribución de los datos registrados en los 4 tratamientos durante los 3 ciclos de compostaje para la variable C.H.( %).

agua superior durante el proceso de compostaje y se degrada a un ritmo más lento en comparación con los pellets. Si bien una humedad adecuada es fundamental para la actividad microbiana y la descomposición de los residuos orgánicos, un exceso puede generar condiciones anaeróbicas y afectar negativamente la calidad del compost producido (Azim et al., 2018), (Figura 23).



**Figura 23.** Gráfica de la interacción presente en los factores evaluados para la variable contenido de humedad ( %).

En vista de la significancia encontrada, se procedió a realizar una prueba post-hoc de Tukey

para comparar las medias del factor MS. Los tratamientos no comparten la misma agrupación, presentando así diferencias significativas entre las medias ajustadas de los tratamientos, con un valor  $p < 0.001$ , y una diferencia de medias ajustada de  $-6.57$ .

Respecto a la variable de estudio relación C/N, se hallaron diferencias significativas en función de los materiales secantes, según el ANOVA de dos factores (valor  $F = 15.1$ , valor  $p = 0.004$ ). En contraste, el cartón de huevos produjo un compost con una menor relación C/N (19.2) en comparación con los pellets de madera (22.8), con un  $R^2$  ajustado de 55.7 %. Los resultados sugieren que la relación C/N se ve influenciada significativamente por el material secante, obteniendo proporciones mayores para el pellet, en comparación con el cartón. Una menor proporción al finalizar el proceso de compostaje, puede deberse a un mayor consumo por parte de los microorganismos en la fase activa, disminuyendo la proporción entre ambos elementos y el tiempo de degradación (Azim et al., 2018).

La inspección del compost producido revela una masa compacta en los tratamientos con cartón, donde aún se aprecian las fibras del cartón incluso después de finalizado el ciclo de compostaje. Los pretratamientos con pellet, mejoraron la homogenización de la mezcla de compostaje, permitiendo dar una mejor estructura e influyendo considerablemente en la granulometría del compost producido (Figura 24).



(a)

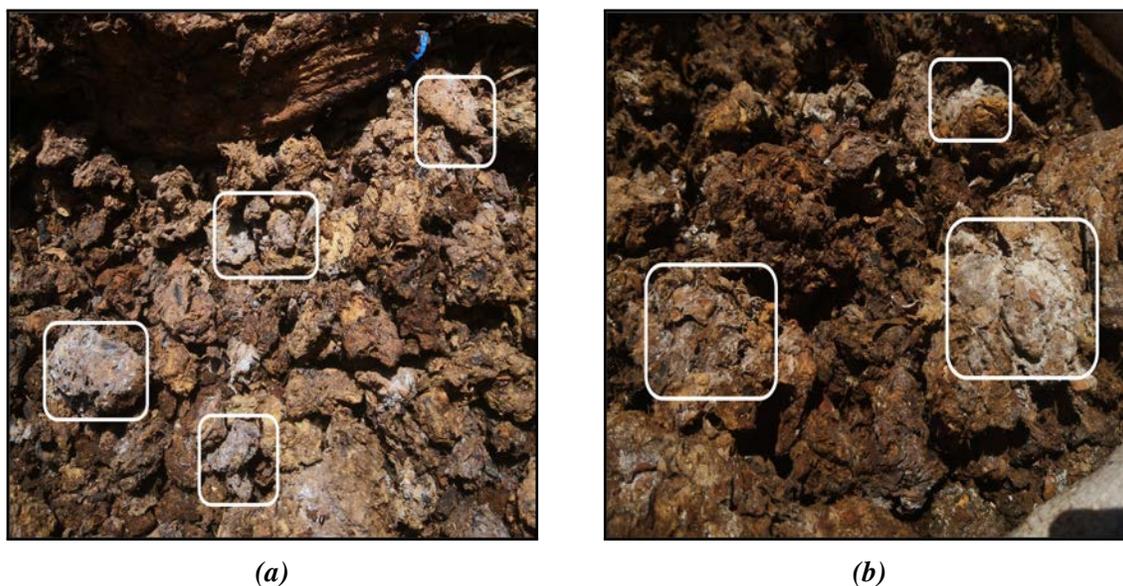


(b)

**Figura 24.** Ejemplo comparativo de la granulometría del compost final producido en tratamientos con material secante diferente: (a) Compostera 1, (b) Compostera 3.

El comportamiento de la variable pH de acuerdo con el muestreo al final, mostró un comportamiento no lineal para los tratamientos. Por este motivo, se implementó una prueba de Kruskal Wallis para evaluar las medias de los diferentes tratamientos evaluados. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para esta variable ( $p = 0.91$ ;  $H = 0.54$ ). Todos los tratamientos produjeron un alcalinización de la mezcla de compostaje, obteniendo un rango de pH final entre 7.46 en la compostera 1 y 8.03 en la compostera 3, con una diferencia promedio entre todos los tratamientos de 3.14 entre inicio y final.

Un aspecto adicional a resaltar es la prevalencia de comunidades de microorganismos visibles en los compost producidos por los tratamientos con cartón. Se observó la generación de mantos blancos, sobre la superficie expuesta en los sacos donde se almacenó el producto final. Esta característica fue observada en menor o nula medida en los tratamientos 1 y 4, y va de acorde, con las altas temperaturas presenciadas en estos tratamientos, y una mayor disminución de la relación C/N producto del incremento en la actividad microbiana durante el proceso (Figura 25).



*Figura 25. Presencia de comunidades microbianas en el compost producido observado en los tratamientos con cartón: (a) Compostera 2, (b) Compostera 3.*

#### **4.6. Análisis del compost producido con base en los pretratamientos**

La evaluación de los resultados obtenidos del compost producido demostró que no existe una diferencia significativa bajo las condiciones presentadas para los pretratamientos evaluados. Se encontró que ambos tratamientos obtuvieron rendimientos similares con un **contenido de**

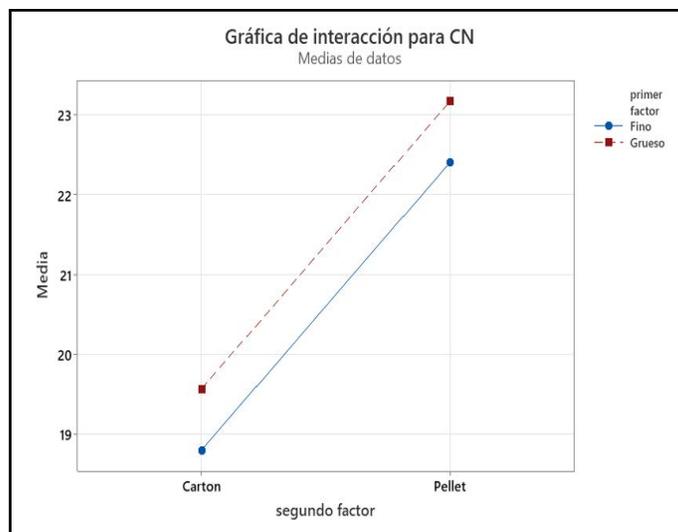
**humedad** ajustado de 79.6, para el picado fino y el picado grueso obtuvo un promedio de 79.1 %. Los coeficientes obtenidos del modelo del ANOVA, describen que el pretratamiento fino es 0.215 unidades más alto que en el nivel picado grueso con un  $R^2$  de 82.3 %. Sin embargo, el valor p de 0.65 sugiere que esta diferencia no es estadísticamente significativa.

Las partículas pequeñas presentes en el pretratamiento fino, tenderán a llenar los espacios vacíos en la matriz, formando una masa más densa y compacta que en el picado grueso. Lo que reduce la cantidad de espacios porosos en la matriz del compost, reteniendo una mayor cantidad de líquidos y aumentando el contenido de humedad en la matriz (Azim et al., 2018). Los resultados obtenidos en el picado fino sugieren un proceso de compostaje con una lenta liberación del lixiviado producto de la compactación en la matriz de compostaje, el picado grueso generó una menor variabilidad en el contenido de humedad para los tratamientos con cartón. Lo que puede indicar una retención del agua considerable por el material secante adicionado (Figura 22).

En cuanto a la **relación C/N**, los coeficientes del modelo del ANOVA indican que en promedio en el nivel picado fino, habrá 0.382 unidades más baja que en el picado grueso. Sin embargo, no se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa dado el valor de  $p = 0.43$ . Al triturar los residuos en partículas más pequeñas, se incrementa la superficie de contacto entre los microorganismos y el material orgánico. Esto puede acelerar la descomposición y la liberación de nutrientes, lo que puede resultar en una relación C/N más baja en comparación con el picado grueso (Azim et al., 2018). A su vez, puede facilitar una distribución más homogénea de carbono y nitrógeno dentro del compost y habilitar los nutrientes presentes en las estructuras de los RSB. Un pretratamiento grueso parece indicar una reducción menor de la relación C/N, conteniendo parte de estos elementos en la matriz de compostaje (Figura 26).

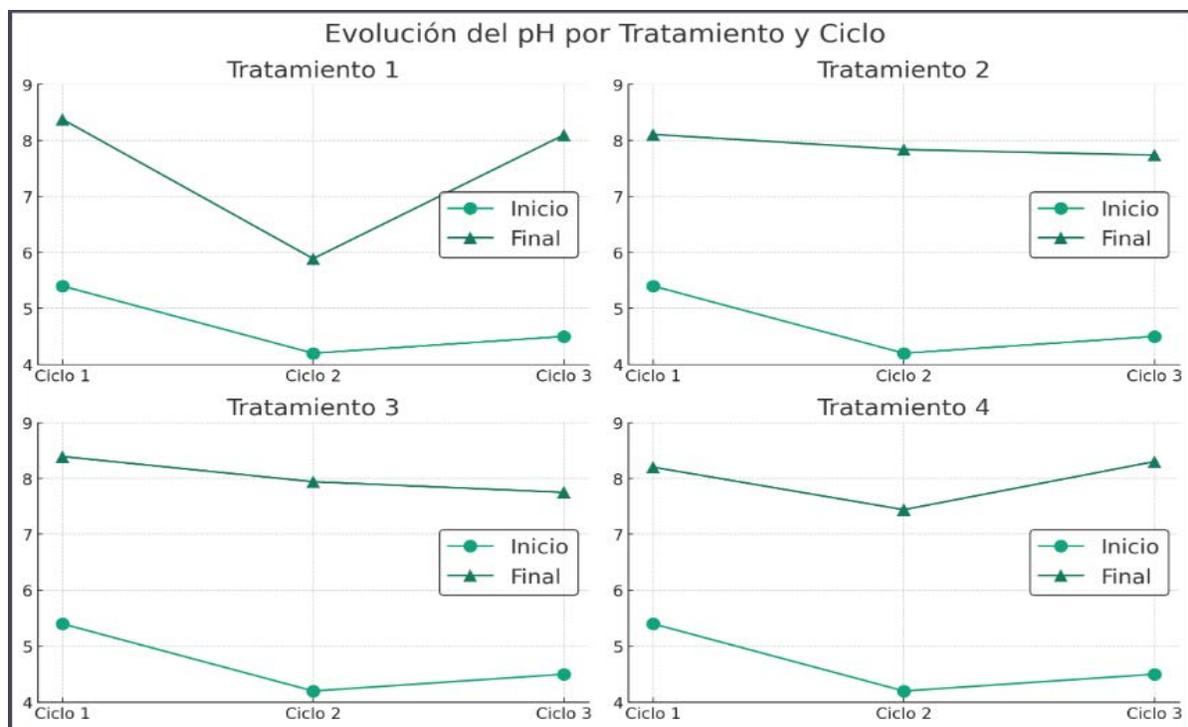
El picado fino puede retener la humedad debido a la compactación de la mezcla de residuos, reduciendo el espacio poroso y evitando que el exceso de líquidos sean liberados. Esto puede aumentar el riesgo de anaerobiosis si no se maneja adecuadamente. La retención de humedad en exceso y la falta de oxígeno pueden crear condiciones adversas al proceso de compostaje, lo que puede afectar negativamente la calidad del compost y generar olores desagradables (Guidoni et al., 2018).

Por otro lado, el pH no mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados



**Figura 26.** Gráfica de interacción entre los factores, pretratamiento y material secante, evaluados para la relación C/N.

( $p = 0.91$ ;  $H = 0.54$ ). Sin embargo, se registró una medición atípica en el segundo ciclo de la primera compostera. El incremento del pH fue notablemente menor en comparación con los demás ciclos y tratamientos. Esto puede deberse a la carga en la compostera y a una mayor compactación de la mezcla de compostaje, limitando la actividad microbiana y favoreciendo la acumulación de lixiviado que contiene altas concentraciones de ácidos orgánicos. Estos factores podrían explicar el aumento menos pronunciado en la compostera 1 durante el segundo ciclo (Figura 27).



**Figura 27.** Evolución de la variable pH de los cuatro tratamientos para cada ciclo.

## 4.7. Diseño y evaluación del sistema de monitoreo de las condiciones internas de la compostera durante el proceso de compostaje

### 4.7.1. Costo económico del SM

La mayoría de los componentes utilizados en los sistemas de monitoreo son de bajo costo y fueron conseguidos en el mercado local, excepto los sensores de concentración de oxígeno que representan un 57 % del costo del SM-C. El costo final del sistema de monitoreo para una compostera fue aproximadamente de \$189 dólares americanos o su equivalente en colones a un tipo de cambio al momento de la adquisición de 624 colones (C116.000) (Tabla 8). Otros sistemas de monitoreo propuestos se han basado en el monitoreo de la matriz únicamente, con un costo alrededor de los \$150 dólares (Jordão et al., 2017) sin el uso de la comunicación inalámbrica Wifi, y más complejos con la incorporación de software para la automatización del sistema de compostaje y actuadores para equipos como ventiladores ((Sepúlveda-Cisneros et al., 2021), (B. Pansari et al., 2018)).

**Tabla 8.** Costo económico de la fabricación del sistema de monitoreo propuesto para la evaluación de las condiciones internas en las composteras giratorias.

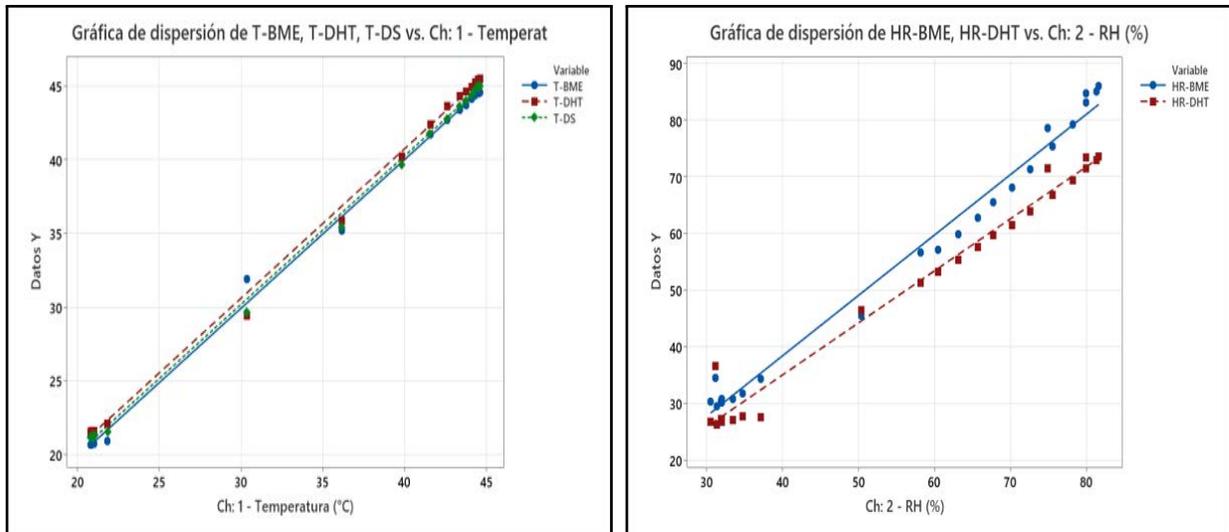
Componentes del sistema de monitoreo	Costo total en (\$)	Costo total en (€)
TTGO Display ESP32	23.5	14664
Breadboard	5.45	3400.8
Jumper Wires female to male , male to male.	2.5	1560
Power board adapter module supply	5.95	3712.8
Power wall charger 9V - 1A	4.95	3088.8
DS18B20 Temperature sensor module, x2	16	9984
DHT21 Temperature and humidity Sensor, x2	19.9	12417.6
DFRobot Gravity Oxygen sensor (SEN 0322), x2	107.8	67267.2
Total	186.05	116095.2

#### 4.7.2. Calibración de los sensores

Las incertidumbres relativas a las curvas de calibración de los sensores, en comparación con el equipo de referencia HOBO, cumplieron con el requisito de incertidumbre mínima asociada a las operaciones de compostaje, que es de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  (Epstein, 2011). Los sensores fueron calibrados utilizando un modelo de regresión lineal. Los valores de la incertidumbre expandida para los sensores son los siguientes: BME280:  $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$  para la temperatura y  $\pm 5.2\%$  para la humedad relativa; DHT21:  $\pm 0.9^{\circ}\text{C}$  para la temperatura y  $\pm 5.4\%$  para la humedad relativa; y DS18B20:  $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$  para la temperatura. Estos valores de incertidumbre aseguran una adecuada precisión para mediciones en el proceso de compostaje (Figura 28).

#### 4.7.3. Evaluación del SM-Amb.ext

El sistema no presentó inconvenientes durante los ciclos de evaluación y el registro de datos se dió de forma continua y constante. No se encontraron violaciones extremas de los supuestos de normalidad para los datos del SM-Amb.ext y se contabilizaron 38224 datos en total para cada variable de este sistema con una reducción aproximada entre 633 a 659 datos una vez realizado el promedio por hora por día para cada periodo de evaluación (Tabla 9).



(a) Temperatura ambiental

(b) Humedad Relativa

**Figura 28.** Curva de calibración obtenida para las variables temperatura y humedad relativa de los sensores BME280, DHT21 y DS18B20 utilizados.

**Tabla 9.** Resumen de los datos registrados para las variables del SM-Amb.ext durante el estudio realizado.

Fecha	Temperatura ambiental ext. (C)				Humedad Relativa ext. (%)			
	mín	máx	prom	desv	mín	máx	prom	desv
22oct - 17nov	14.82	27.28	20.35	2.47	48.86	100	82.95	11.4
18nov - 14dic	13.83	27.43	19.88	2.46	47.49	98.16	79.38	9.47
15dic - 09ene	14.59	26.83	19.11	2.54	30.43	92.04	75.22	10.4
10ene - 06feb	13.71	26.41	18.71	2.57	36.95	96.07	75.17	10.01

Se evaluó la correlación entre temperatura ambiental externa y H.R. externa mediante la prueba de Pearson, demostrando una tendencia negativa y moderada entre -0.59 a -0.81, con  $p$  cercano a 0. Esto sugiere que a medida que la temperatura externa aumenta, la humedad relativa externa tiende a disminuir, y viceversa. Siendo la correlación más alta durante la fase activa del primer ciclo, y es también donde se registraron las mayores temperaturas y lluvias (Figura 18).

#### 4.7.4. Evaluación del SM-Compostera

El sistema de monitoreo continuo propuesto registró datos de la matriz de compostaje y del ambiente interno de ambas cámaras de compostaje de forma simultánea durante los tres ciclos de evaluación. Se presentaron interrupciones en las mediciones de los sensores producto del mantenimiento de los sistemas, los volteos diarios, la cosecha del compost producido, así como ensayos

realizados con ambiente externo para verificar el funcionamiento de los sensores ambientales. El primer ciclo se caracterizó por una frecuencia de registro de 3 minutos y posterior se modificó a 10 minutos. Por lo que, durante los 3 ciclos de compostaje se registró en promedio una cantidad de 9595 mediciones en promedio de temperatura de matriz por ciclo de evaluación. Se presentaron inconvenientes con la excesiva condensación y obstrucción de los sensores ambientales por insectos y partículas en el interior. Lo anterior, generó interrupciones en las mediciones y posteriormente se removieron los datos espurios para el análisis de estas variables.

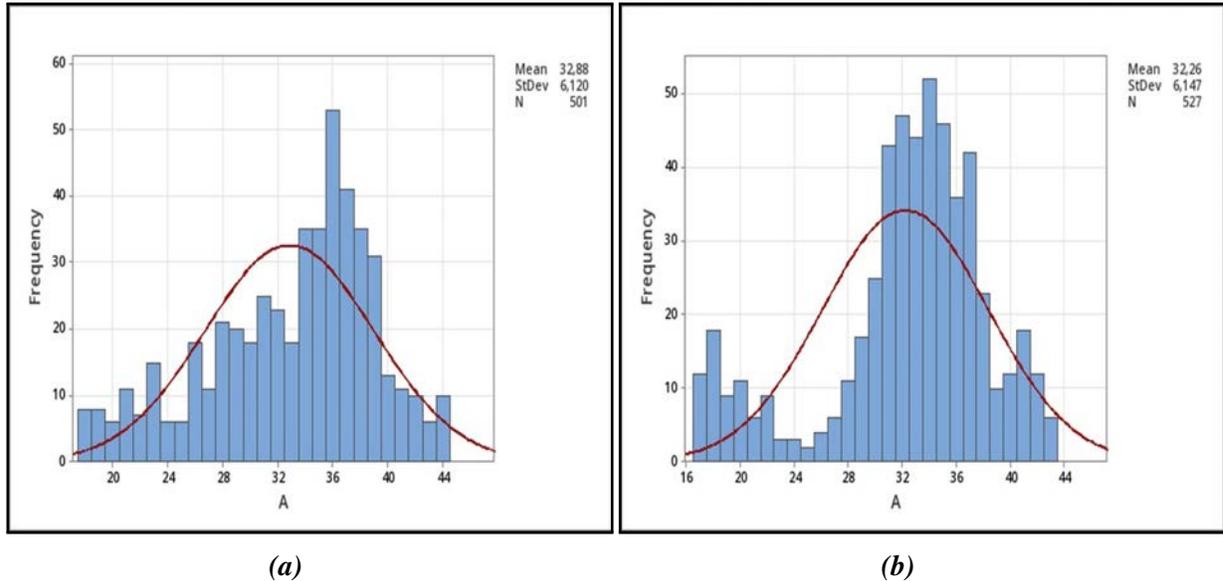
**4.7.4.1. Temperatura de Matriz** Mediante la evaluación del ANOVA de dos factores para los valores obtenidos de la variable temperatura de matriz, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados con un  $R^2$  de 10.6 % y valores p para el segundo factor de 0.11, respecto a 0.83 para el primer factor: pretratamiento. Lo cual indica, que hay otros factores que influyen en la variabilidad de los resultados y no hay evidencia suficiente para rechazar alguna de las hipótesis nulas, lo que indicaría la presencia de diferencias significativas o alguna interacción de relevancia entre los factores. Se registró en promedio una mayor frecuencia de temperaturas arriba de 30 °C durante la fase activa y para los tratamientos con cartón con un valor promedio de  $32.9 \pm 0.7^\circ\text{C}$ . Siendo la compostera 4, la cual registró una menor actividad a través de los 3 ciclos (Tabla 10).

**Tabla 10.** Tabla resumen para la variable temperatura de matriz de compostaje obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación.

Temp. Matriz (°C) / Ciclo	I - C		II - C		III - C	
	A	P	A	P	A	P
C - 1	29.36	27.39	28.17	24.46	23.90	22.69
	<b>28.38</b>		<b>26.23</b>		<b>23.30</b>	
C - 2	32.26	27.32	30.62	26.32	27.75	22.93
	<b>29.78</b>		<b>28.41</b>		<b>25.31</b>	
C - 3	32.88	27.36	30.82	26.70	29.30	23.79
	<b>30.00</b>		<b>28.67</b>		<b>26.41</b>	
C - 4	28.56	26.34	27.90	25.46	24.24	23.44
	<b>27.46</b>		<b>26.63</b>		<b>23.85</b>	

A pesar de que los tratamientos con pellets (1 y 4) mostraron una clasificación de medias por debajo de la media general, en comparación con el cartón su diferencia no es significativa (Figura

D1 y D4). Se apreciaron temperaturas mayores a los 40 °C para el primer ciclo en las composteras con tratamientos con cartón, independiente del pretratamiento realizado. Sin embargo, estas temperaturas se mantuvieron con una menor frecuencia entre volteos desde la segunda semana de compostaje hasta la conclusión de la fase (Figura 29).



**Figura 29.** Frecuencia de datos obtenidos durante la fase activa del primer ciclo: (a) Compostera 2, (b) Compostera 3.

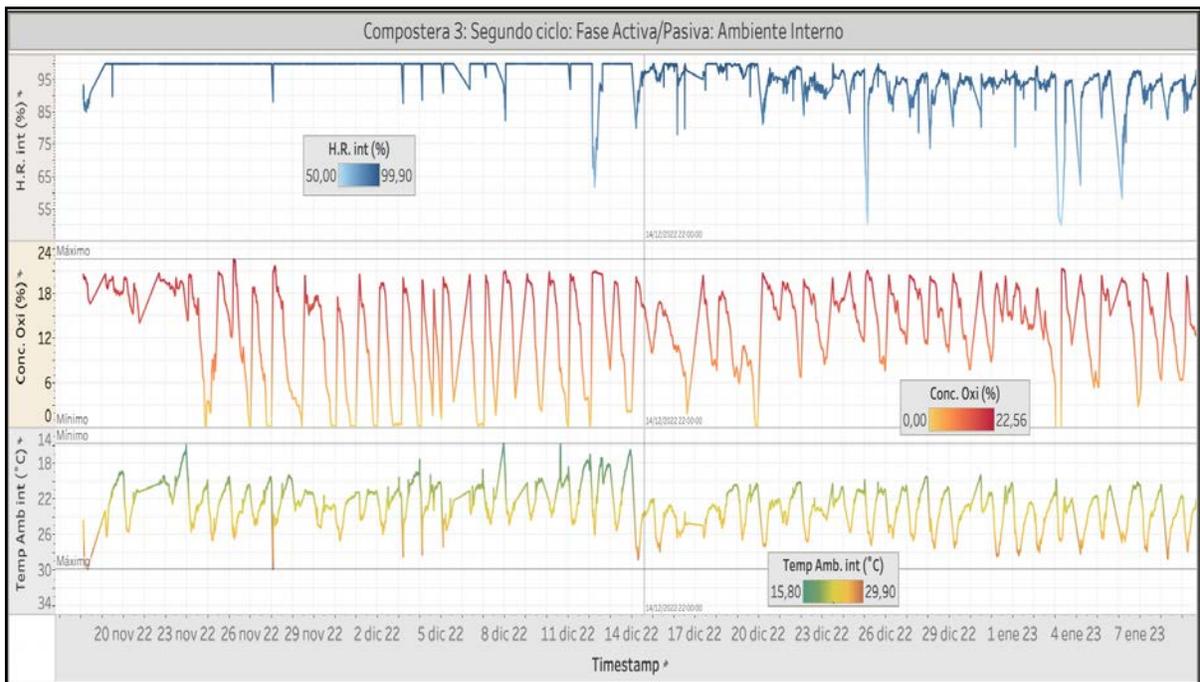
**4.7.4.2. Atmósfera interna de la compostera:** Las variables ambientales de monitoreo de los sensores DHT21 y DFrobot, fueron evaluadas de acuerdo con los datos procesados para cada compostera. Los sensores DHT21, presentan una carcasa de protección de las conexiones que permitió albergar insectos, humedad y partículas que obstruyeron el funcionamiento adecuado del monitoreo ambiental. Es por ello, que fue necesario remover en ocasiones el sistema de monitoreo para darle mantenimiento y verificar el funcionamiento de los sensores (Figura 30; E1)

La temperatura ambiental interna se mantuvo entre rangos menores a 40 °C, con medias mayores en la compostera 3. Sin embargo, no se encontró evidencia suficiente para concluir que hay diferencias significativas basadas en esta variable para los tratamientos evaluados. El análisis de las varianzas mostró un valor p ligeramente mayor al valor de confianza para el primer factor, pretratamiento, con una  $R^2$  ajustado de 24.2 % (Tabla 11).

La variable humedad relativa interna presentó un comportamiento sesgado hacia una satu-



(a)



(b)

**Figura 30.** Gráficos descriptivos del comportamiento de las variables del sistema de monitoreo de las composteras relacionadas con la atmósfera interna: Segundo Ciclo: (a) Compostera 1, (b) Compostera 3.

**Tabla 11.** Tabla resumen para la variable temperatura de ambiente interna obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación.

Temp. Amb. Int. (°C) / Ciclo Compostera / Fase	I - C		II - C		III - C	
	A	P	A	P	A	P
C - 1	21.97 <b>22.04</b>	22.10	21.54 <b>21.44</b>	21.34	21.56 <b>20.96</b>	20.36
C- 2	22.37 <b>22.10</b>	21.83	22.27 <b>21.79</b>	21.31	21.54 <b>20.79</b>	20.04
C - 3	22.45 <b>23.38</b>	24.31	22.09 <b>22.82</b>	23.55	21.27 <b>21.58</b>	21.89
C - 4	21.73 <b>21.65</b>	21.57	21.64 <b>22.68</b>	23.71	21.23 <b>22.08</b>	22.92

ración del 100 % producto de la condensación. El análisis de varianza mostró que hay diferencias significativas en el primer factor ( $p = 0.01$ ), pero no en el segundo factor ( $p = 0.3$ ). La comparación mediante la prueba de Tukey, mostró que hay diferencias significativas entre los niveles Fino y Grueso del primer factor con una diferencia de -2.32 entre las medias (Tabla 12; Figura E1).

**Tabla 12.** Tabla resumen para la variable humedad relativa interna obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación.

H.R. Int. (%) / Ciclo Compostera / Fase	I - C		II - C		III - C	
	A	P	A	P	A	P
C - 1	99.37 <b>99.59</b>	99.81	99.65 <b>99.70</b>	99.76	99.84 <b>99.87</b>	99.90
C- 2	99.84 <b>99.70</b>	99.55	99.75 <b>99.82</b>	99.89	99.90 <b>99.67</b>	99.44
C - 3	99.29 <b>96.04</b>	92.80	99.01 <b>96.32</b>	93.63	99.56 <b>97.36</b>	95.15
C - 4	99.14 <b>95.39</b>	91.65	99.58 <b>99.74</b>	99.90	99.69 <b>99.57</b>	99.46

De forma similar, la concentración de oxígeno en el ambiente interno presentó un comportamiento influenciado por la acumulación de la condensación alrededor del filtro del sensor. Esto generó un punto de saturación, donde las mediciones en el sensor descienden con rapidez a valores menores al 1 % . Es por ello, que se optó por girar el SM-C y permitir que realice un registro de las condiciones ambientales externas para verificar el funcionamiento del sensor, en cuanto el sensor

de matriz continua registrando con la cámara cerrada (Tabla 13).

**Tabla 13.** Tabla resumen para la variable concentración de oxígeno en el ambiente interno obtenida de los 4 tratamientos para cada ciclo de evaluación.

Conc. Oxi ( %) / Ciclo	I - C		II - C		III - C	
	A	P	A	P	A	P
C - 1	17.90	13.47	17.20	17.93	14.39	17.72
	<b>15.69</b>		<b>17.56</b>		<b>16.06</b>	
C- 2	14.65	13.03	13.31	15.60	14.54	15.96
	<b>13.84</b>		<b>14.46</b>		<b>15.25</b>	
C - 3	16.37	14.38	12.12	14.04	12.60	17.86
	<b>15.37</b>		<b>13.08</b>		<b>15.23</b>	
C - 4	18.63	16.68	17.31	17.44	12.20	17.48
	<b>17.66</b>		<b>17.38</b>		<b>14.84</b>	

Se encontró una diferencia significativa entre los tratamientos con base en el segundo factor (MS), para la concentración de oxígeno con un  $R^2$  ajustado de 51.1 %. Posterior a la evaluación del ANOVA se utilizó la prueba de Tukey para identificar los grupos con diferencias significativas en sus medias. El análisis revela una media mayor de concentración de oxígeno para el nivel Pellet de 16.8, y 14.5 % para el cartón. Esto sugiere que el pellet presenta una menor actividad microbiana aeróbica, en cuanto el cartón favorece la actividad microbiana dado un menor contenido de oxígeno promedio a través de los tratamientos con cartón. El valor obtenido de p ajustado fue de 0.005; lo que indica que hay una diferencia significativa entre las medias del segundo factor (MS).

#### 4.7.5. Evaluación de la correlación entre las variables de los SM

Para el análisis de correlación, se equilibraron los conjuntos de datos al eliminar registros sin parejas en las variables de estudio, dadas las interrupciones generadas en el registro de datos de temperatura de matriz, y en especial para los sensores ambientales internos. Este proceso garantizó que todas las correlaciones se calcularan utilizando pares de datos emparejados y completos.

La evaluación de la correlación de Pearson mostró una correlación positiva y significativa entre la temperatura de matriz y la temperatura ambiental externa durante el primer ciclo para todas las composteras (C-1 a C-4), con la correlación más fuerte en la Compostera C-1 ( $\rho = 0.22$ ) y más débil en la Compostera C-4 ( $\rho = 0.16$ ). En ciclos posteriores, esta correlación cambió a negativa.

Sin embargo, estas correlaciones son débiles con  $\rho$  variando entre -0.08 y -0.11 en el segundo ciclo y aún menor en el tercero (0.01 y 0.08) (Tabla F1).

El análisis de correlación para las variables de ambiente interno mostró una fuerte correlación positiva entre la temperatura ambiente interna y externa en todas las composteras durante los tres ciclos, lo que implica que las condiciones externas pueden tener un impacto significativo en el proceso. Los valores de correlación de Pearson ( $\rho$ ) oscilan entre 0.72 y 0.93, indicando una fuerte relación lineal. Esto sugiere que a medida que la temperatura ambiente externa aumenta, también lo hace la temperatura ambiente interna de las composteras, y viceversa (Tabla F2).

La humedad relativa interna mostró una correlación negativa con la temperatura externa y positiva con la humedad relativa externa, sugiriendo que los cambios en la temperatura y humedad externas influyen en el ambiente interno de la compostera. A medida que la temperatura externa aumenta, la humedad relativa interna tiende a disminuir, y con un comportamiento similar a la humedad relativa externa.

Para la variable, concentración de oxígeno ambiental la mayoría de las correlaciones son positivas con la temperatura externa y negativas con la humedad relativa externa. Esto sugiere que a medida que la temperatura externa aumenta, la concentración de oxígeno interno se comporta de forma similar, y viceversa. Las correlaciones más fuertes se observan en la Compostera 4 durante el tercer ciclo respecto a la temperatura externa (Tabla F3 y F4).

#### **4.8. Valoración ambiental del estudio realizado**

El  $\text{CH}_4$  es generado por microorganismos en condiciones anaeróbicas durante la descomposición de los residuos orgánicos en el compost y el  $\text{N}_2\text{O}$  es producido por microorganismos que realizan la nitrificación y la desnitrificación durante el compostaje. Ambos son considerados en el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a su alto potencial de calentamiento global y el impacto significativo en el cambio climático (Bonifacio et al., 2017). Los factores de emisión de metano mediante el tratamiento de los residuos en el relleno sanitario, y por el compostaje son:  $0.0519 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{kgRSB}}$  y  $0.004 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{kgRSB}}$  respectivamente y un valor de GWP de 28 veces mayor. En el caso del óxido nitroso, presenta un factor de emisión de  $0.24 \frac{\text{gN}_2\text{O}}{\text{kgRSB}}$  mediante el proceso de compostaje y un GWP de 265 veces mayor al  $\text{CO}_2$  (Instituto Meteorológico Nacional et

al., 2022), (IPCC, 2016).

Cada adición de material a una compostera consistió de 3.1 kg cada dos días, acumulando un total de 40.3 kg por compostera y 161.2 kg en total por cada ciclo de compostaje. Al asumir que se logra una estabilización efectiva de los residuos sólidos biodegradables a través del proceso de compostaje, se estima que la producción de metano se reduce en un 92 %. Esto resulta en la generación de 18.0 kg de CO<sub>2e</sub>, una cifra significativamente menor en comparación con los 232.7 kg de CO<sub>2e</sub> que se producirían si los residuos fueran depositados en un relleno sanitario. Por lo tanto, el uso del compostaje evita la liberación de aproximadamente 214.8 kg de CO<sub>2e</sub> a la atmósfera. Respecto al N<sub>2</sub>O, se estima que su producción bajo un proceso controlado de degradación de los RSB resultaría en 10.2 kg de CO<sub>2e</sub>

La comparación directa entre la generación de metano en los rellenos sanitarios y durante el proceso de compostaje subraya el beneficio medioambiental de la descomposición controlada de los residuos orgánicos. Aunque la producción de metano no se puede eliminar por completo, la reducción del 92 % observada en este estudio aporta información valiosa para las estrategias de mitigación del cambio climático como la revalorización de residuos, una transición a una economía circular y promoción de tecnologías de captura de carbono.

## CONCLUSIONES

1. El cartón de huevos presentó una mayor capacidad de absorción de agua y un menor contenido de humedad en comparación al pellet de madera, con una media de 10.6 %, 2.8 unidad y 12.3 %, 1.9 unidad, respectivamente. Sin embargo, su alto volumen puede saturar la compostera, limitar la cantidad de material procesado y contener una mayor cantidad de agua de la necesaria. Adicionalmente, el procesamiento para reducir el tamaño de partícula es una tarea laboriosa.
2. Ambos tipos de materiales secantes influyeron significativamente en el proceso de compostaje doméstico en composteras giratorias. El material que presentó los resultados más favorables fue el pellet de madera, con un contenido de humedad de 76.0 %, y una relación C/N de 22.8, respecto a los valores obtenidos en los tratamientos con cartón de huevos de 82.3 % y 19.2, respectivamente.
3. Para mantener un proceso de compostaje doméstico bajo un contenido de humedad óptimo recomendado de 60 %, con base en 1 kg de residuos sólidos, se puede utilizar aproximadamente 160 g de pellet y 120 g de cartón, o bien, 70 g de cada material secante en una proporción 50/50. Es importante recordar que hay otras variables, como la temperatura, el tamaño de las partículas y la aireación, que también pueden influir en el control del contenido de humedad.
4. Los pretratamientos evaluados picado fino y picado grueso, no presentaron un efecto significativo en el proceso de compostaje doméstico. Sin embargo, es una práctica recomendada ya que permite disminuir el volumen que se procesa, liberar una mayor cantidad de líquidos y gases y producir una mejor distribución del tamaño de partícula en el compost final.
5. El proceso de compostaje doméstico evaluado experimentó una descomposición de residuos orgánicos a temperaturas entre  $16.5 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  a  $43.8 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  en la matriz. Los tratamientos con cartón alcanzaron temperaturas arriba de  $40^{\circ}\text{C}$  durante la fase activa de degradación, lo cual puede explicar la mayor reducción de C/N observada debido al incremento en la actividad microbiana. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas para esta variable en los tratamientos evaluados, con una media entre  $22.7 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$  y  $32.9 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ . De forma similar, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para la

variable pH, con valores alrededor a 8 al concluir los ciclos de compostaje.

6. Se encontró una influencia estadísticamente significativa respecto a la temperatura de matriz y a las condiciones ambientales externas, lo cual promueve o inhibe el proceso de compostaje doméstico. A su vez, se encontró una correlación negativa moderada entre la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa durante el periodo de evaluación.
7. El sistema de monitoreo de compostaje doméstico diseñado y utilizado demostró ser funcional para el registro fiable de la información procedente de las condiciones internas en las composteras giratorias de doble cámara.

## RECOMENDACIONES

1. Adaptar el sistema de monitoreo para las composteras al remover la recolección continua de datos de los sensores ambientales internos, lo que permite reducir los problemas de mantenimiento presenciados y limitar las mediciones a la temperatura de matriz como variable esencial en el proceso de compostaje.
2. Evaluar la huella de carbono de los materiales secantes para entender el impacto por su revalorización y detallar su contribución a la sostenibilidad en los sistemas de compostaje.
3. Explorar la posibilidad de diferentes combinaciones de materiales secantes que permitan aprovechar las características favorables de cada uno como la degradabilidad del pellet y la capacidad de absorción del agua del cartón para huevos, para mejorar la calidad del compostaje doméstico.
4. Profundizar la correlación existente entre las condiciones ambientales externas e internas presentes en el compostaje doméstico para comprender cómo afectan el proceso y poder ajustar el sistema para obtener mejores resultados.
5. Complementar el estudio con una evaluación microbiológica del compost producido que permita detallar cuáles y en qué medida las comunidades microbianas contribuyen al proceso de compostaje y a la calidad del producto final.
6. Evaluar el impacto y el ahorro generado en insumos como gasolina por el uso del compostaje doméstico como fuente de tratamiento puntual de los residuos generados en el hogar, en vez de su recolección y disposición en vertederos municipales.
7. Abordar la evaluación del proceso de compostaje doméstico mediante un enfoque matemático con ecuaciones diferenciales de cinética de compostaje.

## Referencias

- Ajmal, M., Aiping, S., Uddin, S., Awais, M., Faheem, M., Ye, L., Rehman, K. U., Ullah, M. S., y Shi, Y. (2020). A review on mathematical modeling of in-vessel composting process and energy balance. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00883-y>
- Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica. (2010). Ley para la gestión integral de residuos N °8839. [http://www.gaceta.go.cr/pub/2010/07/13/COMP\\_13\\_07\\_2010.html](http://www.gaceta.go.cr/pub/2010/07/13/COMP_13_07_2010.html)
- Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., y Thami Alami, I. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, 8(2), 141-158. <https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z>
- B. Pansari, N., B. Deosarkar, S., y B. Nandgaonkar, A. (2018). Smart Compost System. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*, 597-601.
- Bermúdez, P., Bertsch, F., López, T., Leiva, Y., Chin, J. S., Flores, M., Cubero, J. F., Brenes, L., Jiménez, M., y Castro, D. (2020). *I Plan Nacional de Compostaje 2020 - 2050* (inf. téc.). Secretaría Consejo Nacional Ambiental. San José, Costa Rica.
- Bonifacio, H. F., Rotz, C. A., y Richard, T. L. (2017). A process-based model for cattle manure compost windrows: Part 1. model description. *Transactions of the ASABE*, 60(3), 877-892. <https://doi.org/10.13031/trans.12057>
- Bustamante, M. A., Restrepo, A. P., Albuquerque, J. A., Pérez-Murcia, M. D., Paredes, C., Moral, R., y 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>
- Chaves-Arias, R., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., y Jiménez-Morales, M. F. (2019). Compostaje de residuos sólidos biodegradables del restaurante institucional del Tecnológico de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32, 39-53. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4117>

- Díaz, R., y Otoma, S. (2014). Cost-benefit analysis of waste reduction in developing countries: A simulation. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(1), 108-114. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0148-3>
- Epstein, E. (2011). *Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management*. CRC Press.
- Fallas Conejo, D., y Fallas, D. (2016). Caracterización del proceso de compostaje y aprovechamiento del calor generado en un reactor bajo aireación forzada, 1-111. <http://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-DiegoFallas.pdf><https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-DiegoFallas.pdf>
- Francou, C., Linères, M., Derenne, S., Villio-Poitrenaud, M. L., y Houot, S. (2008). Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, 99(18), 8926-8934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.071>
- Gobierno de la República de Costa Rica. (2019). *Plan Nacional de Descarbonización* (inf. téc.). San José, Costa Rica.
- González-Sierra, R. P., Arizmendiarieta, J. S., Sánchez, B. P., Iriarte, I. I., y Duarte, G. N. (2019). *Community Composting: A Practical Guide for Local Management of Biowaste*. <https://zerowasteeurope.eu/downloads/community-composting-a-practical-guide-for-local-management-of-biowaste/>
- Guidoni, L. L. C., Marques, R. V., Moncks, R. B., Botelho, F. T., da Paz, M. F., Corrêa, L. B., y Corrêa, É. K. (2018). Home composting using different ratios of bulking agent to food waste. *Journal of Environmental Management*, 207, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.031>
- Hernández, R. V., Torres, R., y Ramírez, Y. B. (2015). Implementing Takakura composting method for waste recycling in Loja city, Ecuador. *Centro de Biotecnología*, 4(1), 36-41.
- Herrera, E. A. (2017). *Dimensionamiento de un sistema de tratamiento de residuos sólidos orgánicos por medio del modelado y simulación de un sistema de compostaje*. (Tesis doctoral). Universidad de Costa Rica.

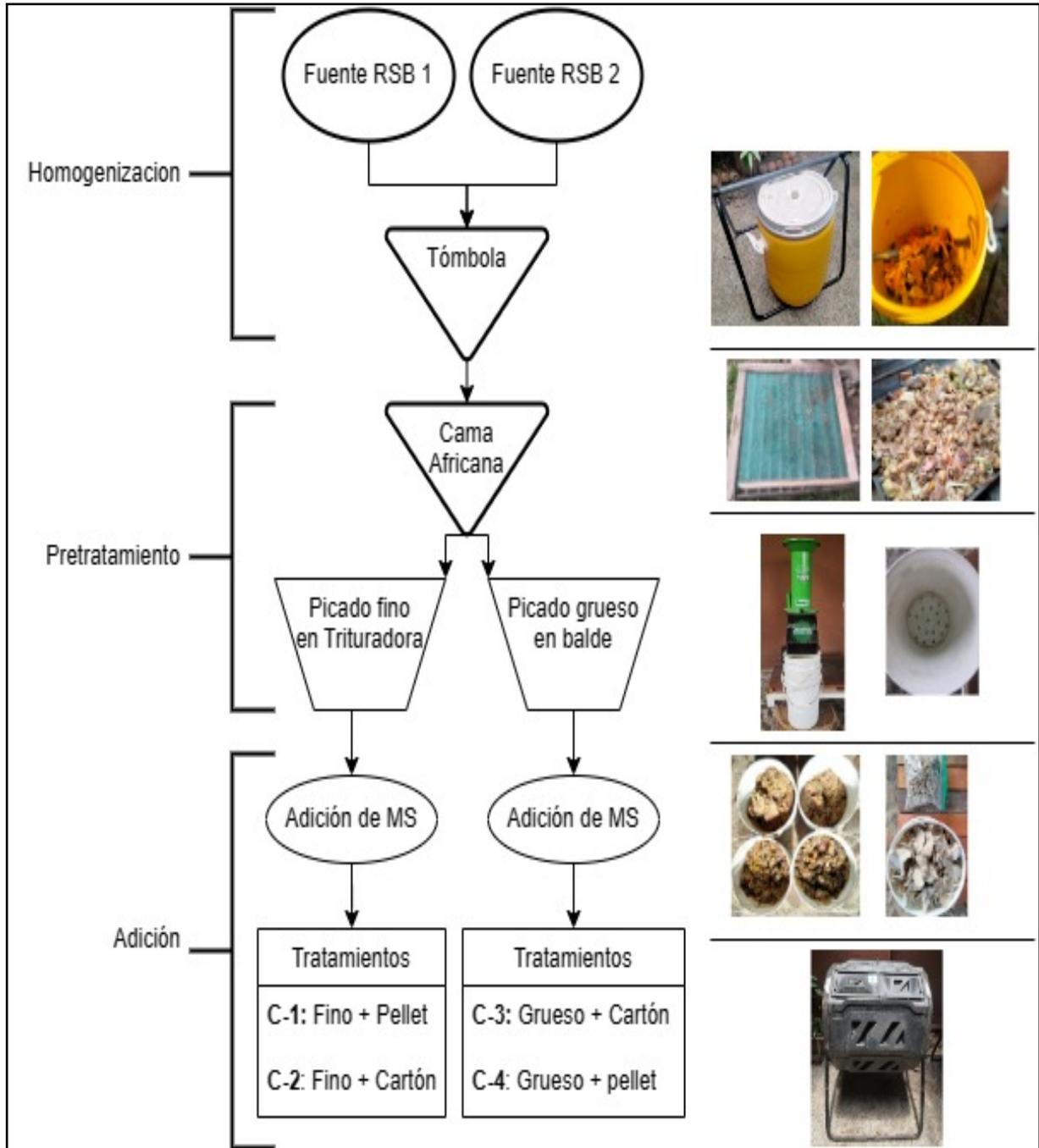
- Instituto Meteorológico Nacional, Instituto Costarricense de Electricidad y Laboratorio Costarricense de Metrología. (2022). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero* (inf. téc.). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.662052>
- IPCC. (2016). *Global Warming Potential Values* (inf. téc.). Greenhouse Gas Protocol. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Ismael, L. L., Pereira, R. A., Allyson, C., Farias, S. D., y Tarcísio, E. (2013). Avaliação de composteiras para reciclagem de resíduos orgânicos em pequena escala Evaluation of composting bins for small-scale recycling of organic wastes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(4), 28-39.
- Jordão, M. D., de Paiva, K., Firmo, H. T., Inácio, C. T., Rotunno Filho, O. C., y e Lima, T. d. A. (2017). Low-cost automatic station for compost temperature monitoring. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(11), 809-813. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p809-813>
- Keng, Z. X., Chong, S., Ng, C. G., Ridzuan, N. I., Hanson, S., Pan, G. T., Lau, P. L., Supramaniam, C. V., Singh, A., Chin, C. F., y Lam, H. L. (2020). Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121220>
- Kuok, F., Mimoto, H., y Nakasaki, K. (2012). Effects of turning on the microbial consortia and the in situ temperature preferences of microorganisms in a laboratory-scale swine manure composting. *Bioresource Technology*, 116, 421-427. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.106>
- Lela, B., Barišić, M., y Nižetić, S. (2016). Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. *Waste Management*, 47, 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035>
- Liu, T., Awasthi, M. K., Awasthi, S. K., Duan, Y., y Zhang, Z. (2020). Effects of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) on food waste and sewage sludge composting. *Journal of Environmental Management*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109967>
- Manu, M. K., Kumar, R., y Garg, A. (2019). Decentralized composting of household wet biodegradable waste in plastic drums: Effect of waste turning, microbial inoculum and bulking agent on product quality. *Journal of Cleaner Production*, 226, 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.350>

- Mason, I. G., y Milke, M. W. (2005). Physical modelling of the composting environment: A review. Part 1: Reactor systems. *Waste Management*, 25(5), 481-500. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.015>
- Matkowski, P., Lisowski, A., y Świtochowski, A. (2020). Characterisation of Wheat Straw Pellets Individually and in Combination with Cassava Starch or Calcium Carbonate under Various Compaction Conditions: Determination of Pellet Strength and Water Absorption Capacity. *Materials*, 13(19), 4375. <https://doi.org/10.3390/ma13194375>
- Ozola, Z. U., Vesere, R., Kalnins, S. N., y Blumberga, D. (2019). Paper Waste Recycling. Circular Economy Aspects. *Environmental and Climate Technologies*, 23(3), 260-273. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0094>
- Ramírez, K. d. C. C., y Castro, K. d. C. (2019). *Evaluación y propuesta de mejoramiento del sistema de recolección de los residuos sólidos ordinarios de la Municipalidad de Paraíso* (Tesis doctoral). Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/7167>
- Richard, T. L. (1992). Municipal solid waste composting: Physical and biological processing. *Biomass and Bioenergy*, 3(3-4), 163-180. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(92\)90024-K](https://doi.org/10.1016/0961-9534(92)90024-K)
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., y Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69(26), 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Seng, B., Kristanti, R. A., Hadibarata, T., Hirayama, K., Katayama-Hirayama, K., y Kaneko, H. (2016). Mathematical model of organic substrate degradation in solid waste windrow composting. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 39(1), 81-94. <https://doi.org/10.1007/s00449-015-1492-6>
- Sepúlveda-Cisneros, O., Acevedo-Juárez, B., Saldaña-Durán, C. E., Castro, W., De-La-torre, M., y Avila-George, H. (2021). Development of an embedded system for a smart home composter system. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 2021(41), 112-128. <https://doi.org/10.17013/RISTI.41.112-129>
- Sheldon Ross. (2013). *First Course in Probability* (Pearson Education, Ed.; 9th, Vol. 1).

- Tatàno, F., Pagliaro, G., Di Giovanni, P., Floriani, E., y Mangani, F. (2015). Biowaste home composting: Experimental process monitoring and quality control. *Waste Management*, 38(1), 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.011>
- Vega, M. M. (2008). *Estudio de factibilidad economica para el funcionamiento de centros de acopio de desechos sólidos municipales a nivel cantonal previamente seleccionados en el sitio de generacion* (Tesis doctoral). Universidad de Costa Rica.
- Vinet, L., y Zhedanov, A. (2011). *A 'missing' family of classical orthogonal polynomials* (Tesis doctoral N.º 8). Universidad de Costa Rica. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Walling, E., Trémier, A., y Vaneekhaute, C. (2020). A review of mathematical models for composting. *Waste Management*, 113, 379-394. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.018>
- Xu, Z., Xu, W., Zhang, L., Ma, Y., Li, Y., Li, G., Nghiem, L. D., y Luo, W. (2021). Bacterial dynamics and functions driven by bulking agents to mitigate gaseous emissions in kitchen waste composting. *Bioresource technology*, 332(February), 125028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125028>
- Yang, F., Li, G. X., Yang, Q. Y., y Luo, W. H. (2013). Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*, 93(7), 1393-1399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.002>
- Zhang, L., y Sun, X. (2016). Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, 48, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.032>

## Apéndice A

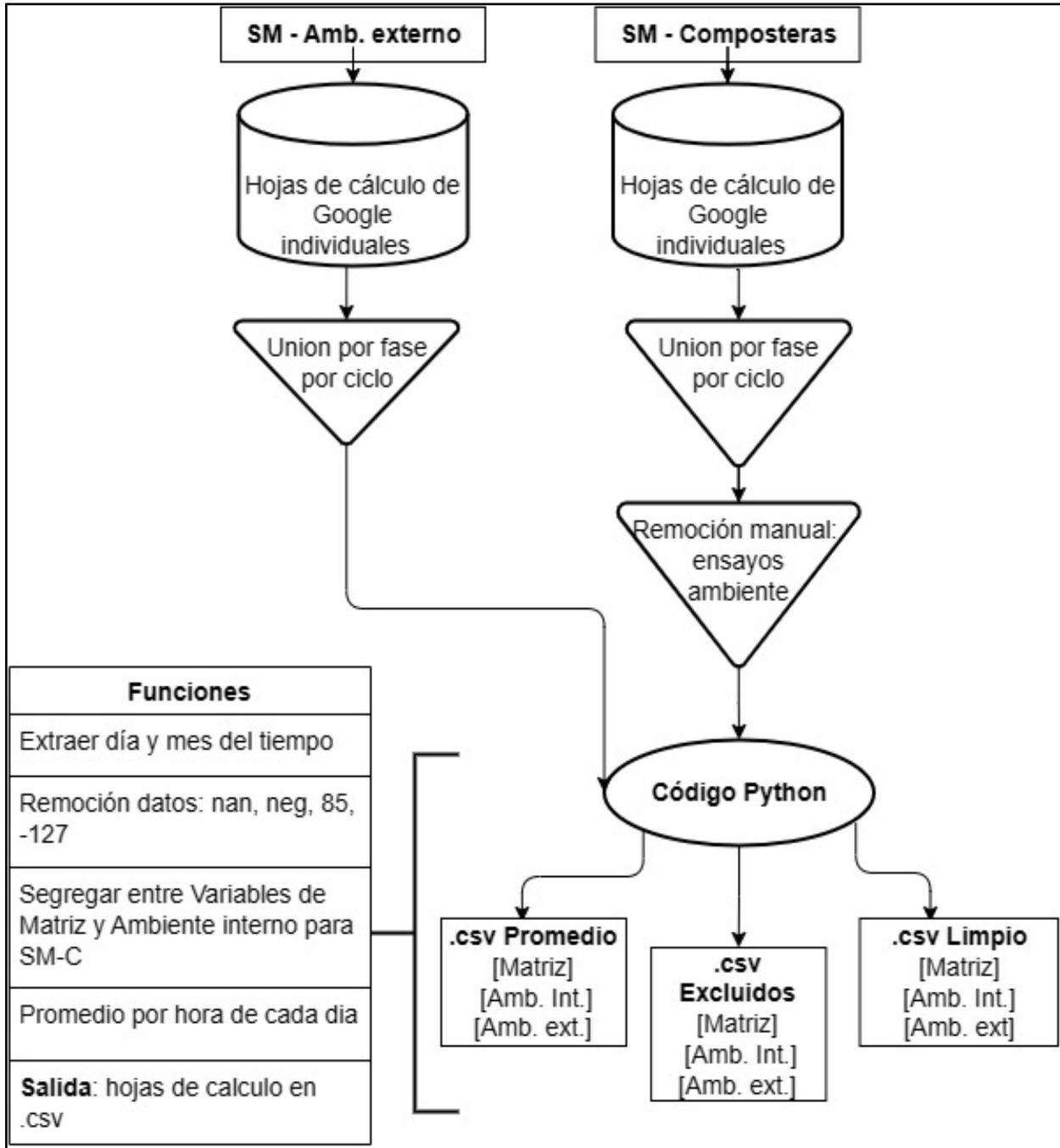
### Equipo de compostaje y pretratamiento



**Figura A1.** Diagrama de flujo para el recibo, pretratamiento y adición de los materiales en el proceso de compostaje.

## Apéndice B

### Diagrama de flujo del procesamiento de datos



**Figura B1.** Flujo de trabajo para el procesamiento de datos recolectados por los sistemas de monitoreo.

## Apéndice C

### Proporción teórica ideal para un proceso de compostaje óptimo.

- Paso 1: Calcular la masa de agua inicial en los residuos sólidos (RSB)
- Paso 2: Calcular la masa de agua deseada en el compost
- Paso 3: Calcular la masa de agua que necesita ser absorbida
- Paso 4: Calcular la masa de material secante necesario

$$M_{\text{agua inicial RSB}} = M_{\text{RSB}} \times \frac{H_{\text{inicial RSB}}}{100}$$
$$M_{\text{agua deseada}} = (M_{\text{RSB}} + M_{\text{MS}}) \times \frac{H_{\text{deseada}}}{100}$$
$$M_{\text{agua por absorber}} = M_{\text{agua inicial RSB}} - M_{\text{agua deseada}}$$
$$M_{\text{MS necesario}} = \frac{M_{\text{agua por absorber}}}{\text{Capacidad de absorción de MS}}$$

$M_{\text{RSB}}$ : Masa inicial de los residuos sólidos a compostar (kg)

$H_{\text{inicial RSB}}$ : Contenido de humedad inicial de los residuos sólidos a compostar (%)

$M_{\text{MS}}$ : Masa del material secante (kg)

$H_{\text{deseada}}$ : Contenido de humedad ideal para el proceso de compostaje (%)

**Capacidad de absorción de MS:** Capacidad de absorción de agua del material secante (g agua/g MS)<sup>1</sup>

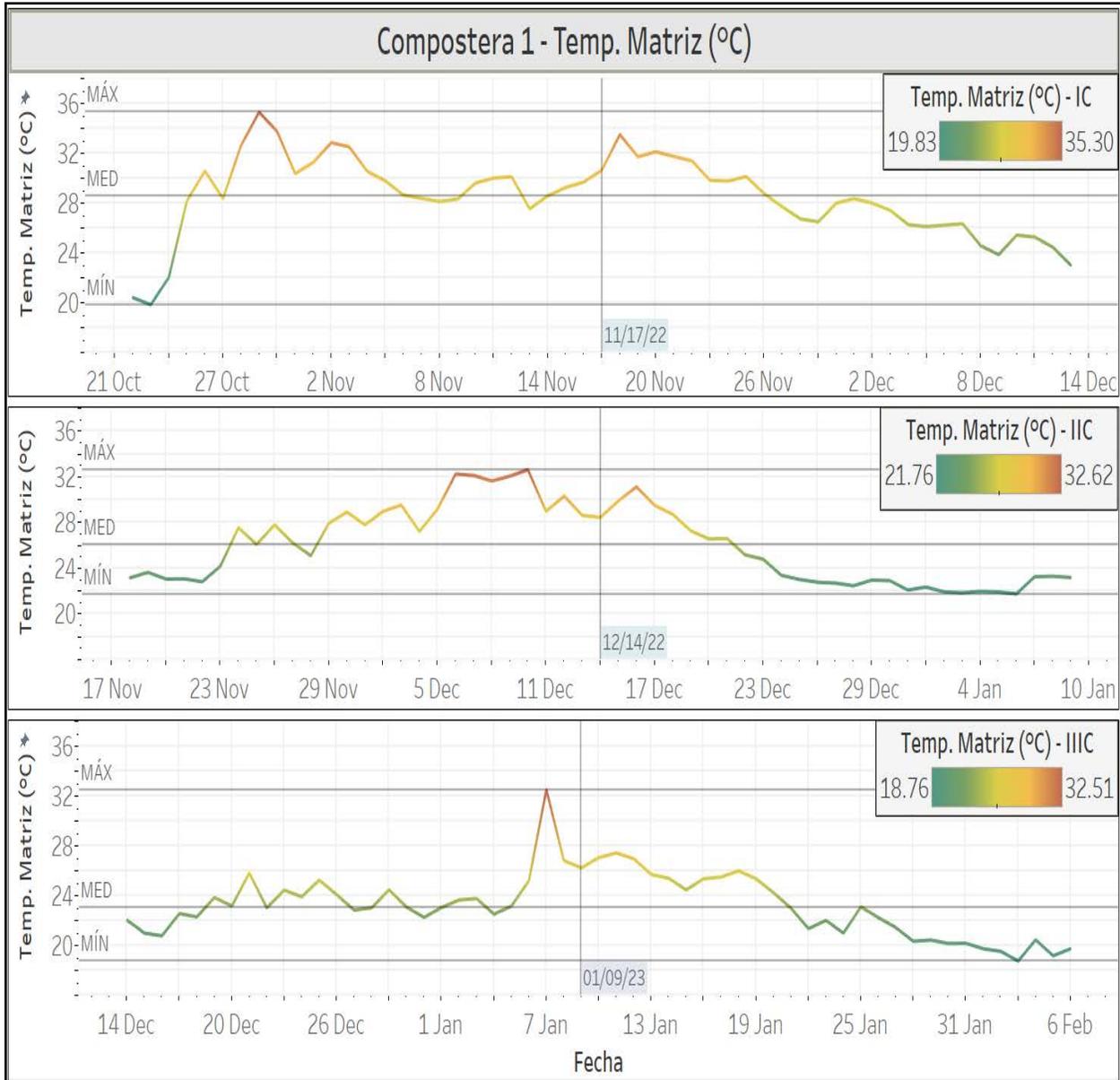
---

<sup>1</sup>Nota: Se considera despreciable el contenido de agua presente en el material secante para el desarrollo de las fórmulas utilizadas.

## Apéndice D

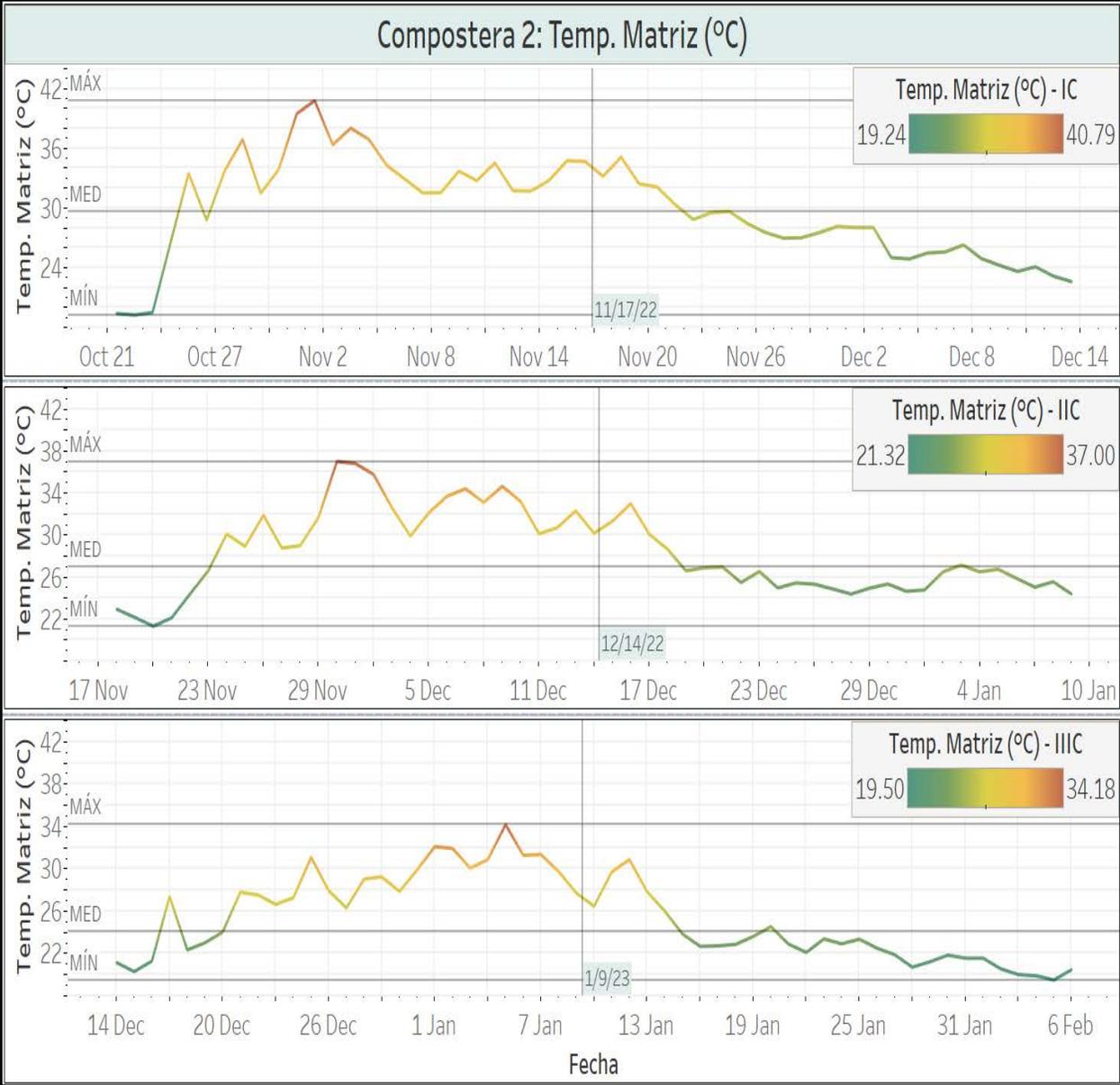
Gráficos descriptivos de la temperatura de matriz promediada por día para cada ciclo y compostera

### Compostera 1: Picado Fino + Pellet de madera



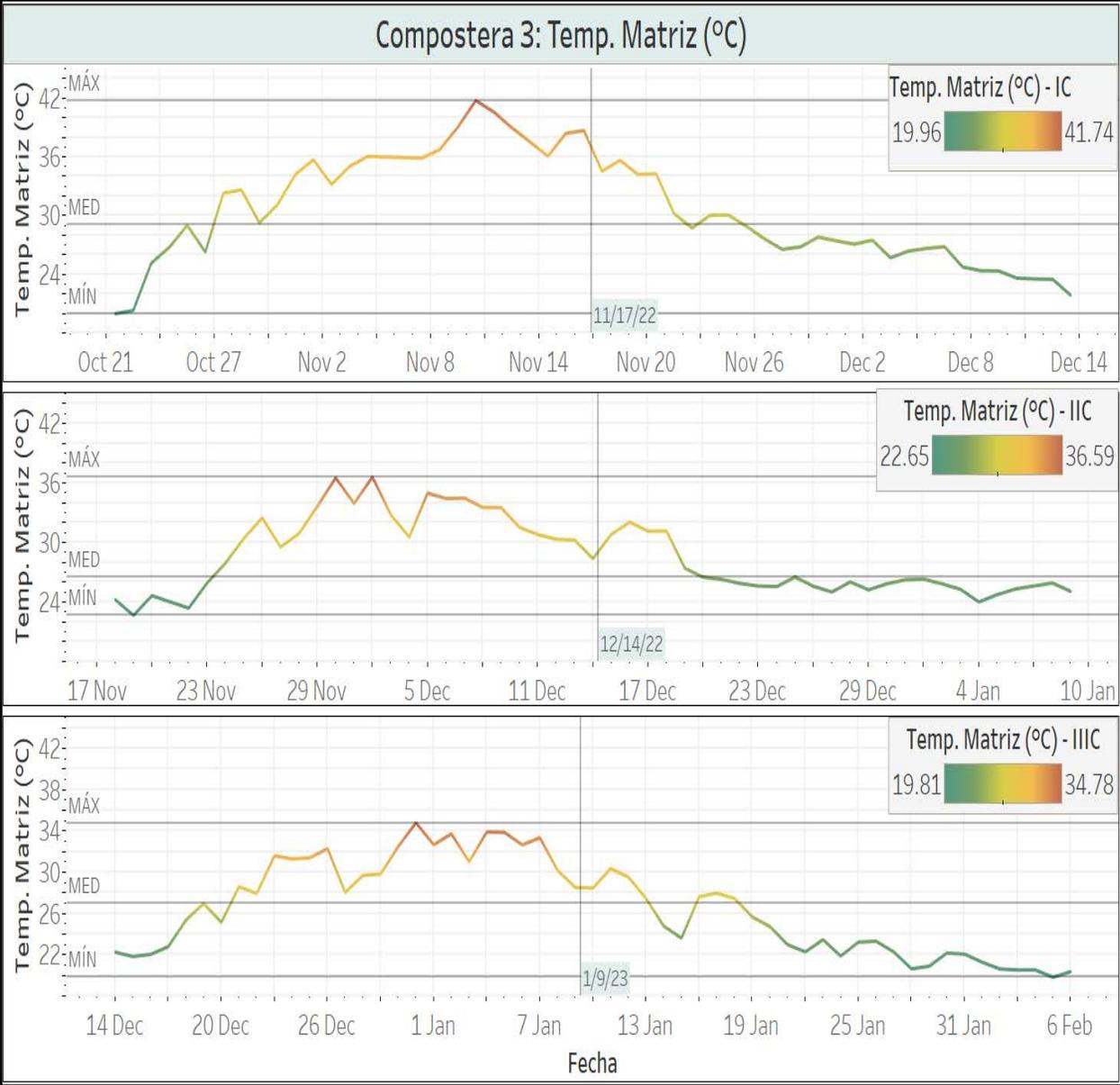
**Figura D1.** Temperatura de matriz promediada en C-1 durante los 3 ciclos de evaluación.

**Compostera 2: Picado Fino + Cartón para huevos**



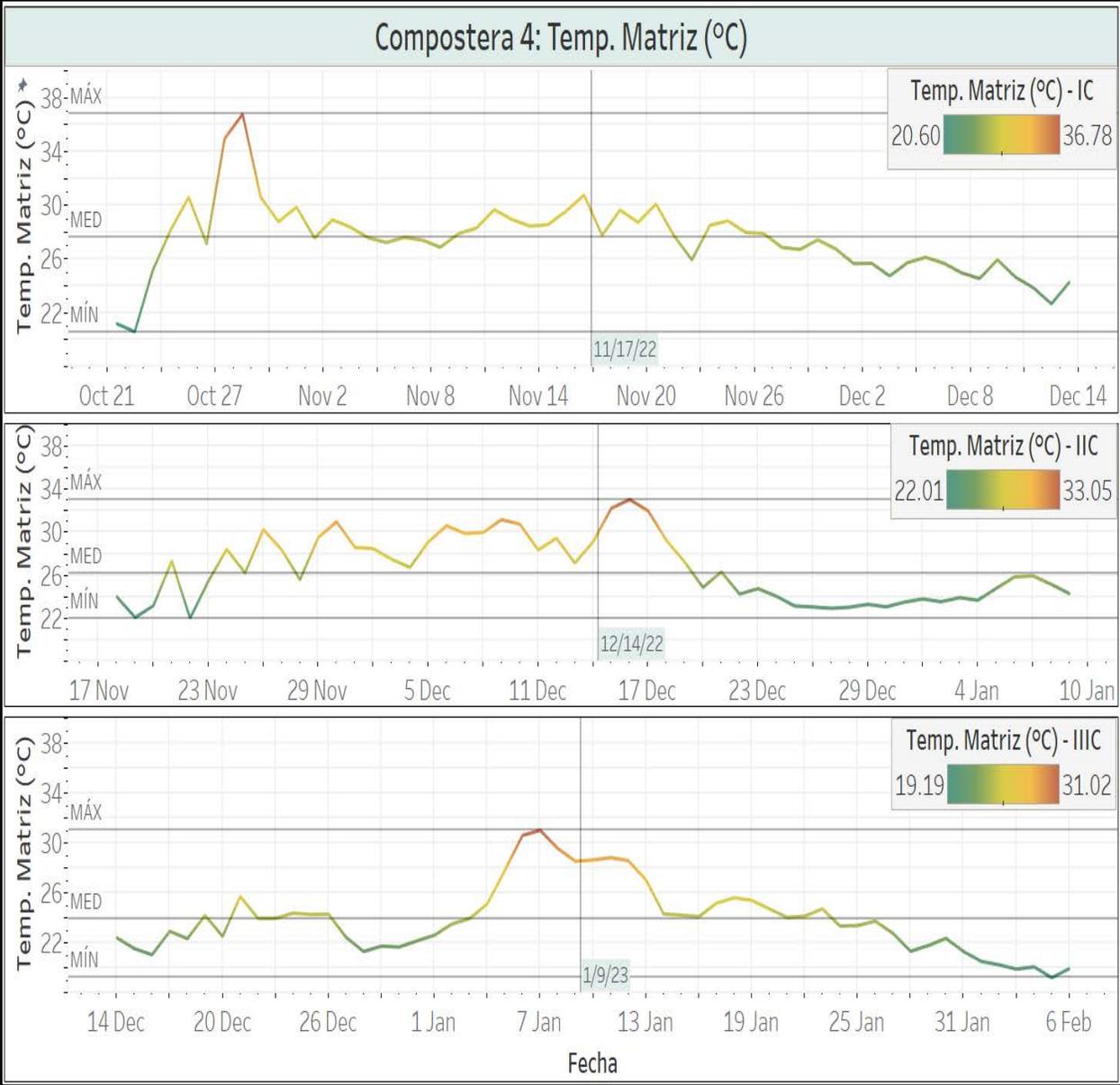
*Figura D2. Temperatura de matriz promediada en C-2 durante los 3 ciclos de evaluación.*

**Compostera 3: Picado Grueso + Cartón para huevos**



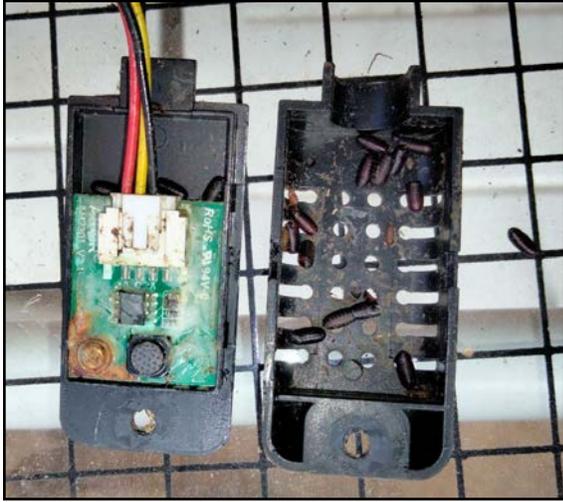
*Figura D3. Temperatura de matriz promediada en C-3 durante los 3 ciclos de evaluación.*

**Compostera 4: Picado Grueso + Pellet de madera**

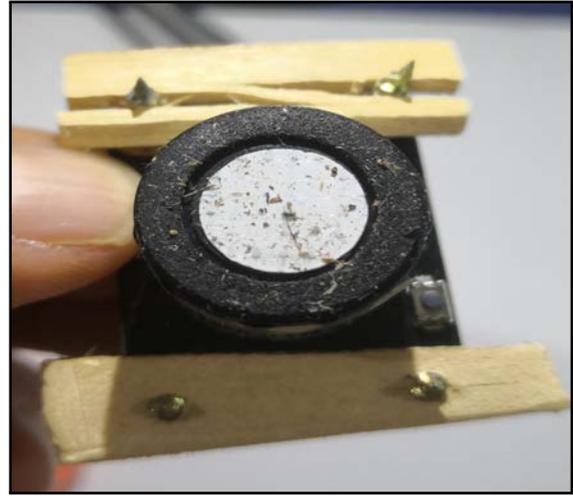


**Figura D4.** Temperatura de matriz promediada en C-4 durante los 3 ciclos de evaluación.

**Apéndice E**  
**Evaluación de la integridad de los sensores ambientales internos utilizados**



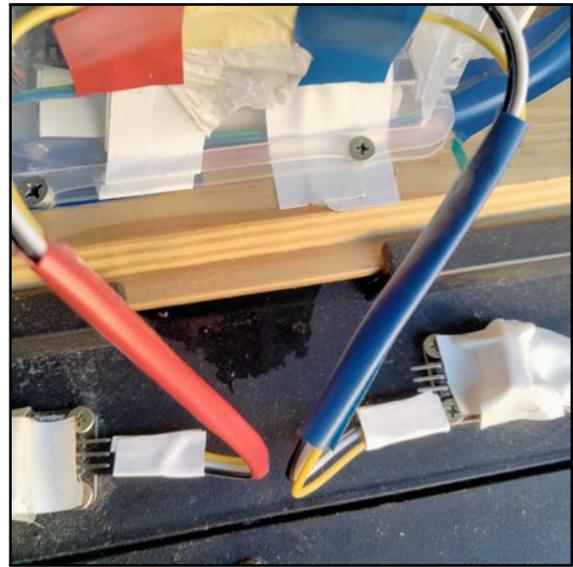
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura E1.** Descripción: (a) DHT21 en la C-4 al finalizar el 3er ciclo de compostaje, (b) Partículas adheridas al filtro del sensor DFrobot (c) Acumulación de agua alrededor del sensor DFrobot (d) Condensación excesiva alrededor de las aberturas del sistema de monitoreo con la compostera

## Apéndice F

### Resumen de los datos obtenidos para el análisis de correlación entre las variables de los sistemas de monitoreo.

**Tabla F1.** Correlación de Pearson entre la variable temperatura de matriz de compostaje con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa.

Compostera	I - Ciclo				II - Ciclo				III - Ciclo			
	T.amb. ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. ext.		H.R. ext	
	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p
C - 1	0.221	0.000	0.011	0.728	-0.114	0.000	0.112	0.000	0.083	0.004	0.154	0.000
C - 2	0.190	0.000	0.070	0.022	-0.106	0.000	0.112	0.000	0.068	0.023	0.090	0.003
C - 3	0.163	0.000	0.198	0.000	-0.082	0.006	0.110	0.000	0.022	0.431	0.139	0.000
C - 4	0.155	0.000	0.083	0.005	-0.089	0.002	0.157	0.000	0.008	0.774	0.126	0.000

**Tabla F2.** Correlación de Pearson entre la variable temperatura ambiental interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa.

Compostera	I - Ciclo				II - Ciclo				III - Ciclo			
	T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. ext.		H.R. ext	
	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p
C - 1	0.860	0.000	-0.480	0.000	0.889	0.000	-0.471	0.000	0.831	0.000	-0.476	0.000
C - 2	0.871	0.000	-0.491	0.000	0.838	0.000	-0.477	0.000	0.862	0.000	-0.468	0.000
C - 3	0.715	0.000	-0.465	0.000	0.757	0.000	-0.513	0.000	0.855	0.000	-0.511	0.000
C - 4	0.933	0.000	-0.675	0.000	0.832	0.000	-0.414	0.000	0.880	0.000	-0.683	0.000

**Tabla F3.** Correlación de Pearson entre la variable humedad relativa interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa.

Compostera	I - Ciclo				II - Ciclo				III - Ciclo			
	T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext	
	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p
C - 1	-0.101	0.002	-0.077	0.017	-0.160	0.000	0.030	0.337	-0.055	0.176	0.042	0.305
C - 2	-0.034	0.351	0.077	0.033	-0.177	0.000	0.125	0.000	-0.049	0.132	0.090	0.006
C - 3	-0.129	0.000	0.180	0.000	-0.284	0.000	0.352	0.000	-0.120	0.000	0.229	0.000
C - 4	-0.016	0.709	0.154	0.000	-0.324	0.000	0.288	0.000	-0.206	0.209	0.169	0.305

**Tabla F4.** Correlación de Pearson entre la variable concentración de oxígeno ambiental interna con la temperatura ambiental externa y la humedad relativa externa.

Compostera	I - Ciclo				II - Ciclo				III - Ciclo			
	T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext		T.amb. Ext.		H.R. ext	
	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p	$\rho$	p
C - 1	0.133	0.000	-0.058	0.070	0.354	0.000	-0.264	0.000	0.068	0.096	-0.211	0.000
C - 2	0.185	0.000	-0.122	0.001	0.444	0.000	-0.232	0.000	0.285	0.000	-0.198	0.000
C - 3	0.022	0.514	-0.099	0.004	0.475	0.000	-0.314	0.000	0.311	0.000	-0.325	0.000
C - 4	0.255	0.000	-0.100	0.018	0.387	0.000	-0.269	0.000	0.538	0.000	-0.205	0.209

**Apéndice G**  
**Reporte de ensayos del Centro de Investigaciones Agronómicas**

**Análisis de abonos orgánicos: sólido químico completo (C, N, C/N, P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Mn, B, S, %H,pH+CE))**

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA		CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES <b>REPORTE DE ENSAYOS</b> RE-R01 (V3)						CIA Centro de Investigaciones Agronómicas				
<b>N° DE REPORTE:</b>	<b>83610</b>	<b>ANÁLISIS:</b>					QC,CN					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:					19/10/2022					
CANTÓN:	GOICOCHEA	EMISIÓN DE REPORTE:					28/10/2022					
LOCALIDAD:	GUADALUPE	N° DE MUESTRAS TOTAL:					1					
CULTIVO:	SIN CULTIVO	PÁGINA:					1/2					
ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS												
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
SOL: RESIDUOS COMPOSTERA ZETILLAL BARRIO ESCALANTE	AO-22-00632	1.72	0.24	1.10	0.13	2.36	0.17	1047	15	32	29	12
ID USUARIO	IDLAB	%	H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	Relación						
		HUM	pH	CE	C	C/N						
SOL: RESIDUOS COMPOSTERA ZETILLAL BARRIO ESCALANTE	AO-22-00632	84	5.4	19.0	42.77	24.8						
-----ÚLTIMA LÍNEA-----												
<b>N° DE REPORTE:</b>	<b>84124</b>	<b>ANÁLISIS:</b>					QC,CN					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:					21/11/2022					
CANTÓN:	GOICOCHEA	EMISIÓN DE REPORTE:					09/12/2022					
LOCALIDAD:	GUADALUPE	N° DE MUESTRAS TOTAL:					1					
CULTIVO:	SIN CULTIVO	PÁGINA:					1/2					
ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS												
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
SOL: RESIDUOS COMPOSTERA ZETILLAL BARRIO ESCALANTE	AO-22-00712	1.29	0.18	0.80	0.10	1.80	0.12	560	11	78	20	12
ID USUARIO	IDLAB	%	H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	Relación						
		HUM	pH	CE	C	C/N						
SOL: RESIDUOS COMPOSTERA ZETILLAL BARRIO ESCALANTE	AO-22-00712	77	4.2	16.4	44.67	34.6						
-----ÚLTIMA LÍNEA-----												
<b>N° DE REPORTE:</b>	<b>84359</b>	<b>ANÁLISIS:</b>					QC,CN					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:					03/01/2023					
CANTÓN:	GOICOCHEA	EMISIÓN DE REPORTE:					13/01/2023					
LOCALIDAD:	GUADALUPE	N° DE MUESTRAS TOTAL:					1					
CULTIVO:	ABONO SOLIDO	PÁGINA:					1/2					
ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS												
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
SOL: RESIDUOS DE COCINA	AO-23-00006	1.34	0.14	0.70	0.08	1.48	0.10	324	10	30	19	11
ID USUARIO	IDLAB	%	H <sub>2</sub> O	mS/cm	%	Relación						
		HUM	pH	CE	C	C/N						
SOL: RESIDUOS DE COCINA	AO-23-00006	77	4.5	16.3	46.39	34.7						
-----ÚLTIMA LÍNEA-----												
<small>Nota: - El % C y N totales se determinaron con el Autoanalizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien (R<sup>2</sup> ≥ 0,95) con el % de MD. Si quiere estimar el valor del % MD a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1,43. La CE fue determinada en una proporción de 10 g de material: 30 mL de agua, hasta alcanzar el punto de saturación de la pasta. Las lecturas se hicieron del extracto filtrado con succión.</small>												
<small>Observación: El porcentaje de humedad se determinó a 80°C</small>												

**Figura G1.** Resultados obtenidos mediante un análisis químico completo de abonos orgánicos en estado sólido para los RSB al inicio de cada ciclo de compostaje.

## Análisis de abonos orgánicos: Carbón Orgánico (CO), N total, C/N

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA		CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES		CIA Centro de Investigaciones Agronómicas	
<b>REPORTES DE ENSAYOS</b>					
<b>RE-R01 (V3)</b>					
<b>N° DE REPORTE: 84358</b>					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:	03/01/2023		
CANTÓN:	ESCAZÚ	EMISIÓN DE REPORTE:	16/01/2023		
LOCALIDAD	SAN ANTONIO	N° DE MUESTRAS TOTAL:	4		
CULTIVO:	ABONO SOLIDO	PÁGINA:	1/1		
<b>ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS</b>					
ID USUARIO	IDLAB	%		Relación	
		N	C	C/N	
SOL: COMPOSTERA 1	AO-23-00002	1.94	46.75	24.1	
SOL: COMPOSTERA 2	AO-23-00003	2.53	41.92	16.6	
SOL: COMPOSTERA 3	AO-23-00004	2.34	42.39	18.1	
SOL: COMPOSTERA 4	AO-23-00005	1.93	45.62	23.7	
-----ÚLTIMA LÍNEA-----					
<b>N° DE REPORTE: 84519</b>					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:	16/01/2023		
CANTÓN:	GOICOCHEA	EMISIÓN DE REPORTE:	27/01/2023		
LOCALIDAD	GUADALUPE	N° DE MUESTRAS TOTAL:	4		
<b>ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS</b>					
ID USUARIO	IDLAB	%		Relación	
		N	C	C/N	
SOL: COMPOSTERA 1 (ABONO SOLIDO)	AO-23-00035	2.11	48.64	23.1	
SOL: COMPOSTERA 2 (SIN CULTIVO)	AO-23-00036	2.35	44.69	19.0	
SOL: COMPOSTERA 3 (SIN CULTIVO)	AO-23-00037	2.10	43.73	20.9	
SOL: COMPOSTERA 4 (SIN CULTIVO)	AO-23-00038	1.99	46.80	23.5	
-----ÚLTIMA LÍNEA-----					
<b>N° DE REPORTE: 84924</b>					
PROVINCIA:	SAN JOSÉ	FECHA RECEPCIÓN:	14/02/2023		
CANTÓN:	GOICOCHEA	EMISIÓN DE REPORTE:	24/02/2023		
LOCALIDAD	GUADALUPE	N° DE MUESTRAS TOTAL:	4		
<b>ANÁLISIS QUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS</b>					
ID USUARIO	IDLAB	%		Relación	
		N	C	C/N	
SOL: COMPOSTERA 1 (ABONO SOLIDO)	AO-23-00091	2.49	49.69	20.0	
SOL: COMPOSTERA 2 (SIN CULTIVO)	AO-23-00092	2.15	44.75	20.8	
SOL: COMPOSTERA 3 (SIN CULTIVO)	AO-23-00093	2.23	44.12	19.7	
SOL: COMPOSTERA 4 (SIN CULTIVO)	AO-23-00094	2.15	47.91	22.3	
-----ÚLTIMA LÍNEA-----					
Nota: - El % C y N totales se determinaron con el Autoanalizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien (R2 ≥ 0,95) con el % de MO. Si quiere estimar el valor del % MO a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1,43.					

**Figura G2.** Resultados obtenidos del análisis de la relación CN del compost producido al finalizar cada ciclo de compostaje para los 4 tratamientos.

## Apéndice H Códigos generados en el estudio

### Implementación del método de actualización OTA (Over-The-Air)

```
1 #ifndef ESP32
2 #include <WiFi.h>
3 #include <ESPmDNS.h>
4 #else
5 #include <ESP8266WiFi.h>
6 #include <ESP8266mDNS.h>
7 #endif
8 #include <WiFiUdp.h>
9 #include <ArduinoOTA.h>
10
11 #if defined(ESP32_RTOS) && defined(ESP32)
12 void ota_handle( void * parameter ) {
13     for (;;) {
14         ArduinoOTA.handle();
15         delay(3500);
16     }
17 }
18 #endif
19
20 void setupOTA(const char* nameprefix, const char* ssidOTA, const char*
    passwordOTA) {
21     uint16_t maxlen = strlen(nameprefix) + 7;
22     char *fullhostname = new char[maxlen];
23     uint8_t mac[6];
24     WiFi.macAddress(mac);
25     snprintf(fullhostname, maxlen, "%s-%02x%02x%02x", nameprefix, mac[3],
        mac[4], mac[5]);
26     ArduinoOTA.setHostname(fullhostname);
27     delete[] fullhostname;
28
29     // Configure and start the WiFi station
30     WiFi.mode(WIFI_STA);
31     WiFi.begin(ssidOTA, passwordOTA);
32
33     while (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED) {
34         Serial.println("Connection_Failed!_Rebooting...");
35         delay(5000);
36         ESP.restart();
37     }
38     ArduinoOTA.onStart([]() {
39         String type;
40         if (ArduinoOTA.getCommand() == U_FLASH)
41             type = "sketch";
```

```

42     else // U_SPIFFS
43         type = "filesystem";
44         Serial.println("Start updating_" + type);
45     });
46     ArduinoOTA.onEnd([]() {
47         Serial.println("\nEnd");
48     });
49     ArduinoOTA.onProgress([](unsigned int progress, unsigned int total) {
50         Serial.printf("Progress:_%u%%\r", (progress / (total / 100)));
51     });
52     ArduinoOTA.onError([](ota_error_t error) {
53         Serial.printf("Error[%u]:_", error);
54         if (error == OTA_AUTH_ERROR) Serial.println("\nAuth Failed");
55         else if (error == OTA_BEGIN_ERROR) Serial.println("\nBegin Failed");
56         ;
57         else if (error == OTA_CONNECT_ERROR) Serial.println("\nConnect
58         Failed");
59         else if (error == OTA_RECEIVE_ERROR) Serial.println("\nReceive
60         Failed");
61         else if (error == OTA_END_ERROR) Serial.println("\nEnd Failed");
62     });
63     ArduinoOTA.begin();
64     Serial.println("OTA Initialized");
65     Serial.print("IP address:");
66     Serial.println(WiFi.localIP());
67 #if defined(ESP32_RTOS) && defined(ESP32)
68     xTaskCreate(
69         ota_handle,          /* Task function. */
70         "OTA_HANDLE",      /* String with name of task. */
71         10000,             /* Stack size in bytes. */
72         NULL,              /* Parameter passed as input of the task */
73         1,                 /* Priority of the task. */
74         NULL);            /* Task handle. */
75 #endif
76 }

```

## Calibración de los sensores

```

1 #include <TFT_eSPI.h>
2 #include <WiFi.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <Adafruit_BME280.h>
5 #include <DHT.h>
6 #include <DHT_U.h>
7 #include "OTA.h"
8 #include "credenciales.h"
9 #include <time.h>
10 #include <OneWire.h>

```

```

11 #include <DallasTemperature.h>
12 #define DS18B20_PIN 26
13 OneWire oneWire(DS18B20_PIN);
14 DallasTemperature ds18b20(&oneWire);
15 float temp_ds18b20;
16
17 const char* server = "maker.ifttt.com";
18 const char* resource = "/trigger/bme280_readings/with/key/...";
19
20 float temp, hum;
21 int sample_counter = 0;
22 Adafruit_BME280 bme;
23 TFT_eSPI tft = TFT_eSPI(135, 240);
24 #define DHTPIN 25
25 #define DHTTYPE DHT21
26 DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);
27 float temp_dht21, hum_dht21;
28
29 TaskHandle_t SensorTask;
30 void readAndDisplayDS18B20() {
31     ds18b20.requestTemperatures();
32     temp_ds18b20 = ds18b20.getTempCByIndex(0);
33     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
34     tft.setTextSize(2);
35     tft.setTextColor(TFT_WHITE);
36
37     tft.drawString("Temp. DS18B20: " + String(temp_ds18b20, 2) + "°C",
38         tft.width() / 2, 30);
39 }
40 void readAndDisplayBME280() {
41     bme.takeForcedMeasurement();
42     temp = bme.readTemperature();
43     hum = bme.readHumidity();
44     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
45     tft.setTextSize(2);
46     tft.setTextColor(TFT_GREEN);
47     tft.drawString("Temp. BME: " + String(temp, 2) + "°C", tft.width() /
48         2, 30);
49     tft.setTextColor(TFT_YELLOW);
50     tft.drawString("Hum. BME: " + String(hum, 2) + "%", tft.width() /
51         2, 60);
52 }
53 void readAndDisplayDHT21() {
54     sensors_event_t event;
55     dht.temperature().getEvent(&event);
56     temp_dht21 = event.temperature;
57     dht.humidity().getEvent(&event);

```

```

55  hum_dht21 = event.relative_humidity;
56  tft.fillScreen(TFT_BLACK);
57  tft.setTextSize(2);
58  tft.setTextColor(TFT_MAGENTA);
59  tft.drawString("Temp. DHT:" + String(temp_dht21, 2) + "C", tft.
    width() / 2, 30);
60  tft.setTextColor(TFT_BLUE);
61  tft.drawString("Hum. DHT:" + String(hum_dht21, 2) + "%", tft.
    width() / 2, 60);
62  }
63  void sendDataToIFTTT() {
64    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
65      initWifi();
66    }
67    makeIFTTTRequest();
68  }
69  void readSensor(void *pvParameters) {
70    int currentSensor = 0; // Variable to alternate between displaying
    BME280 and DHT21 data
71    int displayCounter = 0; // Variable to track the number of display
    updates before taking new readings
72    unsigned long lastIFTTTMillis = 0; // Variable to store the last time
    data was sent to IFTTT
73    ds18b20.setResolution(11);
74    while (1) {
75      if (displayCounter % 30 == 0) { // Take new sensor readings every
        60 seconds (6 iterations of 10 seconds)
76        sample_counter++;
77        readAndDisplayBME280();
78        readAndDisplayDHT21();
79      }
80      if (millis() - lastIFTTTMillis > 300001) { // Send data to IFTTT
        every 60 seconds
81        sendDataToIFTTT();
82        lastIFTTTMillis = millis(); // Update the last time data was sent
        to IFTTT
83      }
84      if (currentSensor == 0) {
85        readAndDisplayBME280();
86        currentSensor = 1;
87      } else if (currentSensor == 1) {
88        readAndDisplayDHT21();
89        currentSensor = 2;
90      } else {
91        readAndDisplayDS18B20();
92        currentSensor = 0;
93      }

```

```

94     tft.setTextColor(TFT_CYAN);
95     tft.drawString("Muestra_" + String(sample_counter), tft.width() /
96         2, 100);
97     tft.drawString(">>CALIBRA<<", tft.width() / 2, 140);
98     displayCounter++;
99     vTaskDelay(10002 / portTICK_PERIOD_MS); // Delay for 10 seconds
100         (10000 ms)
101     }
102 }
103
104 void initWifi() {
105     Serial.print("Connecting to:");
106     Serial.print(ssidOTA);
107     WiFi.begin(ssidOTA, passwordOTA);
108     int timeout = 10 * 4; // 10 seconds
109     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && (timeout-- > 0)) {
110         delay(250);
111         Serial.print(".");
112     }
113     Serial.println("");
114
115     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
116         Serial.println("Failed to connect, going back to sleep");
117     }
118
119     Serial.print("WiFi connected in:");
120     Serial.print(millis());
121     Serial.print(", IP address:");
122     Serial.println(WiFi.localIP());
123 }
124
125 void makeIFTTRequest() {
126     Serial.print("Connecting to");
127     Serial.print(server);
128
129     WiFiClient client;
130     int retries = 5;
131     while (!client.connect(server, 80) && (retries-- > 0)) {
132         Serial.print(".");
133     }
134     Serial.println();
135     if (!client.connected()) {
136         Serial.println("Failed to connect...");
137     }
138     Serial.print("Request resource:");
139     Serial.println(resource);
140     String jsonObject = "{\"value1\":\"" + String(temp) + "|||" + String(

```

```

    hum) + "|||" + String(temp_dht21) + "|||" + String(hum_dht21) + "
    |||" + String(temp_ds18b20) + "|||" + String(sample_counter) + "
    \}";
139
140 Serial.println("Se tomaron datos y se van a enviar");
141 Serial.println("Temp_" + String(temp));
142 Serial.println("hum_" + String(hum));
143 Serial.println("Muestra_" + String(sample_counter));
144
145 client.println(String("POST_" + resource + "_HTTP/1.1");
146 client.println(String("Host:" + server);
147 client.println("Connection:close\r\nContent-Type:application/json")
    ;
148 client.print("Content-Length:");
149 client.println(jsonObject.length());
150 client.println();
151 client.println(jsonObject);
152
153 int timeout = 5 * 10; // 5 seconds
154 while (!client.available() && (timeout-- > 0)) {
155     delay(100);
156 }
157 if (!client.available()) {
158     Serial.println("No response...");
159 }
160 while (client.available()) {
161     Serial.write(client.read());
162 }
163 Serial.println("\nclosing connection");
164 client.stop();
165 }
166
167 void setup() {
168     delay(50);
169     Serial.begin(115200);
170     ///////INICIALIZAR OTA/////
171     Serial.println("Booting OTA");
172     setupOTA("OTA_Cali_Test", ssidOTA, passwordOTA);
173     dht.begin();
174     ds18b20.begin();
175     ds18b20.setWaitForConversion(false);
176
177     // BME280 setup
178     bme.begin();
179     bme.setSampling(Adafruit_BME280::MODE_FORCED,
180                    Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // temperature
181                    Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // pressure

```

```

182         Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // humidity
183         Adafruit_BME280::FILTER_OFF);
184
185     // TFT display setup
186     tft.init();
187     tft.setRotation(1);
188     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
189     tft.setTextDatum(MC_DATUM);
190     tft.setTextSize(1);
191
192     configTime(-5 * 3600, 0, "pool.ntp.org");
193     // Create tasks
194     xTaskCreatePinnedToCore(readSensor, "Read_Sensor", 10000, NULL, 1, &
        SensorTask, 0);
195 }
196 void loop() {}

```

## Sistema de Monitoreo de Ambiente externo.

```

1 #define ESP32_RTOS
2 #include <TFT_eSPI.h>
3 #include <WiFi.h>
4 #include <FS.h>
5 #include "SPIFFS.h"
6 #include <Wire.h>
7 #include <Adafruit_Sensor.h>
8 #include <Adafruit_BME280.h>
9 #include "OTA.h"
10 #include "credenciales.h"
11
12 const char* server = "maker.ifttt.com";
13 const char* resource = "/trigger/bme280_readings/with/key/...";
14
15 float temp, hum, sample;
16 int sample_counter = 0;
17 long prevMilli = 0;
18 long intervalo = 300000;
19 int sample_counterW = 0;
20 long prevMilli1 = 0;
21 long intervalo1 = 5000;
22
23 Adafruit_BME280 bme;
24 TFT_eSPI tft = TFT_eSPI(135, 240);
25
26 void renderDisplay(float temp, float hum, int samp) {
27     Serial.println("<_Render_display_>");
28     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
29     tft.setTextColor(TFT_GREEN);

```

```

30  tft.drawString("Temp.▯Amb:▯" + String(temp, 2) + "▯C", tft.width() /
    2, tft.height() / 2 - 36);
31  tft.setTextColor(TFT_YELLOW);
32  tft.drawString("Hum.▯Rel.:▯" + String(hum, 2) + "▯%", tft.width() /
    2 + 20, tft.height() / 2 - 9);
33  tft.setTextColor(TFT_CYAN);
34  tft.drawString("Muestra▯" + String(sample_counter), tft.width() / 2,
    tft.height() / 2 + 25);
35  tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
36  tft.drawString("▯>>>>▯AMBIENTE▯<<<<▯", tft.width() / 2, tft.height()
    / 2 + 51);
37  Serial.println("<▯Render▯▯FIN>");
38  }
39
40  void renderDisplayWarm(float temp, float hum, int samp) {
41  Serial.println("<▯Render▯display▯Warm▯Up▯>");
42  tft.fillScreen(TFT_ORANGE);
43  tft.setTextColor(TFT_BLUE);
44  tft.drawString("Temp.▯Amb:▯" + String(temp, 2) + "▯C", tft.width() /
    2, tft.height() / 2 - 36);
45  tft.setTextColor(TFT_RED);
46  tft.drawString("Hum.▯Rel.:▯" + String(hum, 2) + "▯%", tft.width() /
    2 + 20, tft.height() / 2 - 9);
47  tft.setTextColor(TFT_YELLOW);
48  tft.drawString("Test▯" + String(sample_counterW), tft.width() / 2,
    tft.height() / 2 + 25);
49  tft.setTextColor(TFT_BLACK);
50  tft.drawString("▯>>>>▯Warm▯-▯UP▯<<<<▯", tft.width() / 2, tft.height()
    / 2 + 51);
51  Serial.println("<▯Render▯Warm▯Up▯▯FIN>");
52  }
53
54  void initWifi() {
55  Serial.print("Connecting▯to:▯");
56  Serial.print(ssidOTA);
57  WiFi.begin(ssidOTA, passwordOTA);
58  int timeout = 10 * 4; // 10 seconds
59  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && (timeout-- > 0)) {
60  delay(250);
61  Serial.print(".");
62  }
63  Serial.println("");
64
65  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
66  Serial.println("Failed▯to▯connect,▯going▯back▯to▯sleep");
67  }
68  Serial.print("WiFi▯connected▯in:▯");

```

```

69     Serial.print(millis());
70     Serial.print(",_IP_address:_");
71     Serial.println(WiFi.localIP());
72 }
73
74 void heat_sensor() {
75
76     unsigned long currentMillis1 = millis();
77     if (currentMillis1 - prevMilli1 > intervalo1) {
78
79         Serial.println("Entrando_a_mediciones_Warm_");
80         prevMilli1 = currentMillis1;
81
82         temp = bme.readTemperature();
83         hum = bme.readHumidity();
84
85         Serial.println("Rendering_display_Warm-Up");
86         renderDisplayWarm(temp, hum, sample_counterW);
87         sample_counterW++;
88     }
89 }
90
91 void makeIFTTTRequest() {
92     Serial.print("Connecting_to_");
93     Serial.print(server);
94     WiFiClient client;
95     int retries = 5;
96     while (!client.connect(server, 80) && (retries-- > 0)) {
97         Serial.print(".");
98     }
99     Serial.println();
100    if (!client.connected()) {
101        Serial.println("Failed_to_connect...");
102    }
103    Serial.print("Request_resource:_");
104    Serial.println(resource);
105    temp = bme.readTemperature();
106    hum = bme.readHumidity();
107
108    String jsonObject = String("{\"value1\":" + temp + "|||" + hum + "
    |||" + sample_counter + "\"}");
109
110    Serial.println("Se_tomaron_datos_y_se_van_a_enviar");
111    Serial.println("Temp_" + String(temp));
112    Serial.println("hum_" + String(hum));
113    Serial.println("Muestra_" + String(sample_counter));
114    client.println(String("POST_") + resource + "_HTTP/1.1");

```

```

115     client.println(String("Host: ") + server);
116     client.println("Connection: close\r\nContent-Type: application/json")
        ;
117     client.print("Content-Length: ");
118     client.println(jsonObject.length());
119     client.println();
120     client.println(jsonObject);
121     int timeout = 5 * 10; // 5 seconds
122     while (!!!client.available() && (timeout-- > 0)) {
123         delay(100);
124     }
125     if (!!!client.available()) {
126         Serial.println("No response...");
127     }
128     while (client.available()) {
129         Serial.write(client.read());
130     }
131     Serial.println("\nclosing connection");
132     client.stop();
133
134     Serial.println("Rendering display");
135     renderDisplay(temp, hum, sample_counter);
136     sample_counter++;
137 }
138
139 void setup() {
140     Serial.begin(115200);
141
142     Serial.println("<OTA Inicio>");
143     setupOTA("OTA_Ambiente", ssidOTA, passwordOTA);
144     Serial.println("<OTA inicializado>");
145     unsigned status;
146     status = bme.begin();
147     bme.setSampling(Adafruit_BME280::MODE_FORCED,
148                    Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // temperature
149                    Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // pressure
150                    Adafruit_BME280::SAMPLING_X4, // humidity
151                    Adafruit_BME280::FILTER_OFF);
152
153     Serial.println("<FIN BME setup>");
154     Serial.println("<Inicializa Pantalla>");
155     tft.init();
156     tft.setRotation(1);
157     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
158     tft.setTextDatum(MC_DATUM);
159     tft.setTextSize(2);
160     tft.setCursor(0, 0);

```

```

161  tft.setTextColor(TFT_WHITE);
162  tft.drawString("TFG", tft.width() / 2, tft.height() / 2 - 40);
163  tft.setTextColor(TFT_GREEN);
164  tft.drawString("<>_MONITOREO_<>", tft.width() / 2, tft.height() / 2 -
    16);
165  tft.drawString("<>_AMBIENTE_<>", tft.width() / 2, tft.height() / 2 +
    8);
166  tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
167  tft.drawString("UCR_-EIB", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 34);
168  tft.setTextColor(TFT_WHITE);
169  tft.drawString("ENE_-2023", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 52);
170  delay(3000);
171  }
172  void loop() {
173    bme.takeForcedMeasurement();
174    unsigned long currentMillis = millis();
175
176    if (millis() < 60000) {
177      heat_sensor();
178    }
179    if (currentMillis - prevMilli > intervalo) {
180      prevMilli = currentMillis;
181      initWifi();
182      makeIFTTTRequest();
183    }
184  }

```

## Sistema de Monitoreo de las Composteras

```

1  #include <WiFi.h>
2  #include <FS.h>
3  #include "SPIFFS.h"
4  #include "DHT.h"
5  #include <TFT_eSPI.h>
6  #include <SPI.h>
7  #include <Wire.h>
8  #include <OneWire.h>
9  #include <DallasTemperature.h>
10 #include "DFRobot_OxygenSensor.h"
11 #include "OTA.h"
12 #include "credenciales.h"
13
14 const char* server = "maker.ifttt.com" ;
15 const char* resource = "/trigger/compost_readings/with/key/...";
16
17 #define Oxygen_AddressI 0x73
18 #define Oxygen_AddressII 0x72
19 #define OXYGEN_CONECTRATION 20.9

```

```

20 #define OXYGEN_MV          0
21 #define COLLECT_NUMBER  10
22 #define ONE_WIRE_BUS    32
23 #define TEMPERATURE_PRECISION 11
24
25 #define DHT_PINI 15
26 #define DHT_PINII 25
27 #define DHTTYPE DHT21
28
29 /// Para el modo volteo //
30 struct estado {
31     volatile bool volteo;
32     byte conteoE;
33     bool flagV;
34 };
35
36 estado compostera = {0, 0, 0};
37
38 struct boton {
39     const uint8_t botonVolteo;
40     uint32_t numberKeyPresses;
41     volatile bool pressed;
42 };
43 boton boton0 = {0, 0, 0};
44
45 void IRAM_ATTR ISR_Volteo() {
46     compostera.volteo = ! compostera.volteo;
47     boton0.numberKeyPresses++;
48 }
49
50 ///Variables P/ renderDisplay I y II.
51 unsigned long switchMillis = 0;
52 unsigned long interval = 29950;
53 byte count = 0;
54 boolean firstScreenFlag = false;
55 boolean secondScreenFlag = false;
56
57 int publish_period = 600000L;
58 int sample_counter = 0;
59 unsigned long prevMilli = 0;
60
61 int sample_counterW = 0;
62 unsigned long prevMilli1 = 0;
63 unsigned long interval01 = 8000;
64
65 const uint8_t sensorI[8] = { 0x28, 0x29, 0x89, 0x28, 0x5D, 0x20, 0x01,
    0x9E };

```

```

66  const uint8_t sensorII[8] = { 0x28, 0x6B, 0x41, 0xE2, 0x5D, 0x20, 0x01,
    0xBB};
67
68  float sensor_temperature , sensor_humidity;
69  float sensor_temperatureII, sensor_humidityII;    //sensor DHT II .
70  float tempMatrizI, tempMatrizII;                //sensors DS18B20 .
71  float oxygenDataI, oxygenDataII;                //sensors DFrobot 02
72
73  float * ptrOxyI = &oxygenDataI;
74  float * ptrOxyII = &oxygenDataII;
75  float * ptrTempA = &sensor_temperature;
76  float * ptrTempAII = &sensor_temperatureII;
77  float * ptrHumI = &sensor_humidity;
78  float * ptrHumII = &sensor_humidityII;
79  float * ptrTempM = &tempMatrizI;
80  float * ptrTempMII = &tempMatrizII;
81  int * ptrSample = &sample_counter;
82
83  //Library objects
84  DHT dht(DHT_PINI, DHTTYPE);
85  DHT dhtII(DHT_PINII, DHTTYPE);
86  TFT_eSPI tft = TFT_eSPI(135, 240);
87  OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
88  DallasTemperature sensors(&oneWire);
89  DFRobot_OxygenSensor oxygenI;
90  DFRobot_OxygenSensor oxygenII;
91  ///////////////////////////////////FUNCIONES/////////////////////////////////
92  void initWifi() {
93      Serial.print("Connecting to:");
94      Serial.print(ssidOTA);
95      WiFi.begin(ssidOTA, passwordOTA);
96
97      int timeout = 10 * 4; // 10 seconds
98      while (WiFi.status() != WL_CONNECTED  && (timeout-- > 0)) {
99          delay(250);
100         Serial.print(".");
101     }
102     Serial.println("");
103
104     if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
105         Serial.println("Failed to connect, going back to sleep");
106     }
107     Serial.print("WiFi connected in:");
108     Serial.print(millis());
109     Serial.print(", IP address:");
110     Serial.println(WiFi.localIP());
111 }

```

```

112
113 void renderDisplayIw(float temp, float hum, float tempm, float oxy, int
      sample) { //
114     Serial.println("<Mostrando_datos_camara_I-WARM_UP>");
115     tft.fillScreen(TFT_ORANGE);
116     tft.setTextColor(TFT_MAROON);
117     tft.drawString("Temp. Amb: " + String(temp, 1) + " C", tft.width() /
          2 - 30, tft.height() / 2 - 50);
118     tft.drawString("Hum. Amb: " + String(hum, 1) + "%", tft.width() / 2
          - 30, tft.height() / 2 - 30);
119     tft.drawString("Oxigeno: " + String(oxy) + "%", tft.width() / 2 -
          20, tft.height() / 2 + 8);
120     tft.drawString("Temp. Mat: " + String(tempm) + " C", tft.width() / 2
          - 30, tft.height() / 2 - 12);
121     tft.drawString("Muestra " + String(sample), tft.width() / 2, tft.
          height() / 2 + 30);
122     tft.setTextColor(TFT_BLACK);
123     tft.drawString(">>>> Camara I <<<<<", tft.width() / 2, tft.height() /
          2 + 52);
124 }
125
126 void renderDisplayIIw(float tempII, float humII, float tempmII, float
      oxyII, int sample) {
127     Serial.println("<Mostrando_datos_camara_II-WARM_UP>");
128     tft.fillScreen(TFT_ORANGE);
129     tft.setTextColor(TFT_MAROON);
130     tft.drawString("Temp. Amb: " + String(tempII, 1) + " C", tft.width()
          / 2 - 30, tft.height() / 2 - 50);
131     tft.drawString("Hum. Rel.: " + String(humII, 1) + "%", tft.width() /
          2 - 30, tft.height() / 2 - 30);
132     tft.drawString("Temp. Mat: " + String(tempmII) + " C", tft.width() /
          2 - 30, tft.height() / 2 - 12);
133     tft.drawString("Oxigeno: " + String(oxyII) + "%", tft.width() / 2 -
          20, tft.height() / 2 + 8);
134     tft.drawString("Muestra " + String(sample), tft.width() / 2, tft.
          height() / 2 + 30);
135     tft.setTextColor(TFT_BLACK);
136     tft.drawString(">>>> Camara II <<<<<", tft.width() / 2, tft.height() /
          2 + 52);
137 }
138
139 void renderDisplayI(float temp, float hum, float tempm, float oxy, int
      sample) { //
140     Serial.println("<Mostrando_datos_camara_I>");
141     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
142     tft.setTextColor(TFT_GREEN);
143     tft.drawString("Temp. Amb: " + String(temp, 1) + " C", tft.width() /

```

```

    2 - 30, tft.height() / 2 - 50);
144 tft.drawString("Hum. Amb: " + String(hum, 1) + "%", tft.width() / 2
    - 30, tft.height() / 2 - 30);
145 tft.drawString("Oxigeno: " + String(oxy) + "%", tft.width() / 2 -
    20, tft.height() / 2 + 8);
146 tft.drawString("Temp. Mat: " + String(tempm) + "C", tft.width() / 2
    - 30, tft.height() / 2 - 12);
147 tft.drawString("Muestra " + String(*ptrSample), tft.width() / 2, tft.
    height() / 2 + 30);
148 tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
149 tft.drawString(">>>> Camara I <<<<", tft.width() / 2, tft.height() /
    2 + 52);
150 }
151
152 void renderDisplayII(float tempII, float humII, float tempmII, float
    oxyII, int sample) { //
153 Serial.println("<Mostrando datos camara II>");
154 tft.fillScreen(TFT_BLACK);
155 tft.setTextColor(TFT_GREEN);
156 tft.drawString("Temp. Amb: " + String(tempII, 1) + "C", tft.width()
    / 2 - 30, tft.height() / 2 - 50);
157 tft.drawString("Hum. Rel.: " + String(humII, 1) + "%", tft.width() /
    2 - 30, tft.height() / 2 - 30);
158 tft.drawString("Temp. Mat: " + String(tempmII) + "C", tft.width() /
    2 - 30, tft.height() / 2 - 12);
159 tft.drawString("Oxigeno: " + String(oxyII) + "%", tft.width() / 2 -
    20, tft.height() / 2 + 8);
160 tft.drawString("Muestra " + String(*ptrSample), tft.width() / 2, tft.
    height() / 2 + 30);
161 tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
162 tft.drawString(">>>> Camara II <<<<", tft.width() / 2, tft.height() /
    2 + 52);
163 }
164
165 void renderVolteo() {
166 tft.fillScreen(TFT_BLACK);
167 tft.setTextColor(TFT_GREEN);
168 tft.setTextDatum(MC_DATUM);
169 tft.setTextSize(2);
170 tft.drawString("MODULO VOLTEO", tft.width() / 2, tft.height() / 2 - 40)
    ;
171 tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
172 tft.drawString(">>> Compos I <<<", tft.width() / 2, tft.height() / 2 +
    16 );
173 tft.drawString("# Volteos: " + String(boton0.numberKeyPresses ), tft.
    width() / 2, tft.height() / 2 + 40 );
174 }

```

```

175
176 void heat_sensors() {
177     unsigned long currentMillis1 = millis();
178
179     if (currentMillis1 - prevMilli1 > intervalo1) {
180         Serial.println("Entrando_a_mediciones_Warm_");
181         prevMilli1 = currentMillis1;
182         sensor_temperature = dht.readTemperature() ;
183         sensor_humidity = dht.readHumidity();
184         sensor_temperatureII = dhtII.readTemperature();
185         sensor_humidityII = dhtII.readHumidity();
186         sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get
            temperatures
187         tempMatrizI = sensors.getTempC(sensorI) ;
188         tempMatrizII = sensors.getTempC(sensorII);
189         oxygenDataI = oxygenI.getOxygenData(COLLECT_NUMBER);
190         oxygenDataII = oxygenII.getOxygenData(COLLECT_NUMBER);
191
192         renderDisplayIw(*ptrTempA, *ptrHumI, *ptrTempM, *ptrOxyI,
            sample_counterW); //
193         delay(4950);
194         renderDisplayIIw(*ptrTempAII, *ptrHumII, *ptrTempMII, *ptrOxyII,
            sample_counterW);
195         sample_counterW++;
196     }
197 }
198
199 void makeIFTTRequest() {
200     Serial.print("Connecting_to_");
201     Serial.print(server);
202     WiFiClient client;
203     int retries = 5;
204     while (!client.connect(server, 80) && (retries-- > 0)) {
205         Serial.print(".");
206     }
207     Serial.println();
208     if (!client.connected()) {
209         Serial.println("Failed_to_connect...");
210     }
211     sensor_temperature = dht.readTemperature();
212     sensor_humidity = dht.readHumidity();
213     sensor_temperatureII = dhtII.readTemperature();
214     sensor_humidityII = dhtII.readHumidity();
215     sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get
            temperatures
216     tempMatrizI = sensors.getTempC(sensorI);
217     tempMatrizII = sensors.getTempC(sensorII);

```

```

218 oxygenDataI = oxygenI.getOxygenData(COLLECT_NUMBER);
219 oxygenDataII = oxygenII.getOxygenData(COLLECT_NUMBER);
220 Serial.print("Request_resource:");
221 Serial.println(resource);
222
223 String jsonObject = String("{\"value1\":") + sensor_temperature + "
    |||" + sensor_humidity + "|||" + tempMatrizI + "|||" + oxygenDataI
    + "|||" + sensor_temperatureII + "|||" + sensor_humidityII + "|||
    " + tempMatrizII + "|||" + oxygenDataII + "|||" + sample_counter
    + "\"}";
224
225 Serial.print("[SAMPLE_NO]" + String(sample_counter) + " ");
226 Serial.println();
227 Serial.println(">>>>Prueba.DATOS_CAMARA_I<<<<<");
228 Serial.print("[Hum.Amb]" + String(sensor_humidity) + " ");
229 Serial.print("[Temp.Amb]" + String(sensor_temperature) + " ");
230 Serial.print("[Temp.Matriz]" + String(tempMatrizI) + " ");
231 Serial.print("[Conc.Oxygen]" + String(oxygenDataI) + " ");
232 Serial.println();
233 Serial.println(">>>>Prueba.DATOS_CAMARA_II<<<<<");
234 Serial.print("[Hum.Amb_II]" + String(sensor_humidityII) + " ");
235 Serial.print("[Temp.Amb_II]" + String(sensor_temperatureII) + " ");
236 Serial.print("[Temp.Matriz_II]" + String(tempMatrizII) + " ");
237 Serial.print("[Conc.Oxygen_II]" + String(oxygenDataII) + " ");
238 Serial.println();
239
240 client.println(String("POST") + resource + " HTTP/1.1");
241 client.println(String("Host:") + server);
242 client.println("Connection:close\r\nContent-Type:application/json")
    ;
243 client.print("Content-Length:");
244 client.println(jsonObject.length());
245 client.println();
246 client.println(jsonObject);
247
248 int timeout = 5 * 10; // 5 seconds
249 while (!client.available() && (timeout-- > 0)) {
250     delay(100);
251 }
252 if (!client.available()) {
253     Serial.println("No_response...");
254 }
255 while (client.available()) {
256     Serial.write(client.read());
257 }
258 Serial.println("\nclosing_connection");
259 client.stop();

```

```

260     sample_counter++;
261 }
262 void setup()
263 {
264     Serial.begin(115200);
265     ///////INICIALIZAR OTA/////
266     Serial.println("Booting OTA");
267     setupOTA("OTA_ComposT_1", ssidOTA, passwordOTA);
268     Serial.println("<OTA_Listo_Inicializando_Sensores...>");
269     Serial.println("Botones");
270     pinMode(boton0.botonVolteo, INPUT_PULLUP);
271     attachInterrupt(boton0.botonVolteo, ISR_Volteo, FALLING);
272     ///////INICIALIZAR SENSORES/////
273     sensors.begin();
274     dht.begin();
275     dhtII.begin();
276     sensors.setResolution(sensorI, TEMPERATURE_PRECISION);
277     sensors.setResolution(sensorII, TEMPERATURE_PRECISION);
278     oxygenI.begin(Oxygen_AddressI);
279     oxygenII.begin(Oxygen_AddressII);
280
281     Serial.println("<Sensores_listos...Incializando_display>");
282     tft.init();
283     tft.setRotation(3);
284     tft.fillScreen(TFT_BLACK);
285     tft.setTextColor(TFT_GREEN);
286     tft.setTextDatum(MC_DATUM);
287     tft.setTextSize(2);
288     tft.setCursor(0, 0);
289     tft.drawString("Ciclo_TFG", tft.width() / 2, tft.height() / 2 - 40);
290     tft.drawString(">ComposT_1<", tft.width() / 2, tft.height() / 2 -
291         16 );
292     tft.setTextColor(TFT_BLUE);
293     tft.drawString("A.Monge", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 14);
294     tft.setTextColor(TFT_ORANGE);
295     tft.drawString("UCR_EIB", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 34 );
296     tft.setTextColor(TFT_WHITE);
297     tft.drawString("ENE_-2023", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 52);
298     delay(4000);
299     oxygenI.calibrate(OXYGEN_CONECTRATION, OXYGEN_MV);
300     Serial.println("The_oxygen_sensor_I_was_calibrated_successfully.");
301     oxygenII.calibrate(OXYGEN_CONECTRATION, OXYGEN_MV);
302     Serial.println("The_oxygen_sensor_II_was_calibrated_successfully.");
303 }
304 void loop() {
305     unsigned long millisNow = millis();

```

```

306 while (millis() < 160000) {
307     heat_sensors();
308 }
309 if (millisNow - prevMilli > publish_period) {
310     prevMilli = millisNow;
311     initWifi();
312     makeIFTTTRequest();
313 }
314 //Inicio estado Compostera. //
315 if (compostera.volteo) {
316     renderVolteo();
317     delay(320000);
318     compostera.volteo = false;
319 } else {
320     /////RenderDisplay I y II ///// ///
321     if (millis() - switchMillis > interval)
322     {
323         count++;
324         if (count == 1)
325             firstScreenFlag = true;
326         if (count == 2)
327         {
328             secondScreenFlag = true;
329             count = 0;
330         }
331         switchMillis += interval;
332     }
333     if (firstScreenFlag)
334     {
335         renderDisplayI(*ptrTempA, *ptrHumI, *ptrTempM, *ptrOxyI, *
336             ptrSample); //
337         firstScreenFlag = false;
338     }
339     if (secondScreenFlag)
340     {
341         renderDisplayII(*ptrTempAII, *ptrHumII, *ptrTempMII, *ptrOxyII, *
342             ptrSample);//
343         secondScreenFlag = false;
344     }
345 }

```

## Procesamiento de datos

```

1 import os
2 import argparse
3 import pandas as pd
4 import seaborn as sns
5 import numpy as np

```

```

6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import re
8 import scipy.stats as stats
9 from functools import reduce
10
11 # arguments: input_path, output_path, phase
12 # timestamp, evento, temp_amb, hr, mat, oxi, muestra
13
14 def read_data(input_path, phase):
15     if phase.lower() != 'external':
16         return pd.read_excel(input_path, header=0, index_col=None,
17                               converters={'Timestamp': pd.to_datetime},
18                               decimal='.',)
19     else:
20         return pd.read_excel(input_path, header=0, index_col=0,
21                               converters={'Timestamp': pd.to_datetime},
22                               decimal='.',)
23 def reduce_memory_usage(df):
24     floats = df.select_dtypes(include='float').columns
25     ints = df.select_dtypes(include='int').columns
26     objects = df.select_dtypes(include='object').columns
27
28     df[floats] = df[floats].astype(np.float32, errors='ignore')
29     df[ints] = df[ints].astype(np.int32, errors='ignore')
30     df[objects] = df[objects].astype('category', errors='ignore')
31     return df
32
33 def separate_dataframe(df, cols_to_select=None):
34     return df[cols_to_select].copy()
35 def cleanse(
36     df: pd.DataFrame,
37     phase: str,
38     phase_dict: dict,
39     interno: bool,
40     matriz: bool
41 ) -> pd.DataFrame:
42     '''
43     Apply different cleaning rules based on external or internal
44     dataframes and sensors.
45     - Matriz: remove nans, temp_mat == 85 | temp_mat == -127 (code
46       from sensors)
47     - Amb_int: remove nans, negative values, and values higher than
48       100 | below 50 for HR, temp>50 | temp<10, oxi>25
49
50     df = df.dropna(axis=0)
51     if interno == True:
52         # matriz o ambiente

```

```

50     if matriz:
51         df = df[(df[phase_dict[args.phase]['temp_mat']] != 85)
52                 & (df[phase_dict[args.phase]['temp_mat']] != -127)]
53         return df
54     else:
55         # temp amb
56         df = df[(df[phase_dict[phase]['temp_amb']] >= 10) & (df[
57                 phase_dict[phase]['temp_amb']] <= 50)]
58         df = df[(df[phase_dict[phase]['hr']] <= 100) & (df[
59                 phase_dict[phase]['hr']] >= 50)]
60         df = df[(df[phase_dict[phase]['oxi']] <= 25) & (df[
61                 phase_dict[phase]['oxi']] >= 0)]
62         return df
63     else:
64         # df = df[(df[phase_dict[phase]['temp_amb']] >= 10) & (df[
65                 phase_dict[phase]['temp_amb']] <= 50)]
66         # df = df[(df[phase_dict[phase]['hr']] <= 100) & (df[phase_dict
67                 [phase]['hr']] >= 50)]
68         return df
69
70 phase_dict = {
71     'active': {
72         'timestamp': 'timestamp',
73         'evento': 'evento',
74         'temp_amb': 'temp_amb_i',
75         'hr': 'hr_i',
76         'temp_mat': 'temp_mat_i',
77         'oxi': 'oxi_i',
78         'muestra': 'muestra',
79     },
80     'passive': {
81         'timestamp': 'timestamp',
82         'evento': 'evento',
83         'temp_amb': 'temp_amb',
84         'hr': 'hr',
85         'temp_mat': 'temp_mat',
86         'oxi': 'oxi',
87         'muestra': 'muestra',
88     },
89     'external': {
90         'timestamp': 'timestamp',
91         'evento': 'evento',
92         'temp_amb': 'temp_amb_ext',
93         'hr': 'hr_ext',
94         'muestra': 'muestra'
95     },
96 }

```

```

91 if __name__ == '__main__':
92     # clean col names dictionary by phase
93     # indexing: phase_dict[args.phase]['variable_name']
94     # select all columns: phase_dict[args.phase].values()
95     # USAGE: python cleaning_pipeline.py --input_path data_all/
           compostera/compostera_ciclo/filename.csv --phase ['active', '
           passive', 'external']
96     #
97     parser = argparse.ArgumentParser()
98     parser.add_argument('--input_path', type=str,
99                         default='data_all/amb_ext/AMBIENTE-EXTERNO-22
           OCT-17NOV.xlsx')
100    parser.add_argument('--output_path', type=str, default='
           clean_output')
101    parser.add_argument('--phase', type=str, default='external')
102    args = parser.parse_args()
103    print(args)
104
105    # read data
106    compost = read_data(args.input_path, args.phase)
107    compost = compost.sort_values(
108        ascending=True, by='Timestamp').reset_index(drop=True)
109    print(compost.head(1))
110
111    # clean columns
112    print('Cleaning column names...')
113    compost.columns = list(phase_dict[args.phase].values())
114    print(f'Clean columns: {compost.columns}')
115
116    # dataset info
117    print('Dataset info:')
118    print(compost.info())
119    print('Descriptive Statistics:')
120    print(compost.describe())
121
122    # rounding decimals
123    print('rounding decimals...')
124    compost = compost.round(4)
125    print('done rounding decimals!')
126
127    # reduce memory usage
128    print('Reducing memory usage...')
129    print(compost.memory_usage(deep=True).sum())
130    compost = reduce_memory_usage(compost)
131    print(compost.memory_usage(deep=True).sum())
132
133    # feature extraction: month, day, hour

```

```

134 print('Feature extraction: month, day, hour')
135 compost['hour'] = compost.timestamp.dt.hour
136 compost['day'] = compost.timestamp.dt.day
137 compost['month'] = compost.timestamp.dt.month
138 print(compost.head(1))
139
140 # separate ambiente interno y matriz
141     # save files
142 compostera = args.input_path.split('/')[1]
143 compostera_ciclo = args.input_path.split('/')[2]
144
145 print("Separating dataframe into ambiente interno and matriz...")
146 if args.phase != 'external':
147     # create save path
148     save_path = os.path.join(args.output_path, compostera,
149                             compostera_ciclo)
150     os.makedirs(save_path, exist_ok=True)
151
152     # separate dataframe into matriz
153     mat_cols = ['timestamp', phase_dict[args.phase]['temp_mat'], '
154     muestra', 'month', 'day', 'hour']
155     matriz = separate_dataframe(compost, cols_to_select=mat_cols)
156
157     # separate dataframe into amb_int
158     amb_int_cols = ['timestamp', phase_dict[args.phase]['temp_amb
159     '], phase_dict[args.phase]['hr'], phase_dict[args.phase]['
160     oxi'], 'muestra', 'month', 'day', 'hour']
161     amb_int = separate_dataframe(compost, cols_to_select=
162     amb_int_cols)
163
164     print('Cleaning matriz...')
165     clean_matriz = cleanse(matriz, args.phase, phase_dict, interno=
166     True, matriz=True)
167     print('Cleaning ambiente interno...')
168     clean_amb_int = cleanse(amb_int, args.phase, phase_dict,
169     interno=True, matriz=False)
170
171     # save clean dataframe into csv
172     print(f"Saving to {save_path}")
173     clean_matriz.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{
174     compostera_ciclo}_{args.phase}_matriz_clean.csv", encoding='
175     utf-8')
176     clean_amb_int.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{
177     compostera_ciclo}_{args.phase}_amb_int_clean.csv", encoding
178     ='utf-8')
179
180     # save excluded data
181     print(f"Saving excluded data to: {save_path}")
182     excluded_mat = matriz[~matriz.apply(tuple,1).isin(clean_matriz.

```

```

    apply(tuple,1)).reset_index(drop=True)
170 excluded_amb_int = amb_int[~amb_int.apply(tuple,1).isin(
    clean_amb_int.apply(tuple,1)).reset_index(drop=True)
171 excluded_mat.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{
    compostera_ciclo}_{args.phase}_excluded_mat.csv", encoding='
    utf-8')
172 excluded_amb_int.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{
    compostera_ciclo}_{args.phase}_excluded_ambint.csv",
    encoding='utf-8')
173 # Check if .csv will be empty
174 if (len(excluded_amb_int) == 0): print("Amb int exclusion is
    empty")
175 if (len(excluded_mat) == 0): print("Matriz exclusion is empty")
176
177 # MATRIZ: Averaging temp_mat values by hour
178 tempMat = phase_dict[args.phase]['temp_mat']
179 dayHour_mat = clean_matriz.groupby(['month', 'day', 'hour'])[
    tempMat].mean()
180 # Amb_int: Averaging temp_amb, hr, oxi values by hour
181 temp_hr_ox_ambInt = [phase_dict[args.phase]['temp_amb'],
    phase_dict[args.phase]['hr'], phase_dict[args.phase]['oxi']]
182 dayHour_amb_int = clean_amb_int.groupby(['month', 'day', 'hour
    '])[temp_hr_ox_ambInt].mean()
183 # Save dataframes
184
185 dayHour_mat.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{compostera_ciclo
    }_{args.phase}_matriz_byhour.csv", encoding='utf-8')
186 dayHour_amb_int.to_csv(f"{save_path}/{compostera}_{
    compostera_ciclo}_{args.phase}_amb_int_byhour.csv", encoding
    ='utf-8')
187 else:
188     save_path = os.path.join(args.output_path, compostera)
189     os.makedirs(save_path, exist_ok=True)
190     clean_amb_ext = cleanse(compost, args.phase, phase_dict,
    interno=False, matriz=False)
191     # to_csv
192     print(f"Saving to {save_path}")
193     clean_amb_ext.to_csv(f"{save_path}/{compostera_ciclo.split('.')
    [0]}_{args.phase}_ext_clean.csv", encoding='utf-8')
194     excluded_amb_ext = compost[~compost.apply(tuple,1).isin(
    clean_amb_ext.apply(tuple,1)).reset_index(drop=True)
195     if len(excluded_amb_ext) == 0: print("Empty excluded file")
196     excluded_amb_ext.to_csv(f"{save_path}/{compostera_ciclo.split
    ('.') [0]}_{args.phase}_ext_excluded.csv", encoding='utf-8')
197
198 # Averaging temp and hr by hour
199 cols_to_use = [phase_dict[args.phase]['temp_amb'], phase_dict[

```

```
    args.phase]['hr']]
200    dayHour_ext_amb = clean_amb_ext.groupby(['month', 'day', 'hour
        '])[cols_to_use].mean()
201    # save grouped
202    dayHour_ext_amb.to_csv(f"{save_path}/{compostera_ciclo.split
        ('.')[0]}_{args.phase}_amb_ext_byhour.csv", encoding='utf
        -8')
203    print(compost.head(1))
204    print('Done saving files!')
```