



Capítulo 3

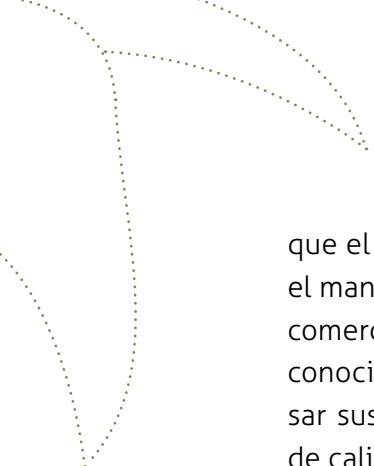
Módulos de lombricompostaje con residuos de cosecha de tomate

NADIA LUQUE SANABRIA, ANDREA PAOLA CLAVIJO,
IVÁN EDILBERTO CHACÓN, EDWIN ANDRÉS VILLAGRÁN

El compostaje es un proceso que transforma de manera eficiente y segura los residuos orgánicos generados en la finca en materias primas para la producción de cultivos de interés económico e industrial. La reutilización de los residuos orgánicos de origen agrícola es una estrategia fundamental de la agricultura autosustentable. La aplicación de compost a los suelos de cultivo aumenta los niveles de fertilidad, mejora la capacidad de retención de agua, modifica la estructura física del suelo y contribuye a la disminución en el uso de fertilizantes químicos y a la regeneración de materia orgánica de suelos agotados, entre otros aspectos.

Otra de las ventajas que trae consigo la utilización de compost o lombricompostaje como enmienda orgánica, es su acción controladora de algunas enfermedades comunes del suelo (Achmon et al., 2018; Daza et al., 2015; Liu et al., 2016). Por ejemplo, en el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, se ha demostrado la capacidad del compost o lombricompostaje de controlar enfermedades del suelo, entre ellas, la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* (dormidera de la planta) y la marchitez bacteriana causada por *Ralstonia solanacearum* (Liu et al., 2016; Mitsuboshi et al., 2018; Morauf & Steinkellner, 2015; Pugliese et al., 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, AGROSAVIA desarrolló un proyecto en el cual agricultores destacados del cultivo de tomate manejaron de manera eficiente los residuos producidos en la cosecha y en sus predios en los tres principales departamentos productores del país (Boyacá, Antioquia y Cundinamarca) (Agronet, 2022). Este aprovechamiento representa ventajas competitivas para los agricultores, ya



que el cultivo pasa a ser ambientalmente sostenible, y trae consigo beneficios en el manejo integrado de enfermedades pues mantiene la inocuidad del fruto en su comercialización. En este sentido, el principal propósito fue generar y transferir conocimiento y tecnología que permitiera a los agricultores o productores procesar sus propios residuos agrícolas para obtener un compost o lombricompost de calidad que mejorara la fertilidad y sanidad de los suelos destinados al cultivo.

La oferta tecnológica (OT) propuesta que se explicará más adelante es el equipo de lombricompostaje para el aprovechamiento de residuos vegetales de pequeños y medianos productores diseñado por AGROSAVIA. La herramienta es una solución tecnológica que incluye el diseño y la construcción de un equipo de lombricompostaje destinado a que pequeños y medianos productores generen enmiendas orgánicas de manera económica, eficiente, fácil y segura para su directo aprovechamiento en el cultivo. Esta OT resalta y promueve el uso de residuos agropecuarios que se generan dentro de la finca para transformarlos en un bioinsumo que mejora las características físicas del suelo y reduce la aplicación de fertilizantes de síntesis química. Además, los costos de producción de compostajes tradicionales disminuyen y se garantiza un proceso adecuado de compostaje.

Adicionalmente, el equipo ocupa poco espacio (25 m²) y permite procesar una tonelada de residuos orgánicos. El diseño tuvo en cuenta especificaciones técnicas, económicas y prácticas de los productores de tomate en campo y se formuló para que pudiera ser replicado con facilidad por otros agricultores.

El módulo de lombricompostaje está compuesto de dos subsistemas, los cuales, preferiblemente, deben ser utilizados en conjunto: una sección donde el agricultor puede desarrollar procesos de predescomposición (precompostaje) (figura 3.1) y una sección destinada al lombricompostaje (figura 3.2).

Sección de precompostaje

La primera parte del módulo, en la que se desarrolla el proceso de predescomposición (figura 3.1), tiene como objeto acondicionar o preparar el alimento (residuos orgánicos generados en la finca) para las lombrices. Esta predescomposición o precompostaje asegura que los residuos utilizados tengan las condiciones necesarias para la sobrevivencia de las lombrices, como el pH, la temperatura, la ausencia de elementos tóxicos, entre otros.

El proceso en esta primera etapa se realiza mediante un sistema giratorio que cuenta con un chasis construido en tubo cuadrado de acero estructural ASTM A36. En el chasis se ensambla un sistema de rodachines sobre el cual se apoyan horizontalmente dos canecas de polipropileno de 100 l de capacidad que cuentan con unos sistemas tipo riel y un timón que permiten girar 360 grados cada caneca de manera independiente. Cada caneca cuenta con una compuerta frontal para el monitoreo de las condiciones del material precompostado y una tapa lateral para el proceso de carga y descarga del material (figura 3.1). Para optimizar el proceso de aireación del material a precompostar, las tapas laterales tienen pequeños orificios distribuidos en toda su área superficial.

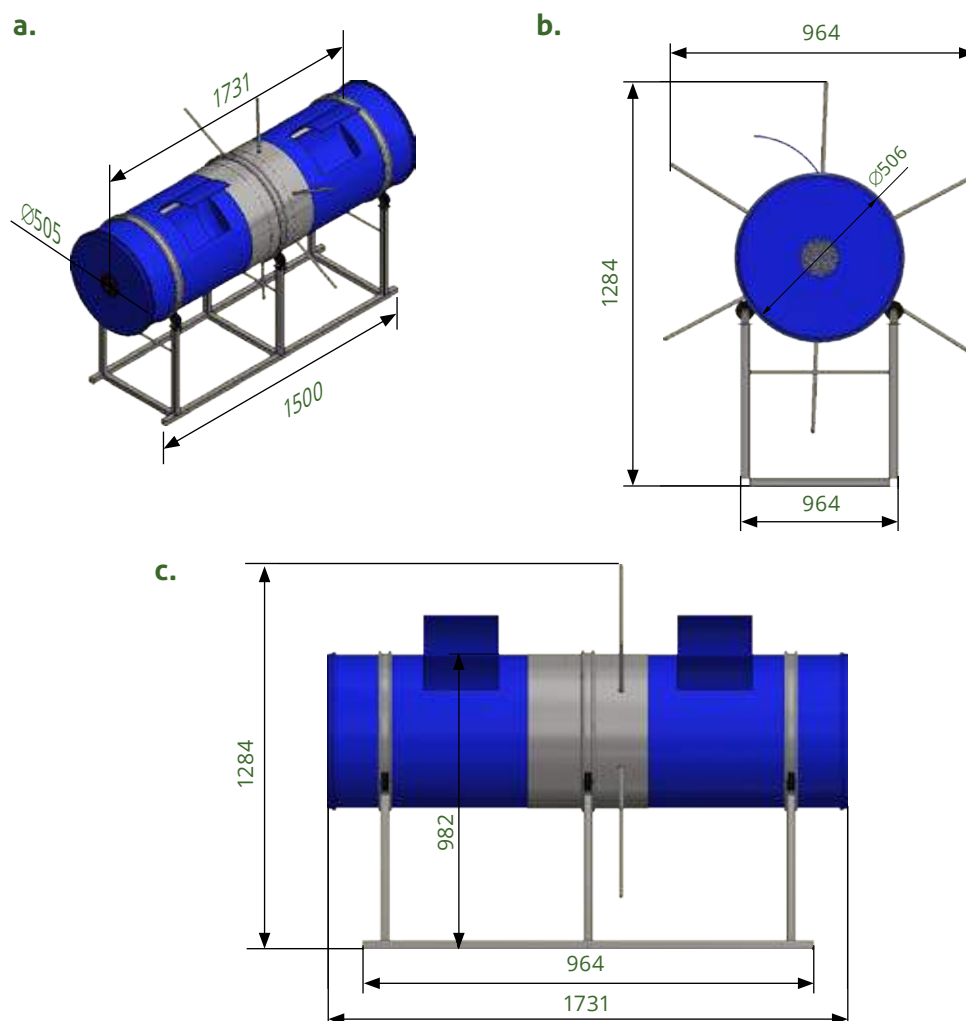


Figura 3.1. Prototipo diseñado para realizar la labor de precompostaje. Módulo rotatorio para el precompostaje de residuos orgánicos que homogeniza residuos orgánicos mediante la rotación de tambores plásticos sobre rodachines. a. Vista oblicua; b. Vista frontal; c. Vista lateral.

Fuente: AGROSAVIA (2018b)

En general, la predescomposición es un proceso discontinuo porque se realiza por “cargas”, es decir, una vez que se carga la caneca, el proceso de precompostaje debe finalizar para extraer el material antes de introducir una nueva carga. En comparación con otros diseños, este módulo de precompostaje cuenta con dos canecas para alternar la producción de la mezcla en predescomposición y proporcionar material al módulo de lombricultura en diferentes tiempos.

Dentro de las ventajas de esta sección del módulo, destaca la facilidad de volteo gracias al volante, el sistema de rieles y las ruedas. El volteo permite mantener la humedad cercana al 60 % y la aireación homogénea del material que se precomposta. Las canecas cuentan con orificios para el suministro continuo de aire y la eliminación del exceso de humedad. Además, gracias a que es un sistema sellado protege la mezcla de factores externos.

Una vez la mezcla de residuos orgánicos cumpla con las condiciones idóneas para alimentar y mantener a las lombrices, los residuos precompostados se transfieren a la sección de lombricompostaje (figura 3.2).

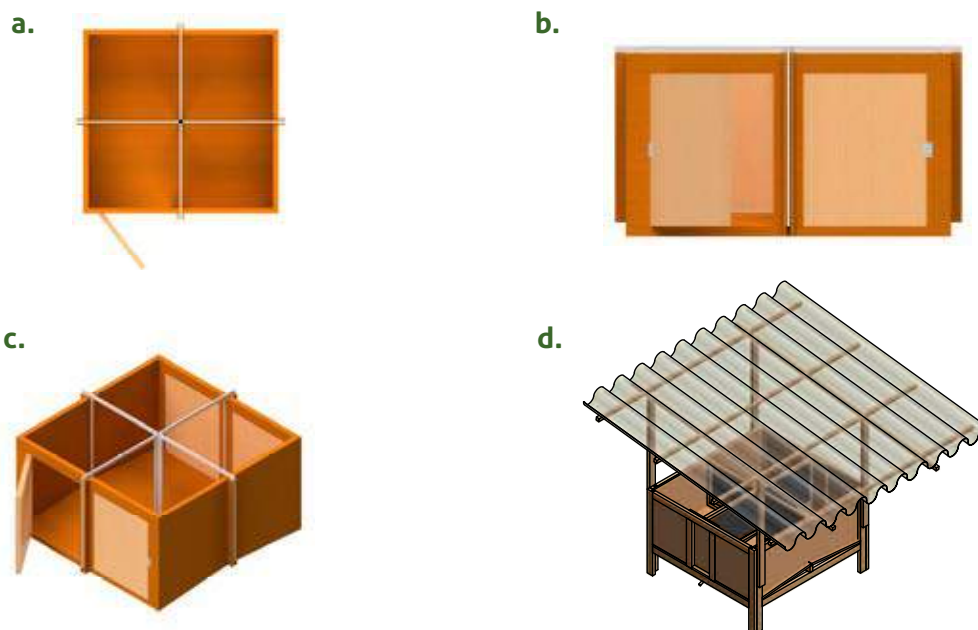


Figura 3.2. Prototipo del módulo de lombricompostaje dividido en cuatro subsecciones por una malla metálica. Este puede procesar simultáneamente hasta cuatro mezclas de residuos precompostados en tiempos distintos, lo cual permite una producción continua a medida que los residuos orgánicos son producidos en los predios de los productores. a. Vista superior. b. Vista frontal. c. Vista oblicua. d. Vista completa del módulo de lombricompostaje con techo.

Fuente: AGROSAVIA (2018b)

Sección de lombricompostaje

En esta sección las lombrices descomponen los materiales y producen el lombricompuesto. Para que el proceso de lombricompostaje se desarrollara eficientemente, durante el diseño del módulo se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

1. Tipo de materiales:

- Materiales resistentes a la humedad inmunizados o tapizados con cubiertas plásticas y que permitan, además, coleccionar los líquidos residuales (lixiviados) del proceso.
- Materiales con capacidad de mantener la temperatura para reducir las variaciones bruscas de temperatura y mantener la integridad de las lombrices.
- Materiales opacos para reducir la cantidad de luminosidad, ya que las lombrices son fotosensibles.

2. Diseño:

- Diseño para facilitar la recolección de las lombrices sin estresarlas. Una vez el proceso de lombricompostaje finaliza, es necesario extraer las lombrices del lombricompuesto para su utilización en el suelo y para que las lombrices puedan continuar en un proceso nuevo de lombricompostaje.
- Diseño para facilitar la recolección del lombricompuesto maduro.
- Diseño para que el proceso de lombricompostaje sea continuo y se obtengan enmiendas orgánicas durante todo el año.

Se diseñó un módulo de lombricultura en forma de cajón cuadrado con una dimensión lateral de 1,5 m y una altura de 0,6 m. Este módulo debe fabricarse en madera inmunizada con sellante artificial. Para las paredes y el piso se utilizaron tablas de pino cepilladas de 0,25 m de ancho por 0,025 m de espesor. Para las columnas y vigas se utilizaron repisas de madera en pino cepilladas de 0,04 * 0,08 m. El área superficial interna del módulo de lombricompostaje se cubrió con una geomembrana de pvc calibre 12.000. Este cajón está dividido en 4 compartimentos de 0,75m x 0,75 m, espacios separados por una malla eslabonada de aluminio con poros de aproximadamente 5 mm de diámetro con el fin de ir trabajando lotes de compost independientes y, a su vez, generar un movimiento natural de las lombrices de los módulos de compost maduro hacia los módulos de compost más inmaduro.

El piso del módulo está construido en dos secciones con pendiente de 10 grados desde el centro hacia el exterior para facilitar el flujo y drenaje de los lixiviados generados durante el proceso. Al final del borde más bajo de cada lado del piso hay dos canaletas que permiten coleccionar el lixiviado. Sobre los laterales donde se colecciona el lixiviado se pusieron puertas, una para cada compartimento, para facilitar el retiro del lombricompost listo. Todo el sistema se encuentra a una altura sobre el nivel del suelo de 0,3 m para evitar daños por humedad y se encuentra cubierto por tejas plásticas (figura 3.3).

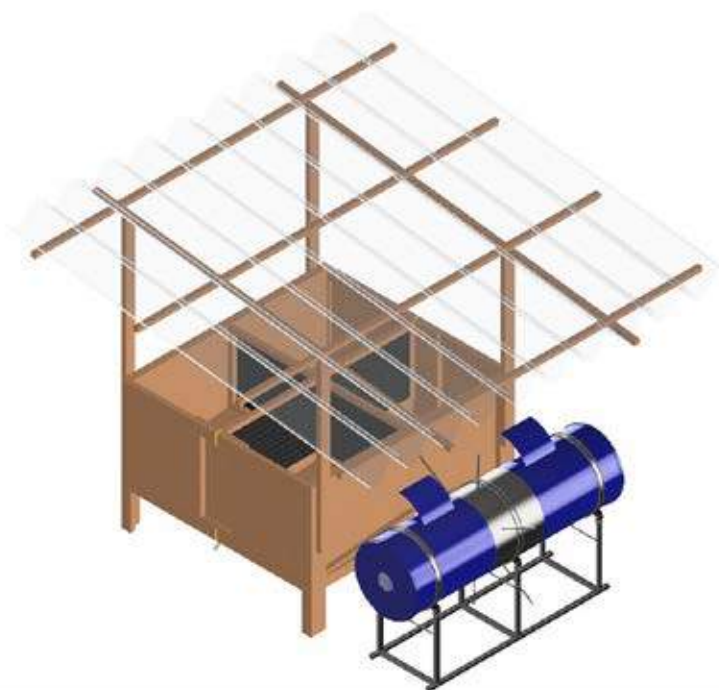


Figura 3.3. Diseño del prototipo del módulo completo con el módulo rotatorio de predescomposición y el módulo cubierto de lombricompostaje.

Fuente: AGROSAVIA (2018b)

Funcionamiento del módulo

Para poner en funcionamiento el módulo completo de lombricompostaje se deben identificar inicialmente los residuos orgánicos disponibles para estimar el contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) y su humedad, esenciales para un buen balance de la mezcla. Con esta información se definen las cantidades de cada residuo a utilizar en el proceso para conservar una relación C : N de 25 a 35 : 1, es decir de 25 a 35 moléculas de carbono por cada molécula de nitrógeno. Estos parámetros varían de acuerdo con el tipo de residuo.

En visitas realizadas a productores de tomate bajo condiciones protegidas de los departamentos de Antioquia, Boyacá y Cundinamarca, se colectaron residuos orgánicos comunes que fueron analizados de acuerdo con la norma técnica 5167 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 2011), en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo (tabla 3.1). Los materiales más frescos y verdes y los estiércoles contienen cantidades más altas de nitrógeno, mientras los residuos secos muertos y oscuros (hojarasca y cascarilla de arroz) contienen altas cantidades de carbono (tabla 3.1).

Tabla 3.1. Resultados de los análisis químicos de las materias primas colectadas en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Antioquia de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 5167

Materia prima	pH	Nitrógeno Total	C. orgánico oxidable total	Humedad (%)	Relación (C/N)
Fruto de Tomate	4,25	0,1	2,79	92,35	29,14
Réplica fruto de Tomate	No dato	1,45	39	82,3	26,8
Residuo de cosecha de Tomate	6,24	3,59	15,67	51,75	4,36
Réplica residuo cosecha Tomate	No dato	2,15	35,76	73,1	16,6
Réplica residuo cosecha Tomate	5,42	0,75	37,43	21,82	49,89
Ceniza de quema de residuos de Tomate	9,98	0,2	1,46	34,24	7,16
Residuo de Maíz	7,77	0,96	26,86	24,09	27,87
Bovinaza	7,62	0,25	23,12	84,13	23,12
Gallinaza	7,35	1,09	9,04	23,61	8,28
Estiércol de oveja	8,17	0,7	10,63	66,99	15,19
Estiércol de Conejo	8,58	2,34	34,8	66,6	14,9
Gallinaza compostada	6,88	1,49	16,26	22,72	10,93
Residuos crudos	5,1	0,93	14,36	59,72	15,5
Hojarasca	5,73	0,9	35,21	21,96	39,03
Cereza de café	No dato	2,08	46,5	77,9	22,36
Hoja de plátano	5,78	0,26	9,28	80,4	35,17
Cascarilla de arroz	5,73	0,45	34,16	18	76,16

Fuente: AGROSAVIA (2018b)

A partir de los valores de nitrógeno, carbono orgánico, humedad y relación C:N de los materiales a mezclar, se calculan las cantidades necesarias de los residuos orgánicos para obtener una mezcla balanceada basada en la relación óptima de C:N. Estas cantidades se pueden definir de manera precisa utilizando la fórmula de la Universidad de Cornell (1996) (ecuación 3.1) que tiene en cuenta la humedad estimada de cada residuo.

$$R = \frac{Q_1 (C_1 \times (100 - M_1)) + Q_2 (C_2 \times (100 - M_2)) + Q_3 (C_3 \times (100 - M_3)) \dots}{Q_1 (N_1 \times (100 - M_1)) + Q_2 (N_2 \times (100 - M_2)) + Q_3 (N_3 \times (100 - M_3)) \dots} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Esta fórmula relaciona la sumatoria de diferentes parámetros para cada residuo (1, 2, 3, etc.). Incluye su peso (Q), humedad (M), contenido de carbono (C) y contenido de nitrógeno (N). Las cantidades o tipo de residuos deben variar de acuerdo con su disponibilidad para alcanzar una relación final entre 25 y 35 carbonos por cada nitrógeno.

Definidas las cantidades de los residuos, se recomienda cortarlos en pedazos más pequeños, mezclarlos muy bien, humedecerlos con un poco de agua e introducirlos a la caneca de predescomposición por las tapas laterales teniendo en cuenta que cada una de estas canecas soporta aproximadamente 40 kg de mezcla. Posteriormente, se sellan las tapas laterales y se giran durante 3 minutos con la manivela cambiando de dirección. Una vez la mezcla esté homogénea, se verifica el porcentaje de humedad, el cual debe estar alrededor de 50 % dependiendo de los materiales usados. Si la humedad está por debajo de este valor, se debe agregar agua por las puertas frontales, girar para humedecer la mezcla y verificar. Una prueba sencilla para determinar la humedad del material en predescomposición es la prueba del puño. Esta consiste en coger con la mano una cantidad de material y apretarlo con fuerza hasta que escurra el agua. Una mezcla con un 50 % de humedad solo debe generar de una a dos gotas de agua. Es importante controlar la humedad en la mezcla puesto que un porcentaje por encima del 50 % puede generar mal olor y atraer una gran cantidad de insectos, como moscas. Asimismo, una baja humedad no favorece el proceso de predescomposición, que ocurre debido a la presencia de microorganismos en los residuos. Durante el proceso de predescomposición (que puede durar entre 15 y 20 días), las canecas se deben girar diariamente entre 2 y 3 minutos, aproximadamente, para mejorar la aireación de la mezcla. Igualmente, se debe monitorear y ajustar la humedad para asegurar que el producto sea adecuado para alimentar a las lombrices.

Antes de introducir las lombrices en las mezclas, se puede realizar la prueba de alimentación explicada en el capítulo 2. Un porcentaje de mortalidad por encima

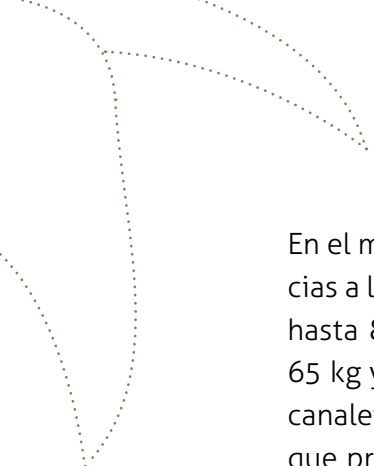
del 20 % (2 lombrices), indica que existe alguna condición desfavorable para la lombriz, por lo que se sugiere dejar la mezcla por más tiempo en predescomposición y buscar las causas por las cuales las lombrices no toleran el alimento.

Terminado el proceso de predescomposición, los residuos se transfieren a uno de los compartimentos de la sección de lombricompostaje, donde se adiciona el pie de cría de lombriz californiana (*E. foetida*). Es posible ajustar la cantidad de lombrices dependiendo de la rapidez con que se quiera procesar la mezcla, su disponibilidad en la zona o los recursos para conseguirlas. Se debe tener en cuenta que para procesar 1 kg de mezcla al día en condiciones favorables para la lombriz (temperatura, humedad, pH y materiales adecuados), se requieren 1,5 kg de lombrices adultas.

La duración del proceso de lombricompostaje depende de la cantidad de mezcla y de lombrices utilizadas. Tras una evaluación realizada en el proyecto, se determinó que 700 lombrices (adquiridas comercialmente y contadas 3 veces) equivalen a un kilogramo de pie de cría y que estas pueden consumir 700 gramos de mezcla en un día en condiciones adecuadas. De esta forma, para 40 kg de mezcla proveniente del módulo rotatorio, se calculó que el lombricompostado alcanzó su madurez después de ocho semanas. Teniendo en cuenta las variaciones de la cantidad de la mezcla y de las lombrices, es necesario monitorear continuamente el estado de los residuos para establecer el punto de maduración del lombricompostado.

Cada subdivisión del módulo de lombricompostaje puede alojar hasta 200 kg de mezcla precompostada, lo que equivale a 60 cm³ de material. Además, es posible agregar varias cargas de material precompostado hasta alcanzar esta cantidad de material, pero no se debe exceder la altura máxima de material para evitar el aumento de temperatura en la mezcla y la reducción de la aireación, variaciones que afectan la supervivencia de las lombrices.

Adicionalmente, es importante monitorear la temperatura y la humedad de la mezcla durante el proceso de lombricompostaje para asegurar la viabilidad de las lombrices. La temperatura óptima para el desarrollo normal de las lombrices oscila entre 20 y 25 °C. Temperaturas por debajo de este rango retrasan el proceso de lombricompostaje y temperaturas mayores a 25 °C ponen en riesgo la supervivencia de la lombriz. Durante el proceso de lombricompostaje se requiere una humedad más alta (70 % a 80 %) que en la predescomposición, puesto que las lombrices necesitan mantener su piel húmeda para respirar y moverse. No se debe exceder la cantidad de agua agregada, pues las lombrices se pueden ahogar.



En el módulo de lombricompostaje, el exceso de humedad se puede controlar gracias a la inclinación del piso, la cual proporciona un buen drenaje y permite aplicar hasta 8 l de agua para humedecer la primera capa de 20 cm de una mezcla de 65 kg y obtener 2 l de lixiviado, aproximadamente. El lixiviado recuperado en las canaletas se puede reincorporar varias veces a la mezcla durante el proceso hasta que presente un color marrón muy oscuro, que indica que el lixiviado se ha enriquecido con los ácidos húmicos y otros compuestos del lombricompostado y puede utilizarse dentro del esquema de fertilización. La frecuencia de riego dependerá de las condiciones ambientales externas. En caso de temperaturas externas superiores a 23 °C, el riego debe hacerse día de por medio y en caso de temperaturas menores, dos veces por semana.

Cuando se ha alcanzado una altura de 60 a 80 cm del lombricompostado y las lombrices se ubican en la parte superior, se aplica la primera capa de mezcla fresca a una subdivisión contigua para que las lombrices se desplacen hacia la mezcla nueva a través de la malla metálica que separa las subdivisiones. Si se desea producir lombricompostado en mayor cantidad y menor tiempo, se puede empezar llenando 2 o 3 subdivisiones y dejando las otras para sacar las lombrices del lombricompostado cuando esté listo. Cuando las lombrices descomponen todo el material, el lombricompostado está maduro. En esta instancia no se distingue el residuo original y el material adquiere una textura arcillosa.

Una vez las lombrices han completado la migración hacia el material fresco, se reduce la humedad al 40 % y se saca el lombricompostado maduro por la puerta frontal de la subdivisión. Entonces, el material puede utilizarse directamente en el cultivo o almacenarse en un lugar fresco y seco hasta por 6 meses manteniendo la humedad al 40 % y la aireación para no perder los microorganismos que enriquecen el lombricompostado.

Recomendaciones de mantenimiento del módulo de lombricompostaje

Para salvaguardar los componentes y garantizar una mayor duración del equipo, en cada uno de los sistemas se deben realizar actividades de mantenimiento periódicas. Para dicho fin, en la tabla 3.2 se brindan recomendaciones para el módulo de precompostaje y en la tabla 3.3 para el módulo de lombricompostaje.

Tabla 3.2. Recomendaciones básicas de mantenimiento para el módulo de precompostaje

Componente	Descripción	Frecuencia
Canecas rotativas	Realizar limpieza con abundante agua a cada tanque evitando que queden residuos de material ya compostado.	Cada vez que se complete un ciclo de precompost.
Estructura metálica	Revisar los componentes estructurales cerciorándose de que las columnas y los travesaños no estén oxidados o con poros que puedan afectar la integridad de la estructura.	Periódica
Rodachines	Revisar que los rodachines estén alineados y sin ningún desgaste que pueda afectar el rodamiento de los tanques. No es necesario aplicar ningún lubricante ya que son rodamientos cerrados libres de lubricación.	Periódica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Recomendaciones básicas de mantenimiento para el módulo de lombricompostaje

Componente	Descripción	Frecuencia
Submódulos de lombricompostaje	Realizar limpieza con abundante agua a cada submódulo de compostaje evitando que queden residuos de material ya compostado para evitar el deterioro del equipo y los olores no deseados.	Cada vez que se complete una fase de compostaje.
Estructura de madera	Revisar los componentes estructurales, (columnas y cerchas) con el fin de garantizar el buen estado estructural y visual de cada uno de los elementos y garantizar así su óptimo funcionamiento y durabilidad.	Periódica
Cubierta	Revisar amarres y estructura del tejado para evitar que se desintegren por acción del viento.	Periódica

Fuente: Elaboración propia