



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de una planta para el compostaje de los biorresiduos generados en un hotel en República Dominicana

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Y PROCESOS SOSTENIBLES**



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor:
Director:
Codirector:

Laura Losada Grullón
José Manuel Moreno Angosto
José Antonio Fernández López

Cartagena, 7 de julio del 2023

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mis padres y hermanos, por ser mi inspiración y creer incondicionalmente en mí. También a mi cómplice Bashir Hesni y mi mentora Altair Rodríguez.

Agradezco a mis colegas: Mateo Martinez, Jenny Garay, Maryurys Arrieta, Ana Isabel Perez y Gala Medina. Gracias por hacer este recorrido tan especial y memorable.

Agradezco a mis maestros y director por compartir sus conocimientos y demostrar pasión al enseñar. También agradezco a la UPCT, por ofrecerme el privilegio de graduarme de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Procesos Sostenibles de su institución.

Laura Losada

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster consiste en el diseño de una planta para el compostaje, que tiene como finalidad valorizar los biorresiduos generados en un hotel. En base a las limitaciones y requerimientos, se evaluaron posibles técnicas de tratamiento de biorresiduos, hasta concluir que el compostaje era la más interesante. Se incluyó el diseño de una serie de procedimientos necesarios para la implementación de la planta y los parámetros a tomar en cuenta antes y durante el proceso. El objetivo principal de esta investigación era encontrar alternativas de tratar adecuadamente biorresiduos, de manera que se contribuyera a la economía circular y se aprovechara el producto obtenido.

Abstract

The present Master's Thesis consists of the design of a composting plant aimed at valorizing bio-waste generated in a hotel. Based on the limitations and requirements, various bio-waste treatment techniques were evaluated, concluding that composting was the most interesting option. The design included a series of necessary procedures for the implementation of the plant and the parameters to be considered before and during the process. The main objective of this research was to find alternatives to properly treat bio-waste in a way that contributes to the circular economy and maximizes the utilization of the resulting product.

Índice

1. Introducción	9
2. Planteamiento del problema	12
2.1. Problemática global de la generación de residuos.	12
2.2. Generalidades de la gestión de residuos.	15
2.3. Jerarquía de Residuos y su aplicación en América Latina y el Caribe.	18
2.4. Gestión de residuos en República Dominicana.	21
2.5. Biorresiduos en República Dominicana.	26
3. Estructura del problema	30
3.1. Formulación del problema	30
3.2. Sistematización del Problema	30
4. Justificación de la investigación	31
4.1. Motivación	31
4.2. Alcance	34
5. Objetivos	36
5.1. Objetivo general.	36
5.2. Objetivos específicos.	37
5.2.1. Objetivo #1. Estudiar las características específicas de los biorresiduos generados en un hotel ubicado en República Dominicana, en cuanto a cantidad y composición.	37
5.2.2. Objetivo #2. Analizar las diferentes opciones tecnológicas para gestionar eficientemente los biorresiduos y seleccionar la más conveniente de acuerdo a las especificaciones del hotel.	37
5.2.3. Objetivo #3. Diseñar y distribuir las facilidades necesarias para la gestión de los biorresiduos en base a los requerimientos del proceso de producción y los espacios disponibles.	37
5.2.4. Objetivo #4. Elaborar una “fórmula” de mezcla óptima de biorresiduos para la ejecución del proceso de compostaje seleccionado, con los materiales disponibles en el hotel.	37
5.2.5. Objetivo #5. Diseñar diagramas y manuales de procesos para asegurar la eficiencia y productividad de las actividades necesarias para el funcionamiento de las	

facilidades.	37
6. Resultados	38
6.1. Objetivo #1.	38
6.2. Objetivo #2.	41
6.3. Objetivo #3.	53
6.4. Objetivo #4.	64
6.5. Objetivo #5.	78
7. Conclusiones	90
8. Bibliografía	92

Lista de Tablas

Tabla 1. Generación de residuos en RD por nivel de ingreso.	21
Tabla 2. Características generales de los biorresiduos.	27
Tabla 3. Cantidad de restos de comida generadas en el hotel.	38
Tabla 4. Características biorresiduos generados en el hotel.	40
Tabla 5. Comparativa entre técnica del compostaje y digestión anaerobia.	45
Tabla 6. Comparativa compostaje en pila/hilera y en lecho estático.	51
Tabla 7. Comparativa de opciones para distribución de facilidades.	62
Tabla 8. Cantidad de materiales que se deben agregar por hilera para asegurar relación C/N.	73
Tabla 9. Unidades de pala bobcat para armado de hilera.	78
Tabla 10. Temperaturas para la eliminación de patógenos.	80
Tabla 11. Usos aconsejables de compost según los materiales utilizados en el proceso de compostaje.	89

Lista de Graficos

Gráfico 1. Proyección de generación de residuos por región.	13
Gráfico 2. Composición de RU en países de ingreso medio-alto.	15
Gráfico 3. Técnicas para la gestión de residuos, por nivel de ingreso.	17
Gráfico 4. Composición de residuos urbanos en RD.	28
Gráfico 5. Rosa de los vientos en la región de Punta Cana.	55
Gráfico 6. Datos climáticos de Punta Cana (1991 - 2021).	56
Gráfico 7. Temperatura y pH durante las fases del compostaje.	68

Lista de figuras

Figura 1. Jerarquía de residuos.	19
Figura 2. Jerarquía de gestión de residuos aplicada a los biorresiduos.	33
Figura 3. Diagrama de área disponible para planta (fase 1).	42

Figura 4. Distribución de facilidades: Opción #1.	59
Figura 5. Distribución de facilidades: Opción #2.	60
Figura 6. Distribución de facilidades: Opción #3.	61
Figura 7. Dimensiones de las hileras.	72
Figura 8. Sección transversal de hilera de compostaje.	75
Figura 9. Recogida de material con pala bobcat.	77
Figura 10. Diagrama de flujo de procesos para el compostaje.	81
Figura 11. Diagrama de flujo de “Armado de hilera”.	88

1. Introducción.

El ecologista Graeme Sait afirma que el compostaje es una de las estrategias claves “para salvar el planeta”. La evidente crisis climática y ambiental debe impulsar a transformar cómo se producen y consumen los bienes y recursos, para pasar de lo degenerativo a lo regenerativo. El creciente volumen y complejidad de los residuos asociados a la economía moderna, plantea un serio riesgo para el medio ambiente y la salud humana.

La problemática ambiental derivada de la mala gestión de residuos se ha vuelto una preocupación cada vez más apremiante a nivel mundial. El rápido aumento poblacional, el desarrollo tecnológico y el aumento del consumo han dado lugar a un incremento exponencial en la generación de residuos; añadiendo la falta de prácticas adecuadas para la gestión de estos. La mala gestión abarca la falta de planificación o infraestructura insuficiente, deficiente ejecución de políticas relacionadas con la recogida, incorrecto tratamiento y disposición final de los residuos, entre otras. Esta situación conlleva a la contaminación de las aguas, los suelos y el aire, también a la degradación de ecosistemas naturales. Esta contaminación puede representar amenazas para la salud humana. La incorrecta gestión de residuos es uno de los desafíos globales que requiere el compromiso y la colaboración de gobiernos, industrias, comunidades y ciudadanos individuales. Se necesitan acciones inmediatas para abordar esta problemática y fomentar la implementación de prácticas sostenibles de gestión de residuos, incluyendo: la reducción del consumismo, la reutilización, el

reciclaje y la disposición correcta. Solo a través de un enfoque integral y sostenible se podrán mitigar los impactos negativos y construir un futuro más limpio y saludable para las generaciones venideras.

Dentro de la amplia gama de residuos están los biorresiduos, estos pueden ser tratados de distintas maneras, entre ellas el compostaje. La transformación de biorresiduos a compost es un proceso fundamental en la gestión sostenible de los desechos orgánicos. Los biorresiduos representan una gran parte de los residuos generados en hogares, empresas y comunidades. El compostaje es una técnica que permite convertir un residuo en un recurso. Este proceso natural de descomposición controlada, aprovecha la acción de microorganismos que descomponen la materia orgánica y la transforman en un material estable rico en nutrientes. Este tipo de tratamiento reduce la cantidad de biorresiduos enviados a vertederos (mayormente en países de bajos y medianos recursos), evitando la emisión de gases de efecto invernadero asociados a su descomposición anaeróbica. Además, el compost obtenido puede ser utilizado como fertilizante natural y enmienda del suelo, promoviendo la salud de los cultivos y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos. La práctica del compostaje de biorresiduos puede ser implementada a diferentes escalas, desde sistemas domésticos hasta grandes instalaciones de compostaje a nivel comunitario. Esta técnica está reconocida como parte de una estrategia integral de gestión de residuos y de transición hacia una economía circular.

Al momento de implementar una planta para el compostaje es importante tomar en cuenta un sinnúmero de factores. Es necesario evaluar: las características y cantidades específicas de los biorresiduos generados, el ambiente establecido para las operaciones, los parámetros antes y durante el proceso, la modalidad de compostaje adecuada, la aplicación del producto final, la disponibilidad de recursos del compostador, entre otras. Por lo tanto, para lograr plasmar de manera efectiva las especificidades de la planta y los procesos que se van a ejecutar en esta, es importante establecer normas y procedimientos claros. Esto incentivan a que se optimicen los recursos, se reduzcan los errores y se fomente la mejora continua en el proceso de compostaje. La estandarización de procesos en la gestión del compostaje es primordial para garantizar la eficiencia, consistencia y calidad del producto final. De manera que se contribuye a la sostenibilidad ambiental y al aprovechamiento adecuado de los biorresiduos, promoviendo así prácticas más responsables y amigables con el medio ambiente.

2. Planteamiento del problema.

2.1. Problemática global de la generación de residuos.

En el año 2016 “se generaron aproximadamente 2,01 mil millones de toneladas de residuos urbanos”, y se estima, que si se continúa con las prácticas actuales, “este número aumentará a 3,40 mil millones de toneladas para el año 2050” (Kaza et al., 2018). El crecimiento poblacional, la urbanización y el desarrollo económico son factores que inciden directamente en la generación de residuos globalmente. Esta gestión suele pasarse por alto a pesar de ser un elemento primordial para asegurar la sostenibilidad ambiental, la sanidad de las urbanizaciones y la economía circular. En los países de bajos ingresos normalmente no se implementan técnicas adecuadas para el tratamiento de residuos, en general, se reciclan aproximadamente un 4% de los desechos. En los países de ingresos más elevados se logra reciclar más de un tercio de los residuos (Kaza, et al., 2018).

Según las Naciones Unidas, a nivel mundial, se generan anualmente un aproximado de 11,2 millones de toneladas de residuos sólidos (2018). Los residuos se pueden definir como cualquier desecho generado por operaciones domésticas, mineras, comerciales, industriales, agrícolas, comunitarias, entre otras; que no suponen un "valor de uso directo" para los generadores. Las actividades humanas, en su mayoría, dejan algún tipo de residuo, y si estos no son manejados y tratados de manera

adecuada pueden ocasionar riesgos tanto a la salud como al medio ambiente. Los residuos sólidos no se limitan únicamente a desechos físicamente sólidos, ya que en su mayoría están acompañados de residuos líquidos, semisólidos o materiales gaseosos contenidos (EPA, 2023). En el siguiente gráfico se muestran las proyecciones de la cantidad de residuos que se estima serán generados en años futuros (en millones de toneladas por año), para cada región del mundo.

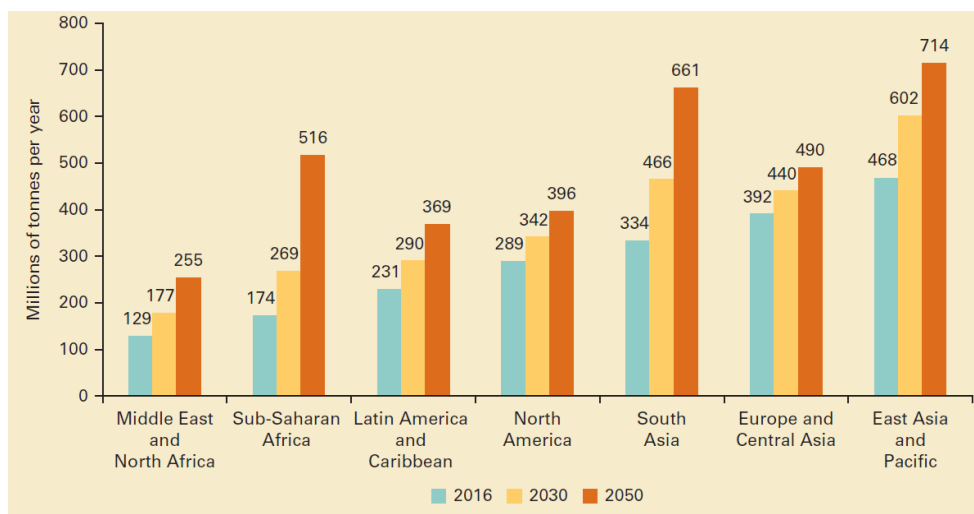


Gráfico 1. Proyección de generación de residuos por región.

Fuente: *What a Waste 2.0, 2018.*

Como se puede observar en el gráfico anterior, en todas las regiones se estima un crecimiento exuberante en tan solo unos años de diferencia, si se continúan tomando por alto las medidas de prevención y gestión de residuos. Para asegurar la sanidad del medio ambiente y por tanto de los humanos, es de suma importancia que se investiguen y empleen soluciones inmediatas para reducir y tratar los desechos; mediante la educación del consumidor y el correcto manejo de aquellos residuos

“inevitables”. La gestión correcta de los residuos también tiene un impacto positivo económicamente. Silpa Kaza, especialista en desarrollo urbano, manifestó que *“los desechos no recogidos y mal eliminados tienen un impacto significativo en la salud pública. El costo de abordar ese impacto es mucho más elevado que el de elaborar y hacer funcionar sistemas sencillos y adecuados de gestión de desechos. Las soluciones existen.”*

Existen distintos tipos de residuos, estos se pueden seccionar por su procedencia de generación. Pueden ser generados por la extracción y procesamientos de materias primas, por el consumo de productos finales, por actividades humanas urbanas, agrícolas y sociales, entre otras. Los residuos procedentes de actividades humanas urbanas (RU), consisten en aquellos “desperdicios” que son generados en: hogares, establecimientos de servicios, construcciones y demoliciones, sitios comerciales y de servicios, entre otras. De manera genérica la composición de los RU se podría resumir en: fracción orgánica (restos de comida y origen vegetal), papel y cartón, vidrio, metal, plástico, caucho y cuero, madera y otros. La cantidad de un tipo de residuo generado dependerá mucho del país y sus condiciones, aun así se ha comprobado que el nivel de ingreso de un país y la composición de sus residuos están relacionados. La fracción orgánica representa más del 50% de los residuos en los países de ingreso bajo, medio-bajo y medio-alto; mientras en los países de altos ingresos representa un aproximado de 32%. En

cambio, los materiales reciclables (plástico, papel y cartón, madera, metal y vidrio) en países de bajo, medio-bajo y medio-alto ingreso ocupa un 16% de los residuos y en países de altos ingresos hasta un 50%. El siguiente gráfico muestra los porcentajes de la generación de cada tipo de residuo mencionado, en países de ingresos medio-alto (República Dominicana es un país de ingreso medio-alto).

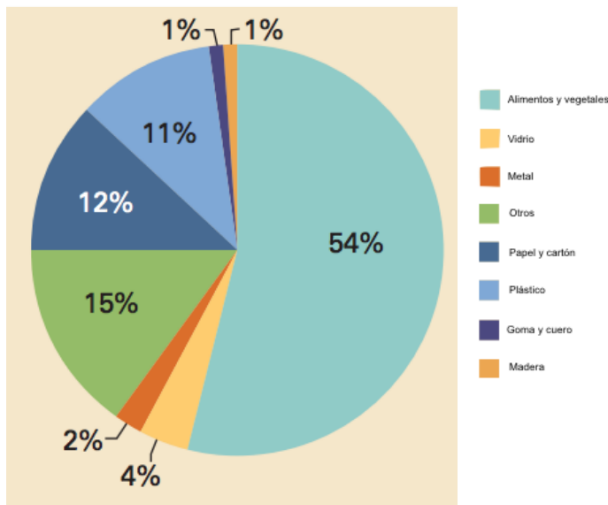


Gráfico 2. Composición de RU en países de ingreso medio-alto.

Fuente: *What a Waste 2.0, 2018*.

2.2. Generalidades de la gestión de residuos.

La gestión de residuos comprende todas las actividades y procesos necesarios para manejar estos desde su generación hasta su disposición final. Esta gestión debe incluir la recogida, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final; además, el monitoreo y la regulación durante todo el proceso de manejo. El objetivo principal de la gestión de residuos es minimizar el impacto negativo que pueden tener estos para la

sanidad pública y el medio ambiente, mientras que se aprovechan los recursos y se promueve la sostenibilidad. Es esencial tomar en cuenta el marco legal y normativo correspondiente a cada región y/o país, al momento de implementar técnicas o procedimientos específicos para el manejo.

Tras la generación de los residuos, la recolección es la primera etapa necesaria para gestionarlos. La entidad encargada recolecta y transporta los residuos a sitios de disposición o tratamiento. El sistema de recolección puede ser variable, sin embargo, las modalidades más habituales de recolección de RU son: la recolección a domicilio (puerta-a-puerta) y la recolección por contenedores centrales; dependiendo del país el tipo de recogida puede ser distinto. Esta etapa de transporte de los residuos es la más costosa de todo el proceso de gestión. Por lo tanto, mejorar los servicios de recolección de residuos es un paso esencial para reducir costes, reducir contaminación, mejorar la salud humana y en muchos casos la congestión del tráfico.

Luego que se ejecuta la recogida y el transporte de los residuos, se debe proceder al almacenamiento, tratamiento y/o disposición final de estos. Existen numerosas técnicas para la gestión, entre las más comunes están: reciclaje, compostaje, incineración, vertedero, digestión anaerobia (poder calorífico), relleno sanitario, vertederos a cielo abierto y otros. A

nivel global, los vertederos a cielo abierto son los más utilizados, aun siendo de los más riesgosos y menos sostenibles. Las prácticas de disposición de residuos varían significativamente según el nivel de ingreso del país y la región donde se encuentre. Los vertederos a cielo abierto son empleados con más frecuencia en los países de bajos y medianos ingresos. En cambio, los países de ingresos más altos, en su mayoría, gestionan los residuos mediante la transformación y valorización de materiales; a través del reciclaje y el compostaje, o la incineración para la valorización energética. En el siguiente gráfico se pueden apreciar las técnicas más comúnmente utilizadas para la gestión de residuos según el nivel de ingreso del país.

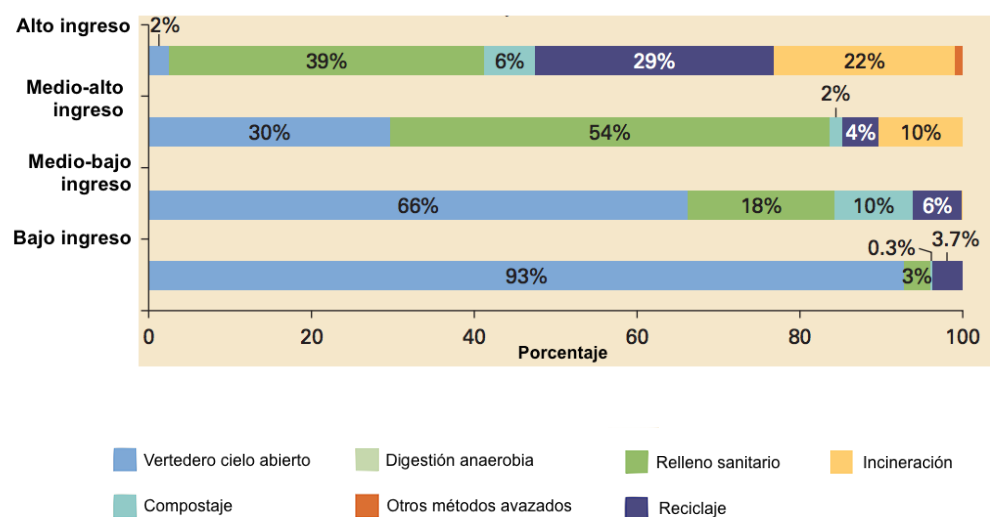


Gráfico 3. Técnicas para la gestión de residuos, por nivel de ingreso.

Fuente: *What a Waste 2.0, 2018.*

Debido a la cantidad de residuos generados y su mala gestión, se estima que “se generaron 1,6 mil millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero” en el año 2016. Esto se debe primordialmente a la

gestión de residuos mediante vertederos a cielo abierto y rellenos sanitarios sin sistemas de captura de gas del vertedero (Kaza *et al.*, 2018).

2.3. Jerarquía de Residuos y su aplicación en América Latina y el Caribe.

La jerarquía de residuos es un conjunto de prioridades para el uso eficiente de recursos a partir del tratamiento de residuos, esta sustenta los objetivos de la Ley de Prevención de Residuos y Recuperación de Recursos de la Unión Europea. La jerarquía fue introducida con la finalidad de representar las prácticas más óptimas y menos óptimas al momento de gestionar residuos. Se presenta en forma de pirámide invertida, con las opciones más preferibles, en el extremo superior y con las menos preferibles, en el extremo inferior.

La jerarquía de residuos se puede resumir en tres secciones: prevención, valorización (con tres sub apartados) y eliminación. La primera consiste en la prevención y las acciones a tomar con el fin de evitar y reducir la cantidad de residuos generados por hogares, industrias y todos los niveles de gobierno. Luego le sigue la recuperación de recursos (valorización), en la cual se encuentran la reutilización, el reciclado y otros tipos de valorización. La reutilización consiste en preparar los residuos para que estos puedan ser reutilizados en su forma original. El reciclaje consiste en el procesamiento de los residuos para convertirlos en nuevos productos utilizables (como el compostaje). Otros tipos de valorización

consiste en la incineración, digestión anaerobia, gasificación o pirólisis para recuperar energía o materiales (como biogás); a partir de los residuos. Por último, se encuentra la eliminación, que consiste en la solución de último recurso cuando los materiales no pueden ser reutilizados, reciclados o recuperados para obtener energía; entonces se procede a depositar los residuos en vertederos, rellenos sanitarios o incineradoras (sin recuperación de energía). Este es un método insostenible de gestión, ya que esta acumulación puede seguir teniendo un impacto medioambiental y de salud perjudicial.

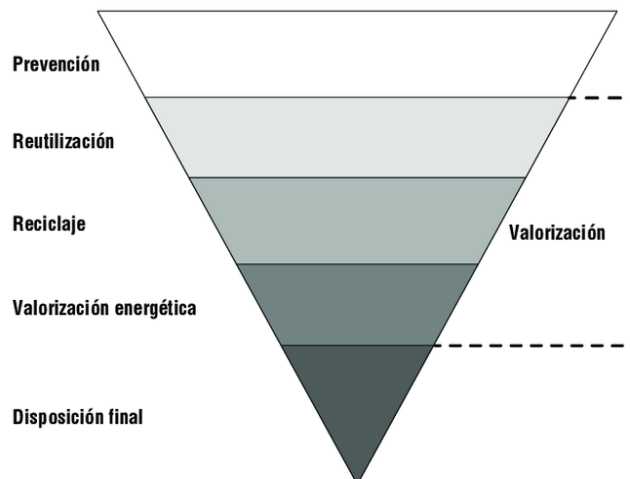


Figura 1. Jerarquía de residuos.

Fuente: Ossio, 2019.

En algunos países se están implementando medidas con el objetivo de cumplir con esta jerarquía de residuos, en la cual la prevención y la reutilización son predominantes al momento de gestionar residuos. Sin embargo, en regiones con países de menores ingresos, como es la región

de América Latina y el Caribe, aún no se implementan medidas para lograr dichos objetivos.

La región de América Latina y el Caribe está compuesta por cuarenta y dos países ubicados entre América del Sur y las islas del Caribe (región a la que pertenece República Dominicana). Los sistemas de gestión de residuos en esta región se encuentran en proceso de modernización, las técnicas empleadas varían según el nivel de ingreso de cada país. El reciclaje es común en la región, excepto en las islas del Caribe, donde los mercados de reciclaje aún se encuentran en temprano desarrollo.

En esta región, el 52% de los residuos son gestionados en rellenos sanitarios, 26,8% en vertederos a cielo abierto, 15% en vertederos controlados, 4,5% reciclados, 1,5% en vertederos no especificados y menos de 1% es compostado (Kaza *et al.*, 2018). Esto quiere decir que, en cuanto al objetivo descrito en la jerarquía de residuos (pirámide invertida), en esta región del mundo la pirámide sigue prácticamente “derecha”. Es decir, la técnica de gestión más utilizada son los rellenos sanitarios y los vertederos a cielo abierto (controlados y no controlados), siendo estas las técnicas menos recomendadas para la gestión de residuos debido a la amenaza que supone al medio ambiente y a la sanidad pública. Estos métodos de “eliminación” suponen un enorme problema, especialmente para las islas del Caribe, debido a las altas ocurrencias de desastres naturales en esta región.

2.4. Gestión de residuos en República Dominicana.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Ministerio de Economía de República Dominicana (RD), para el año 2017 se estima que el 72,6% de los residuos fueron gestionados en vertederos a cielo abierto, 8,2% reciclado y el 0,1% restante mediante rellenos sanitarios. En esta isla del Caribe se encuentra uno de los cincuenta vertederos más grandes del mundo (*United Nations Environment Programme*, 2015). Este método de gestión de residuos representa una grave amenaza para la salud humana y el medio ambiente, y no debe ser considerado simplemente un problema local. La isla tiene un aproximado de 11,12 millones (2021) de habitantes, y se estima que la generación de residuos por habitante-día depende estrechamente del nivel de ingreso del ciudadano. En la siguiente tabla se muestra la generación de residuos por habitante dominicano, según su nivel de ingreso.

Tabla 1. Generación de residuos en RD por nivel de ingreso.

Nivel de ingreso	Generación de residuos (kg/habitante-día)
Bajo ingreso	0,7
Mediano ingreso	0,85
Alto ingreso	1,2

Fuente: *Berigüete, 2010.*

En las islas del Caribe, debido a los altos índices de turismo durante el año, las tasas de generación de residuos aumentan significativamente. Está comprobado que este sector es responsable de una cantidad

significativa de generación de residuos debido a la gran cantidad de personas que se hospedan en los hoteles y los servicios que se disponen. Se estima que en República Dominicana se generan un estimado de 10 mil toneladas de residuos al día (Wolf, 2018), aunque no existen datos sobre la cantidad exacta que corresponde al sector hotelero. En esta isla, el turismo es uno de los sectores que más aporta a la economía del país, representando hasta un 16% del Producto Interno Bruto (UNWTO, 2020). En general, anualmente se estima que llegan más de 6 millones de turistas al país (2019).

Actualmente, en la República Dominicana, existen aproximadamente 354 vertederos, dentro de los cuales la mayoría son vertederos a cielo abierto que no cumplen con las exigencias mínimas de normas sanitarias y ambientales (Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales, 2014). Estos representan focos de una inmensa polución ambiental y una seria amenaza para la salud de los habitantes. Además, son fuente de conflictos sociales y económicos en el país. Se genera disparidad entre los ayuntamientos y las empresas de gestión con los “recicladores”, ya que viven de la extracción manual informal y venta de residuos reciclables que llegan a los vertederos.

La Ley General Sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales (64-00) dominicana del año 2000, especifica que los ayuntamientos son los

encargados de realizar operaciones de recogida, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos urbanos no peligrosos en cada municipio; enfatizando la prohibición de colocación de estos residuos en ubicaciones no establecidas. La recogida y transporte se hace por rutas, en las cuales los operadores van tomando los contenedores de residuos urbanos para vertirlos por la parte trasera del camión compactador, los contenedores son iguales ya que no existe la separación en origen. Este proceso ocupa aproximadamente quince horas diarias, y, dependiendo de cada sector o municipio se realizan mañana día y/o noche (Ciudad Alternativa, 2019). En muchos casos, las recogidas durante el día causa mucho tráfico y desorden en las vías automovilísticas, especialmente en las ciudades más pobladas. Se estima que en las ciudades más grandes de RD, como lo son Santo Domingo y Punta Cana, el 85% de los residuos son recogidos; mientras en las comunidades rurales la recogida de residuos es de aproximadamente un 30% (Kaza, *et al.*, 2018).

La Ley 64-00 también establece que las ubicaciones designadas para el vertido de residuos deberán encontrarse alejadas de establecimientos humanos, a mínimo 1.500 metros de distancia. Sin embargo, en el país existen vertederos instalados a menos de 300 metros de asentamientos humanos (Alcantara, 2012). El mal manejo y la mala ubicación de los vertederos en República Dominicana causan impactos ambientales negativos, como el deterioro de los suelos, aire y aguas; es por esto que

la gestión de residuos precisa un abordaje integral. Consecuentemente, los efectos medioambientales suponen un gran impacto para la salud pública y social. Está comprobado que los vertederos existentes en el país causan *“presencia de gérmenes patógenos, proliferación de insectos y roedores, degradación estética del paisaje, emisiones de olores nauseabundos, producción de lixiviados y de gases con efecto invernadero que contribuyen al cambio climático”*. El manejo incorrecto de residuos implica altos costos, tanto sociales como económicos, ya que pueden causar *“muertes, enfermedades, reducción de los años de vida, generación de gastos médicos, disminución de la productividad, alteración del estado físico y mental, entre otros”* (Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales, 2014).

En el año 2022, mediante el decreto 62-21, se anunció el cierre definitivo del vertedero de cielo abierto ubicado en Veron-Punta Cana; siendo esta una de las regiones más turísticas del país. Este acontecimiento se reconoció como muy deseado por los habitantes del lugar y sus alrededores, ya que este vertedero ocasionaba numerosos problemas medioambientales y sociales desde hace más de 20 años. El director distrital de Verón-Punta Cana afirmó que uno de los grandes problemas que representaba el vertedero era que los lixiviados llegaban a las aguas subterráneas, poniendo en peligro las playas cercanas; siendo estas una de las mayores atracciones turísticas de la región (Ramírez, 2022).

Con el objetivo de prevenir la generación de residuos se aprobó la Ley General de Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos del 2020. Esta busca *“establecer el régimen jurídico de su gestión integral para fomentar la reducción, reutilización, reciclaje, aprovechamiento y valorización, así como regular los sistemas de recolección, transporte y barrido; los sitios de disposición final, estaciones de transferencia, centros de acopio y plantas de valorización; con la finalidad de garantizar el derecho de toda persona a habitar en un medio ambiente sano, proteger la salud de la población, así como disminuir la generación de gases de efecto invernadero, emitidos por los residuos.”* Mediante la implementación de un Plan Nacional para establecer *“programas de recuperación, reúso, reciclaje, aprovechamiento energético u otro medio de valorización para los residuos”*. También para ejecutar programas sectoriales, sistemas de depósito-devolución-retorno, elaboración de empaques y embalajes con materiales posteriormente valorizables, entre otras. Sin embargo, aunque en las leyes vigentes se asignan responsabilidades hacen falta sistemas que aseguren el cumplimiento de las mismas. La legislación ambiental actual no es lo suficientemente estricta para que se ejecute una adecuada disposición de residuos producidos a nivel nacional (Skoddow, 2014). No existen incentivos para la valorización y correcta gestión de desechos que fomente el seguimiento de la jerarquía de residuos.

2.5. Biorresiduos en República Dominicana.

La Ley General de Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos de República Dominicana, define los residuos orgánicos como todo residuo que sea biodegradable. Dentro de la amplia gama de los residuos orgánicos biodegradables se encuentran los biorresiduos. El MITECO (*Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico*) define los biorresiduos como *“los residuos orgánicos biodegradables de origen vegetal y/o animal, susceptibles de degradarse biológicamente generados en el ámbito domiciliario y comercial.”* Los biorresiduos están compuestos generalmente por la fracción orgánica (restos de comida) y el material verde (residuos de poda). Los residuos de origen alimenticios son procedentes de hogares, restaurantes, hoteles, entre otros; e incluyen materiales como: restos de comida, subproductos sobrantes de la preparación de comida, alimentos en malas condiciones, restos vegetales de tamaño reducido, poda con características similares a los restos de comida, entre otros. Los biorresiduos de poda incluyen materiales como: restos vegetales procedentes jardinería y poda de mayor tamaño.

En general, se utiliza el término biorresiduos para definir la fracción orgánica de residuos urbanos, aunque también pueden ser generados a nivel comercial. Mientras el biorresiduo contenga el mismo carácter que el urbano puede ser considerado un biorresiduo. Los restos de comida son

un tipo de biorresiduos, y son una fracción uniforme, debido a su elevado contenido de agua y materia orgánica, además de la variabilidad de factores del que depende. Es decir, la composición puede variar por los hábitos alimentarios, por los cambios estacionales, por el almacenamiento que se les otorgue, entre otras; pero, de manera general se les puede atribuir las siguientes características:

Tabla 2. Características generales de los biorresiduos.

Características	Biorresiduos	
	Origen alimentario	Origen poda
Humedad	75% - 85%	20% - 40%
Materia orgánica	75% - 85%	80%
Nitrógeno orgánico	5,50%	1,20%
Relación C/N	17	32
Densidad	0,6 a 0,8 t/m ³	0,3 a 0,4 t/m ³ (triturada)
Mal olor/lixiviados	Sí	No
Generación	Constante (pero no uniforme en tipología y composición)	Estacional

Fuente: *Giró, 2007.*

Los biorresiduos de origen alimentario contienen altas densidades, normalmente entre 0,6 y 0,8 t/m³ (tonelada por metro cúbico). Pero la densidad puede descender hasta 0,25 a 0,3 t/m³ si la fracción seleccionada contiene restos vegetales. Esto quiere decir que es un residuo que puede pesar bastante pero al mismo tiempo ocupar poco espacio, resultando en un material poco compactable.

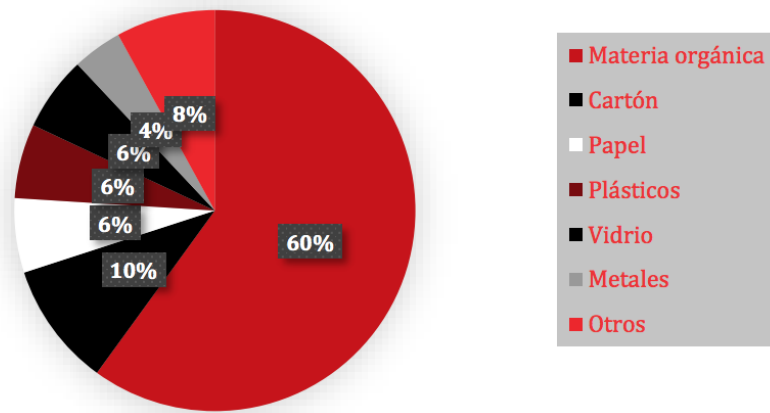


Gráfico 4. Composición de residuos urbanos en RD.

Fuente: *MARENA, 2015.*

En la República Dominicana, se estima que los biorresiduos (materia orgánica) ocupan alrededor de un 60% de los residuos urbanos generados a nivel nacional (gráfico 4). Esto quiere decir que más del 50% de los residuos urbanos son valorizables. Sin embargo, en el país la mayoría de estos residuos son depositados en vertederos a cielo abierto.

En los sistemas alimentarios globales, el desperdicio de alimentos se presenta como un gran problema que causa numerosos desafíos para: la seguridad alimentaria, la higiene de alimentos, la economía y la sostenibilidad ambiental. Se estima que el 30% de los alimentos generados a nivel mundial se pierden o se desperdician (FAO, 2015). En la producción de alimentos se consume tierra, agua, mano de obra y energía; por lo tanto el desperdicio de alimentos también se traduce en desperdicios de otros recursos esenciales. Además, contribuye al

calentamiento global, ya que se emiten gases de efecto invernadero durante las actividades de producción y distribución de alimentos; además, se libera metano durante la descomposición de los alimentos desperdiciados. La descomposición de la fracción de biorresiduos procedentes de restos de comida contribuye aproximadamente un cinco por ciento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Kaza *et al.*, 2018). Minimizar los desperdicios alimenticios y gestionar correctamente aquellos generados (otorgándoles valor mediante productos reutilizables) podría generar importantes beneficios en términos de seguridad alimentaria y medio ambiente.

3. Estructura del problema.

3.1. Formulación del problema.

¿Cómo diseñar una planta para la gestión de los biorresiduos (fracción de restos de comida) producidos en un hotel en República Dominicana?

3.2. Sistematización del Problema.

- ¿Cuáles son las características que se deben considerar para definir la gestión óptima de los biorresiduos generados en el hotel?
- ¿Qué tipo de procesado es conveniente para la gestión de los biorresiduos generados en el hotel?
- ¿Cuál es la ubicación y el área óptima para la instalación de una planta de procesamiento de biorresiduos en el hotel?
- ¿Cuáles son los parámetros que se deben considerar para definir el procesado adecuado?
- ¿Qué herramientas se deben implementar para la estandarización de los procesos establecidos?

4. Justificación de la investigación.

4.1. Motivación.

República Dominicana es uno de los países más vulnerables al cambio climático, es una de las islas que se ve y se verá más afectadas a nivel global (*Global Climate Risk Index, 2016*). La alta generación y la mala gestión de residuos incide de manera directa en la problemática mundial de los efectos del calentamiento global. El sector hotelero es uno de los responsables del aumento de la generación de residuos en países con altos flujos turísticos. República Dominicana es un país que se sustenta a nivel económico y social en el turismo, por lo tanto, asumir un sistema más sostenible especialmente en los puntos más turísticos de la isla es primordial. Investigar e implementar alternativas para ir paulatinamente sustituyendo los métodos convencionales por técnicas más sostenibles es fundamental; con el objetivo de reducir el impacto de la actividad hotelera en el medio ambiente y permitiendo que esta isla pueda seguir explotando su potencial turístico. El Distrito Municipal Verón-Punta Cana, donde se encuentra ubicado el hotel, genera diariamente aproximadamente 510 toneladas de residuos. Se estima que más del 50% de estos son orgánicos y provienen, en su mayoría, de restos alimenticios que se utilizan en las cocinas de diferentes tipos de establecimientos tales como: restaurantes, hoteles y otros vinculados al sector turístico. El 70% de los residuos generados por el sector hotelero va directamente a vertederos. En este Distrito existe un incremento exponencial de la generación de

desechos, y esta se atribuye al elevado crecimiento que exhibe, ya que *“para el 2019 contaba con más de 100 mil habitantes como residentes y más de 50 mil habitaciones hoteleras a lo largo de sus 40 kilómetros de costa”* (Figueroa, 2019).

El hotel en cuestión está efectuando cambios en todas sus actividades para lograr una modalidad de turismo más resiliente y sostenible, basado en los fundamentos de la economía circular. Entienden que es esencial cuidar las playas, costas y océanos, especialmente siendo un hotel ubicado en el mar Caribe. En el entorno existe mucha biodiversidad, flora y fauna, por lo tanto las medidas que fomentan su conservación tienen una gran importancia. Asumen como fundamental adoptar una economía regenerativa y reparadora, mediante: la eliminación de uso de plásticos (de un solo uso), la instalación de fuentes de agua para fomentar la reutilización y la instalación de una planta para el compostaje. El objetivo de esta empresa es ser libres de residuos enviados a vertederos para el año 2025.

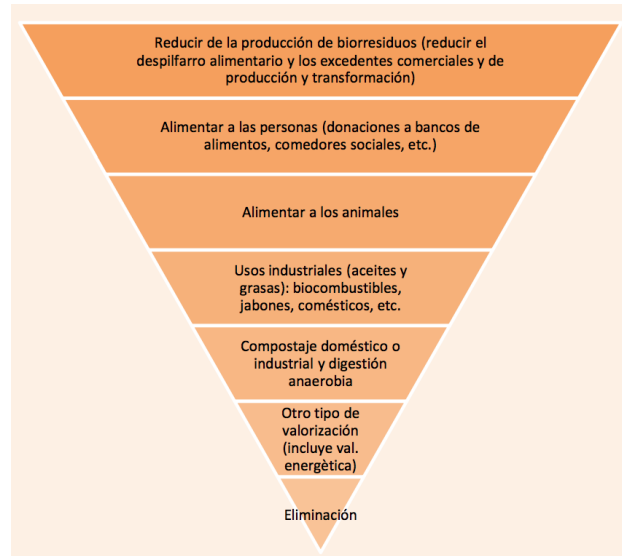


Figura 2. Jerarquía de gestión de residuos aplicada a los biorresiduos.

Fuente: MAPA, 2013.

En la figura anterior (2), se muestra la adaptación de la jerarquía de residuos a únicamente la gestión de biorresiduos. En esta se puede observar que las primeras medidas son la reducción de la generación de residuos y el aporte de productos alimenticios a personas que más lo necesiten. En el hotel, con el fin de alcanzar el ODS (*Objetivo de Desarrollo Sostenible*) #12 de las Naciones Unidas (*“garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”*), se han tomado medidas para la reducción de la pérdida y el desecho de alimentos procedentes de sus restaurantes y comedores. Aun así, existe una cantidad de biorresiduos que no es posible reducir, es por esto que tienen programas de colaboración para coleccionar aquellos productos alimenticios que se encuentran en condiciones higiénicas, y pueden aprovecharse por personas que lo necesiten; contribuyendo así al ODS

#2 (hambre cero). Además, para aquellos productos alimenticios que no se encuentran en condiciones para el consumo humano, han implementado programas de donación a granjas de animales para la alimentación del ganado de

En este hotel más del 50% de los residuos generados son biorresiduos, es decir, asimilables a los RU. Estos tienen el potencial de ser valorizados mediante distintos métodos para minimizar el impacto negativo en el medio ambiente. Para el hotel es una motivación aplicar medidas posteriores a las antes expuestas para fomentar la valorización de los biorresiduos, especialmente los procedentes de restos de comida, evitando enviar estos al vertedero. Como consecuencia de gestionar adecuadamente los biorresiduos, la empresa logra moverse un paso más hacia el objetivo de ser una empresa de residuo cero.

Es importante recalcar que el objetivo principal del hotel es emplear un sistema para la gestión específica de los restos de comida generados; los demás biorresiduos producidos por las operaciones normales del hotel pueden ser utilizados para el proceso, sin embargo no es el enfoque principal.

4.2. Alcance.

Esta investigación abarcará todas las actividades necesarias para la implementación de una planta para la gestión de biorresiduos

(específicamente los restos de comida) producidos en un hotel ubicado en República Dominicana. Se estudiarán brevemente los posibles procesos para la transformación de biorresiduos, mediante la valorización, hasta seleccionar el más óptimo de acuerdo a las condiciones y limitantes del hotel. También, se detallarán los insumos necesarios y las actividades a ejecutar para la transformación y valorización de estos. Con el fin de lograr el cumplimiento del objetivo de la empresa, el cual consiste en no enviar biorresiduos al vertedero y aportar a la economía circular. Además, la obtención de un producto valorizable que puede ser posteriormente aprovechado dentro de las facilidades. Esto se realizará mediante la investigación y la aplicación de distintas herramientas, con el fin de diseñar una cadena de procesos ideal para asegurar, en base a los requerimientos del hotel, eficiencia de las actividades a ejecutar manteniendo la calidad del producto final.

5. Objetivos.

5.1. Objetivo general.

Diseñar una planta para el compostaje de los biorresiduos (fracción de restos de comida) generados en un hotel en República Dominicana, con objeto de contribuir a la economía circular y aprovechar el producto obtenido.

5.2. Objetivos específicos.

- 5.2.1. Objetivo #1.** Estudiar las características específicas de los biorresiduos generados en un hotel ubicado en República Dominicana, en cuanto a cantidad y composición.
- 5.2.2. Objetivo #2.** Analizar las diferentes opciones tecnológicas para gestionar eficientemente los biorresiduos y seleccionar la más conveniente de acuerdo a las especificaciones del hotel.
- 5.2.3. Objetivo #3.** Diseñar y distribuir las facilidades necesarias para la gestión de los biorresiduos en base a los requerimientos del proceso de producción y los espacios disponibles.
- 5.2.4. Objetivo #4.** Elaborar una “fórmula” de mezcla óptima de biorresiduos para la ejecución del proceso de compostaje seleccionado, con los materiales disponibles en el hotel.
- 5.2.5. Objetivo #5.** Diseñar diagramas y manuales de procesos para asegurar la eficiencia y productividad de las actividades necesarias para el funcionamiento de las facilidades.

6. Resultados.

6.1. Objetivo #1.

Con el fin de cumplir con el primer objetivo, que implica estudiar las características específicas de los biorresiduos generados en el hotel (en cuanto a cantidad y composición); se realizó el siguiente análisis.

Las actividades que dependen del turismo están sometidas a variaciones estacionales, por lo tanto, variaciones en la cantidad de residuos generados. En las temporadas donde los complejos hoteleros reciben más clientes la generación de residuos aumenta. Es decir, la cantidad de residuos generados varía con relación a la afluencia de huéspedes en los establecimientos turísticos. En el caso del hotel en cuestión, la generación diaria (por temporada) de la fracción de biorresiduos procedentes de restos de comida es mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 3. Cantidad de restos de comida generadas en el hotel.

Temporada	Meses	Cantidad (kg/día)
Baja	Febrero, marzo, mayo, octubre	2.700
Media	Enero, abril, septiembre, noviembre	3.900
Alta	Junio, julio, agosto, diciembre	4.600

Fuente: *Propia, 2023.*

Los datos anteriormente expuestos resultan en una cantidad estimada de 1.367.100 kg/año equivalente a 1.367 Tn/año de restos de comida que se quiere prevenir, donar y valorizar mediante un tratamiento adecuado.

Adicional a la fracción de los biorresiduos que corresponde a los restos de comida, el hotel también genera los siguientes biorresiduos que pueden ser aprovechados para el tratamiento de los restos de comida:

- Grama y hojas verdes procedentes de la poda de los espacios de jardinería dentro del hotel.
- Borra de café (restos de grano de café molido tras el colado) procedentes de los restaurantes y cafeterías dentro del hotel.
- Ramas y hojas secas procedentes de la poda y barrido de suelos de los espacios de jardinería dentro del hotel.
- Hojas de coco procedentes de las palmas de coco que se encuentran por todo el hotel y las playas en las que desemboca el hotel.

El hotel no tiene datos exactos de la cantidad que se genera de cada biorresiduo mencionado. Sin embargo, estiman:

- 5.000 kg/día de grama y hojas verdes
- 800 kg/día de borra de café
- 5.000 kg/día de ramas y hojas secas
- 5.000 kg/día de hojas de coco

El protocolo para el manejo de los biorresiduos de hotel consiste en: formación, separación en la fuente, recolección, triturado (específicamente de las hojas de coco), almacenamiento, transporte y disposición final. Estos tienen un sistema de depósito en contenedores tras la formación de los biorresiduos, en los cuales logran almacenar cada material por separado. Previo al almacenamiento, el material es triturado con la finalidad de reducir su volumen y facilitar su manejo.

Las características generales de los biorresiduos recolectados por el hotel, basados en la bibliografía consultada, se pueden resumir en la siguiente tabla.

Tabla 4. Características biorresiduos generados en el hotel.

Tipo de material	Material	Nitrogeno (%)	Carbono (%)	C:N	Contenido Humedad (%)	Densidad Kg/m3	Fuente
Materiales ricos en nitrógeno	Restos de comida	2.50	37.5	15	69	830.6	NRAES. 1992. On-Farm Composting Handbook
	Gramma y hojas verdes	0.61	10.4	17	80	296.6	On-Farm Composting HandBook (Spartan Compost Recipe)
	Borra de café	2.00	40	20	70	308.0	Tabla Cornell
Materiales ricos en carbono	Ramas y hojas secas	1.00	53.0	53	15	254.5	NRAES. 1992. On-Farm Composting Handbook (Datos Valor Tipico)
	Hoja de coco (triturada)	1.14	40.0	35	50	400.0	USDA NRCS National Engineering Handbook (NEH) part 651, Ag Waste Management Field Handbook

Fuente: *Propia, 2023.*

Como se observa en la tabla anterior, los restos de comida, la grama y hojas verdes y la borra de café son materiales que aportan mayormente una fuente de nitrógeno. Adicionalmente, la borra de café es un material que permite evitar la llegada de roedores y moscas; e influye en la

reducción de posibles malos olores. Por otro lado, las hojas de coco y las ramas y hojas secas son los materiales que aportarán una fuente de carbono.

6.2. Objetivo #2.

Para lograr seleccionar la tecnología más adecuada para la gestión de los biorresiduos, procedente de los restos de comida, es de suma importancia tomar en cuenta: la disponibilidad de infraestructura, la cantidad y tipos de biorresiduos que se requiere gestionar, la calidad necesaria del producto final y sobre todo los recursos disponibles.

En el caso del hotel en cuestión, el objetivo principal consiste en gestionar adecuadamente los restos de comida (no donados) que generan a diario por las operaciones normales del hotel, evitando el transporte y depósito en vertederos. Su limitante principal son los recursos, es decir, no contemplan una gran inversión inicial para la instalación de la planta de gestión de biorresiduos; buscan una opción económica y funcional. En este caso, la disponibilidad de área para la planta no supone una limitante, ya que disponen de varios espacios de gran tamaño. Sin embargo, el hotel desea destinar, inicialmente, un terreno de 770 m² para el inicio de las operaciones. Es decir, tienen como objetivo ejecutar una primera fase dentro de este espacio; pero, disponen de otros espacios más amplios que estiman acondicionar y habilitar para ampliar las operaciones, con el fin de lograr gestionar los restos de comida en su

totalidad. Por lo tanto, es necesario evaluar la cantidad de restos de comida que pueden ser gestionados en el espacio, para en un futuro escalar la planta y gestionar todos los restos de comida que generan diariamente. Este espacio se encuentra distribuido de la siguiente manera:

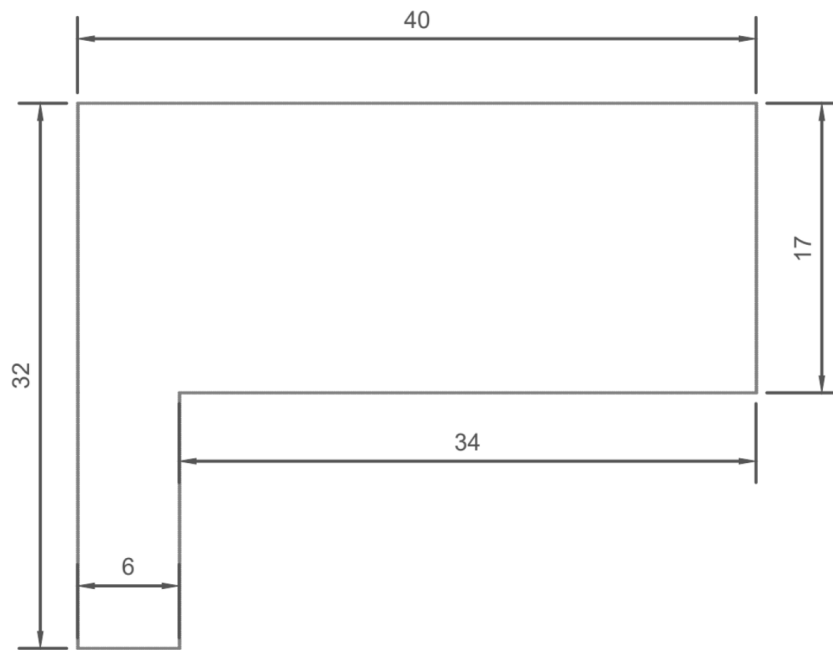


Figura 3. Diagrama de área disponible para planta (fase 1).

Fuente: Propia, 2023.

El espacio consiste en dos espacios rectangulares adyacentes, uno con un área de 680m^2 y otro con un área de 90m^2 ; sumando los 770m^2 disponibles para ejecutar la primera fase de la planta. Este espacio se encuentra impermeabilizado con un piso de cemento con una ligera pendiente que permitirá la recogida de lixiviados que se pudieran generar durante el compostaje. El área cuenta con un techo de aproximadamente

3 metros de altura impidiendo la entrada de agua por lluvias y el exceso de exposición al sol.

Existen varias opciones tecnológicas para gestionar los biorresiduos de manera efectiva y sostenible. Entre las más comunes se encuentran:

- **Compostaje:** proceso biológico de descomposición, con presencia de oxígeno, de los biorresiduos mediante microorganismos en condiciones de humedad, ventilación y temperaturas monitorizadas; que resulta en un material higienizado (compost) rico en nutrientes que puede utilizarse como fertilizante orgánico (Roman, *et al.*, 2013). Se puede emplear en hogares a pequeña escala o en plantas de compostaje a gran escala.
- **Digestión anaerobia:** es un proceso de descomposición de los biorresiduos en ausencia de oxígeno, generando biogás y digestato. El biogás puede ser empleado como fuente de energía y el digestato puede ser utilizado como fertilizante (Soliva, 2011).
- **Incineración con recuperación de energía:** es el proceso mediante el cual se queman los residuos a altas temperaturas, generando calor que se utiliza para producir electricidad o calor para uso industrial (Roman, *et al.*, 2013).
- **Tecnologías de pirólisis:** es un proceso anaerobio (en ausencia de oxígeno) de descomposición térmica de los biorresiduos. Se pueden obtener diversos productos, como biochar (carbón

vegetal), gases y líquidos, que pueden tener diferentes aplicaciones (Soliva, 2011).

Al momento de seleccionar una de estas tecnologías, es importante adoptar un enfoque de jerarquía de biorresiduos. Tras la priorización de la reducción y la alimentación, las tecnologías de tratamientos recomendadas son: el compostaje y la digestión anaerobia. En la siguiente tabla comparativa se muestran algunas características sobre los sistemas de compostaje y los sistemas de digestión anaerobia.

Tabla 5. Comparativa entre técnica del compostaje y digestión anaerobia.

Características	Digestión Anaerobia	Compostaje
Pre-tratamiento	Puede ser necesario un triturado previo o algún tipo de tratamiento térmico.	Puede ser necesario un triturado previo.
Materia prima	Necesidad de bajo contenido en materia seca y elevado contenido en materia orgánica biodegradable.	Necesidad de materiales complementarios que aporten porosidad, equilibren humedad y proporción C/N. Los restos vegetales de jardinería y poda son adecuados.
Digestión	Se realiza en compartimentos cerrados que reducen la emisión de olores desagradables.	Necesita aireación.
Seguridad	Requiere mucho control.	Requiere control, pero en caso de detectarse problemas es relativamente fácil reconducir el proceso.
Producto	Genera biogás/energía y un digerido con elevada carga orgánica.	Genera compost.
Generación de olores	No emite malos olores.	Puede emitir malos olores de no ser manejado de forma adecuada.
Costes	Costes de inversión inicial muy elevados.	Costes de inversión inicial bajos.

Fuente: *Adaptación - Soliva, 2011.*

En la tabla anterior se evidencia que ambas técnicas tienen sus particularidades, cada una tiene sus ventajas y sus desventajas. En ocasiones, ambos sistemas son utilizados de manera integrada, empleando los biorresiduos en un sistema de digestión anaerobia y compostando aquellos biorresiduos que no resulten eficientes para el

proceso de digestión. Ambos resultan en un producto valorizable y relevante para un hotel, sin embargo los costes de implementación son muy desproporcionados. En el caso del hotel, los costos son un tema relevante, ya que no disponen de altos presupuestos para la implementación de un sistema de digestión anaerobia. Además, disponen de biorresiduos adicionales a los restos de comida, más adecuados para procesos de compostaje. Por lo tanto, se determinó que entre estas dos técnicas disponibles para el manejo de biorresiduos, el compostaje es la más factible. Este método permitirá un tratamiento de los biorresiduos en su origen de generación, mediante valorización. Esto evita que los biorresiduos entren en circuitos de recogida y disposición inadecuada. Además, permitirá el aprovechamiento del producto obtenido (compost) tras el tratamiento.

El compostaje, ya mencionado anteriormente, es un proceso biológico de estabilización y tratamiento de residuos biodegradables. Este proceso exige condiciones controladas de humedad, aireación y temperatura, que sean favorables para que los microorganismos presentes descompongan los biorresiduos (Grima, *et al.*, 2013). Para emplear adecuadamente esta técnica, es necesario considerar la naturaleza y las características de los biorresiduos a manejar, así como las condiciones ambientales, los objetivos del tratamiento y las limitantes económicas. Tomando en consideración que las características de los biorresiduos a tratar son

considerados biorresiduos asimilables a los de carácter municipal (RU), se podría concluir que el proceso de compostar estos biorresiduos es *“transformar la Fracción Orgánica (reducción y estabilización) en presencia de oxígeno de una manera respetuosa con el entorno, para obtener una enmienda de calidad, el compost, al que se le debe dar un destino adecuado, ya que puede proveer a los suelos de una buena fuente de materia orgánica transformable en humus”* (Grima, et al., 2013). El objetivo principal del hotel, como ya se ha mencionado anteriormente, consiste en gestionar de manera eficiente los restos de comida generados diariamente, evitando altos costes.

Existen diversas opciones tecnológicas para el compostaje que pueden adaptarse a distintas escalas y necesidades. Estas son algunas de las opciones más comunes:

- **Compostaje en pilas/hileras:** consiste en acumular una mezcla adecuada de biorresiduos en pilas o hileras al aire libre, en un área adecuadamente preparada. Se pueden voltear o agitar periódicamente para favorecer la aireación y la descomposición de los materiales; o, se puede suministrar una aireación pasiva mediante tuberías perforadas, evitando la obligación de voltear/mezclar la hilera/pila para airearla. Es una opción adecuada para instalaciones de pequeña y mediana escala, es económica y accesible (Roman, et al., 2013).

- **Compostaje en tambor:** se utiliza un tambor o contenedor giratorio para el compostaje. Este método permite un mayor control de la aireación y la temperatura, y puede facilitar el proceso de volteo. Es una opción conveniente para hogares con espacio limitado o para aquellos que deseen un compostaje más rápido y controlado (Kalamdhad, *et al.*, 2009).
- **Compostaje en lecho estático:** consiste en la creación de un lecho de biorresiduos en un recipiente o caja con fondo perforado. El aire circula a través del lecho de forma natural, favoreciendo la descomposición de los materiales. Es una opción adecuada para instalaciones de mediana escala, como granjas, hoteles o restaurantes (Garrido, 2015)
- **Compostaje en pilas aireadas:** se utilizan sistemas de aireación forzada para mejorar la oxigenación y la descomposición de los biorresiduos. Se pueden emplear ventiladores o sistemas de tuberías perforadas para insuflar aire dentro de las pilas. Es una opción más avanzada que permite un compostaje más rápido y controlado, y se utiliza en instalaciones de mayor escala, como plantas de compostaje municipales o industriales (Grima, *et al.*, 2013).
- **Compostaje en reactores cerrados:** utilizan reactores cerrados, como tanques, donde se controlan de manera precisa la humedad, aireación y temperatura. Se pueden emplear sistemas para el

volteo automático o mezclado mecánico para facilitar la descomposición de los materiales. Este enfoque es común en plantas de compostaje a gran escala (Grima, *et al.*, 2013).

- **Vermicompostaje:** utiliza lombrices para descomponer los biorresiduos. Las lombrices procesan los residuos y producen vermicompost, un fertilizante natural rico en nutrientes. El vermicultivo se puede realizar en pequeños espacios como hogares o comunidades (Grima, *et al.*, 2013).

Para elegir la opción de compostaje más óptima es importante considerar la cantidad de biorresiduos a tratar. La clasificación de las cantidades de biorresiduos considerados de pequeña, mediana o alta escala en el compostaje puede variar según el contexto y las fuentes que se consulten. Sin embargo, de manera general, se pueden considerar las siguientes clasificaciones:

- **Pequeña escala:** se refiere a volúmenes de residuos orgánicos generados a nivel doméstico o en pequeños jardines.
- **Mediana escala:** se refiere a volúmenes de residuos orgánicos generados en instituciones, como escuelas, restaurantes, hoteles, o en jardines y parques más grandes.
- **Alta escala:** se refiere a volúmenes generados por instituciones, industrias, grandes explotaciones agrícolas o áreas urbanas densamente pobladas.

Consecuentemente, se puede concluir que para un hotel, la cantidad de biorresiduos generados puede ser considerada de mediana escala. Por lo tanto, los detalles de las técnicas anteriormente descritas evidencian que, para la escala de los biorresiduos generados en el hotel las técnicas más factibles son: compostaje en pila/hilera o compostaje en lecho estático. La siguiente tabla muestra una breve comparación entre estas técnicas para el compostaje.

Tabla 6. Comparativa compostaje en pila/hilera y en lecho estático.

Ítem	Pila/hilera	Lecho estatico
Costes de inversion	Bajos	Bajos (sistemas pequenos), altos (sistemas grandes)
Costes operacionales	Bajos	Altos
Necesidades de terreno	Altas	Altas
Control del aire	Limitado	Completo
Control operacional	Frecuencia de volteo o reciclaje con adición de compost	Tasa de flujo de aire
Sensibilidad al tiempo frío o húmedo	Sensible al menos que esté cubierto	Comprobado en climas fríos y húmedos
Control de olores	Depende de la alimentación	Puede ser una fuente de gran extensión
Problemas operacionales potenciales	Sensible a cambios meteorológicos	El control de la tasa de flujo de aire es crítico

Fuente: *Adaptación - Castells, 2005.*

Una de las limitantes de estas técnicas es el gran terreno que precisan, sin embargo esto no supone un problema para el hotel. En términos de costes ambas técnicas suponen bajas inversiones iniciales, sin embargo la de lecho estático para una mayor escala puede suponer costes más elevados. La tecnología de pilas/hileras no supone altos costes operacionales, en cambio la de lecho estático sí. Por último, la emisión de olores en las pilas/hileras son menos probables que en las de lecho estático. Es por esto que, se concluyó que la técnica más adecuada para

el compostaje, en este caso en particular, es el compostaje en pilas/hileras.

En el compostaje en pilas, los biorresiduos se preparan en forma de pilas grandes y generalmente redondeadas. Las pilas se construyen en un área designada y se compactan para formar una masa densa, esto aumenta la posibilidad de emisión de olores. El volteo y mezclado de las pilas se realiza utilizando maquinaria especializada debido a la elevada altura de las pilas. Estas también pueden requerir un monitoreo más riguroso de la humedad y temperatura para garantizar condiciones idóneas de compostaje y la reducción de olores. Este método por un lado ahorra el espacio designado para las pilas ya que asume un crecimiento más vertical, sin embargo requiere más espacio de pasillos para maniobrar cada pila. En el compostaje en hileras, los biorresiduos se disponen en forma de hileras largas y más bajas que las pilas. Las hileras se construyen en una superficie plana. Este método proporciona una mayor exposición al aire lo que favorece la descomposición aeróbica de los materiales, reduce los malos olores y requiere menos monitoreo. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, la elección del método dependerá esencialmente en la disponibilidad de espacio y equipos, y las necesidades específicas del compostador.

En el caso del hotel en cuestión, la disponibilidad de espacio no supone un problema, sin embargo, para este negocio es fundamental el control de olores. El compostaje en hileras ofrece más control frente al compostaje en pilas, ya que la descomposición de la materia es más aerobia. Adicionalmente, el hotel dispone de la siguiente maquinaria: tractor, bobcat (pala de 360 litros), volteadora/mezcladora (ancho: 2 metros, alto: 1 metro) y una trituradora (utilizado para triturar materiales como las hojas de coco). Con esta maquinaria la hilera es el método más conveniente, ya que no exige maquinaria específica para el volteo/mezclado de la hilera; evitando costes en maquinarias adicionales para el volteo.

Consecuentemente se seleccionó el método de compostaje en hileras, por ser el método que reduce la posibilidad de emisión de malos de olores y por ser el que exige menor sacrificio económico; siendo esta la condición prioritaria para el hotel al momento de implementar la fase inicial de la planta.

6.3. Objetivo #3.

Para la correcta gestión de los biorresiduos mediante el compostaje en hileras, tomando en consideración el espacio disponible, es necesario diseñar y distribuir las facilidades para la implementación de la planta. Previo al diseño y distribución, se deben considerar ciertos parámetros para ubicar la planta en un lugar óptimo y seguro.

La selección del área se debe basar en distintas consideraciones, en este caso es importante seleccionar (especialmente para un hotel que queda ubicado en la costa) un área ubicada a una distancia adecuada de los cuerpos de agua (más de 50 metros); con el fin de evitar posibles contaminaciones. También es recomendable que el terreno seleccionado para las operaciones de compostaje contenga un piso impermeabilizado con una pendiente suave (menos del 4%), con el objetivo de lograr contener y recoger los lixiviados, previniendo posibles inconvenientes de olores y absorción del subsuelo.

Para la selección y diseño del área para el compostaje también es relevante tomar en cuenta las condiciones climáticas. El clima en Punta Cana, de manera general, se caracteriza por ser tropical y cálido durante todo el año. Las principales características climáticas de la zona son:

- **Temperatura:** la temperatura promedio oscila entre los 25 °C y los 31°C, con variaciones mínimas estacionales (*Meteoblue, 2023*).
- **Estación lluviosa y seca:** la estación lluviosa se extiende generalmente de mayo a octubre, siendo los meses de septiembre y octubre los más lluviosos. Durante esta temporada, se pueden experimentar fuertes lluvias tropicales y tormentas. La estación seca abarca los meses de noviembre a abril, con precipitaciones más escasas (*Meteoblue, 2023*).

- **Humedad:** esta área presenta una alta humedad durante todo el año, debido a su ubicación tropical. La humedad relativa se mantiene en niveles elevados, generalmente por encima del 70% (*Meteoblue, 2023*).
- **Vientos:** los vientos predominantes provienen de la dirección este y sureste. Estos vientos son conocidos como los “*vientos alisios*”, que son vientos soplan de manera constante desde los trópicos hacia el ecuador (ver gráfico 5). Estos son moderados con velocidades promedio que varían entre los 10 y 20 km/h (*Meteoblue, 2023*).

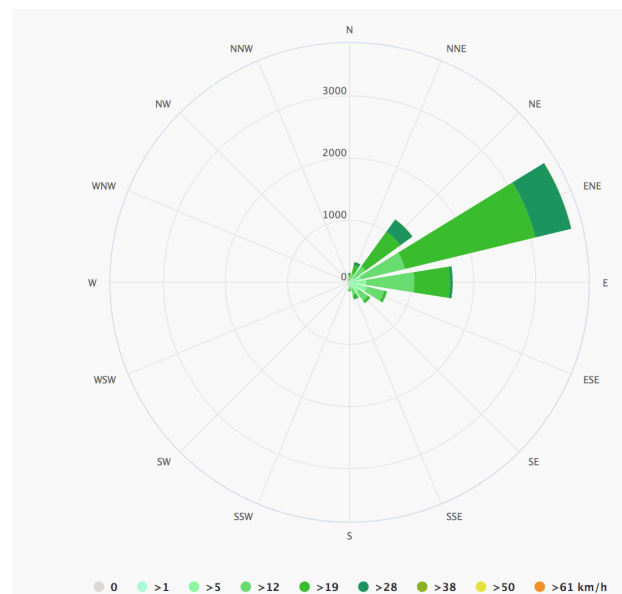


Gráfico 5. Rosa de los vientos en la región de Punta Cana.

Fuente: *Meteoblue, 2023*.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	24.8	24.6	24.8	25.4	26.2	27	27.2	27.4	27.4	27	26.1	25.4
Temperatura mín. (°C)	23.8	23.6	23.6	24.2	25	25.9	26.1	26.2	26.1	25.8	25	24.5
Temperatura máx. (°C)	26	26.1	26.4	27	27.7	28.5	28.7	28.9	29	28.5	27.4	26.6
Precipitación (mm)	51	40	40	52	93	71	89	109	133	131	113	66
Humedad(%)	76%	75%	74%	77%	79%	80%	80%	80%	80%	81%	78%	76%
Días lluviosos (días)	11	9	9	10	13	12	15	15	14	16	15	12
Horas de sol (horas)	8.8	9.1	9.5	10.0	10.2	10.5	10.4	10.0	9.6	9.0	8.6	8.6

Gráfico 6. Datos climáticos de Punta Cana (1991 - 2021).

Fuente: *Meteoblue, 2023.*

Según el gráfico 5, los vientos en esta parte de la isla provienen mayormente desde el este y sureste, es por esto que se recomienda que los espacios destinados para el compostaje estén ubicados en el extremo oeste del hotel; con la finalidad de prevenir que el foco emisor, en caso de emisión de malos olores por el compostaje, sean las áreas comunes y habitaciones de los clientes del hotel. Aun así, en esta parte de la isla los vientos estimados son considerados de baja velocidad, por lo tanto, no suponen un inconveniente para las operaciones de compostaje al aire libre.

Las precipitaciones en Punta Cana se pueden apreciar en el gráfico 6, donde se evidencia que esta es un área con climas muy variados durante todo el año. En general, es caluroso y húmedo, con lluvias leves algunos días del mes; sin embargo largas horas de sol. El mes de octubre es el más intenso en cuanto a precipitaciones, humedad y lluvias, ya que se encuentra durante la temporada ciclónica del país. Tomando en cuenta la intensidad solar en esta región, las altas temperaturas durante todo el año

y las lluvias (especialmente durante temporada ciclónica) se recomienda que los espacios destinados para el compostaje sean techados; con el fin de evitar que las hileras se calienten o se humedezcan más de la cuenta, causando un ambiente hostil para los microorganismos encargados del proceso de compostaje.

Se puede concluir lo siguiente: el espacio debe estar ubicado a una distancia mínima de 50 metros de los cuerpos de aguas y al extremo oeste del hotel, el área debe de estar techada e impermeabilizada con una ligera pendiente.

El tamaño de una hilera para el compostaje dependerá de la cantidad de los biorresiduos que se requiere compostar y el área habilitada para la ejecución del proceso. Generalmente se arman hileras de 1 a 2 metros de altura con el fin de facilitar las operaciones de volteo/mezclado. El ancho debe ser de 1,5 a 3 metros y la longitud será condicionada estrictamente por el área que se dispone. Con el sistema de hileras para el compostaje seleccionado, se desarrollaron tres posibles opciones para la distribución y área ocupada por las hileras y maduración en el espacio determinado.

Se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Se dispone de un área de 770 m².
- Cada hilera disminuye de tamaño (hasta la mitad de su volumen inicial) debido a la compactación causada por el peso de los

biorresiduos (especialmente los restos de comida) y debido a la pérdida de carbono en forma de CO₂. Por lo tanto, para cada hilera se requieren dos espacios de maduración de la mitad del tamaño que la hilera. Es decir el área total ocupada por las hileras debe ser igual al área total ocupada por las hileras de maduración.

- La volteadora/mezcladora disponible contiene dimensiones de 2 metros de ancho y 1 metro de altura; por lo tanto la medida de las hileras no debe sobrepasar estas dimensiones en ancho y alto.
- El ancho de las maquinarias para movida de material es de aproximadamente 2 metros, por lo tanto se deben diseñar pasillos de aproximadamente 3 metros para poder manejar y maniobrar las máquinas.

Tomando en cuenta estas especificaciones, se procedió al diseño de tres distintas opciones de distribución para la ejecución del proceso de compostaje en el área habilitada. Las siguientes figuras (4, 5 y 6) muestran las tres opciones diseñadas con sus respectivas dimensiones.

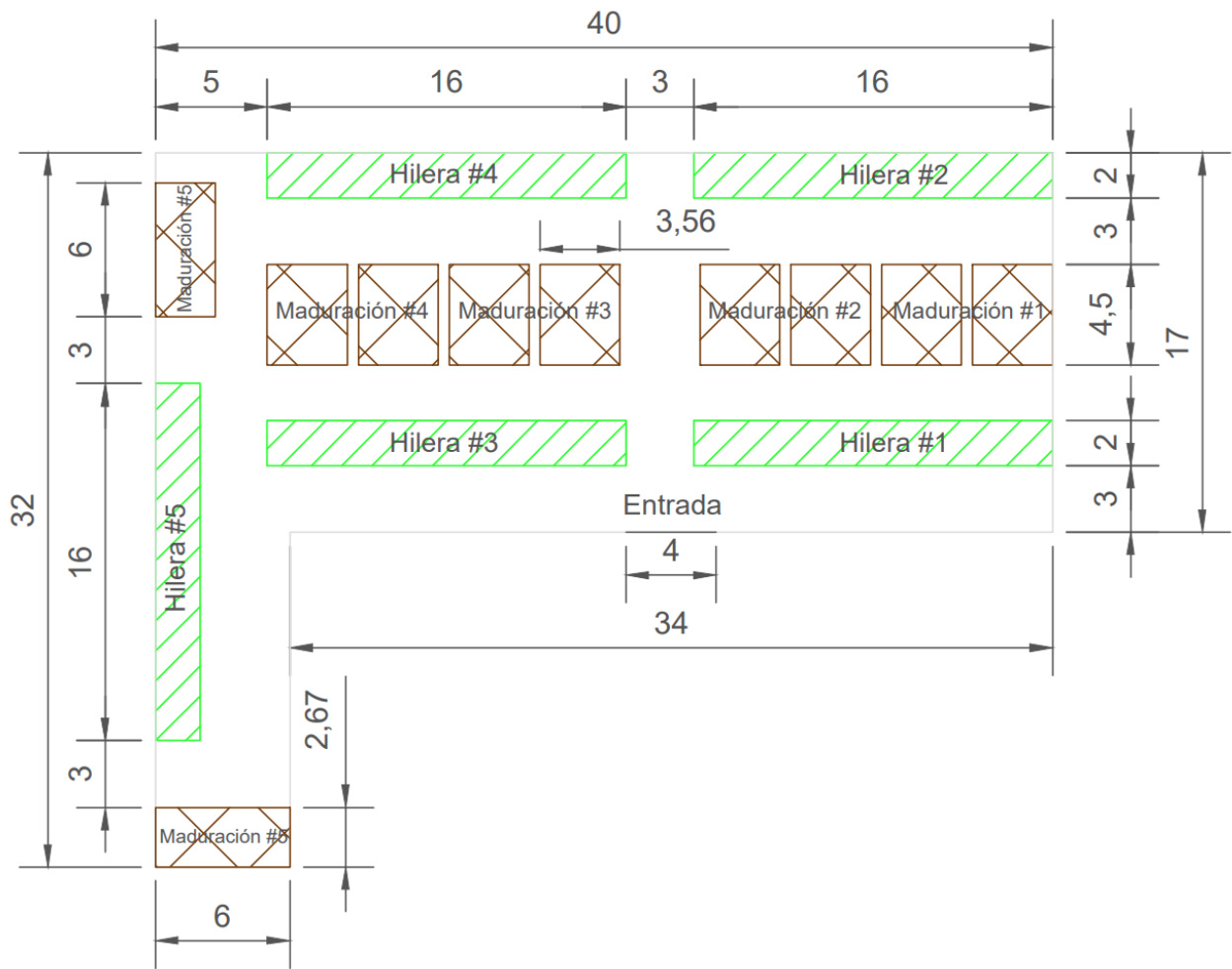


Figura 4. Distribución de facilidades: **Opción #1.**

Fuente: *Propia*, 2023.

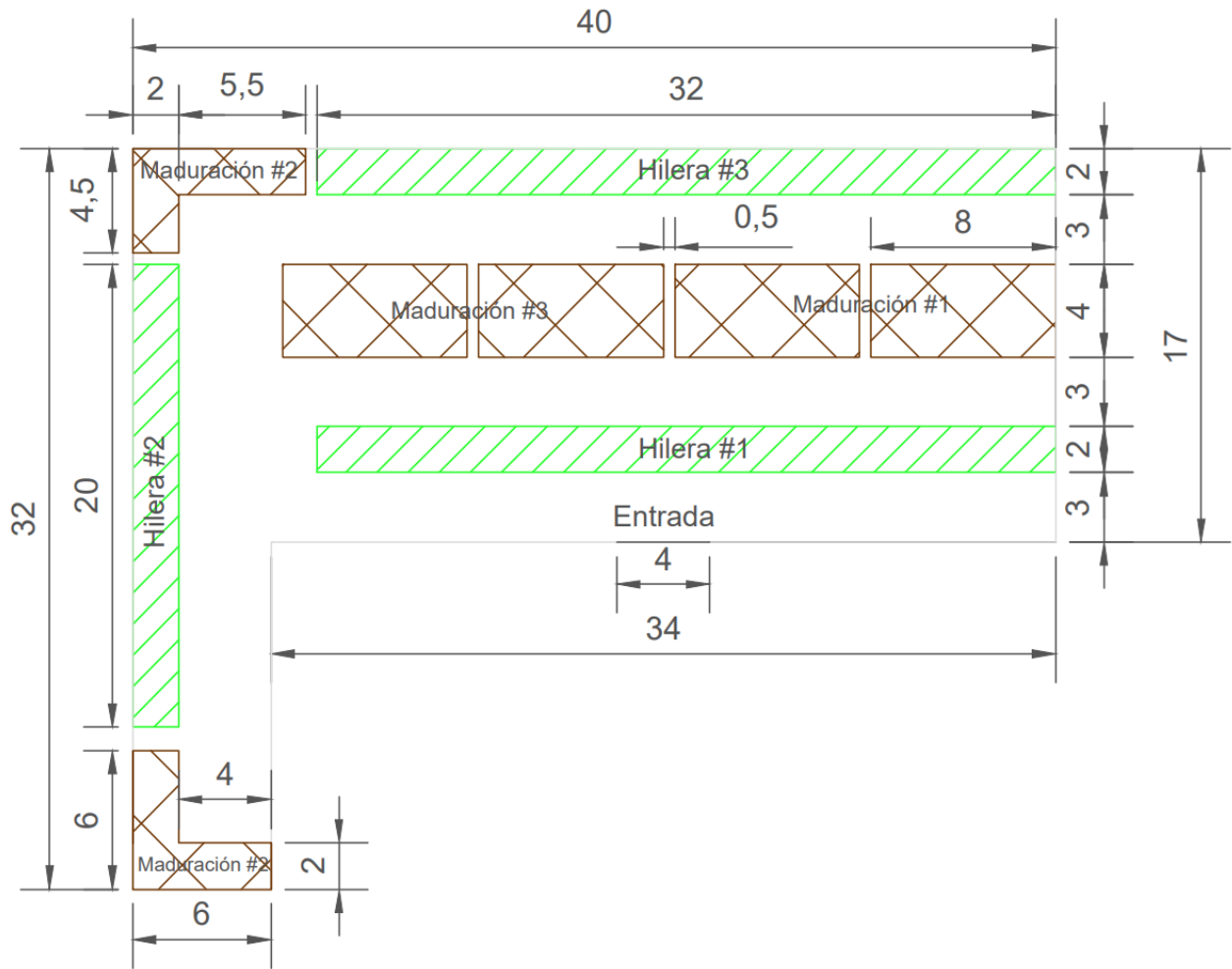


Figura 5. Distribución de facilidades: Opción #2.

Fuente: *Propia*, 2023.

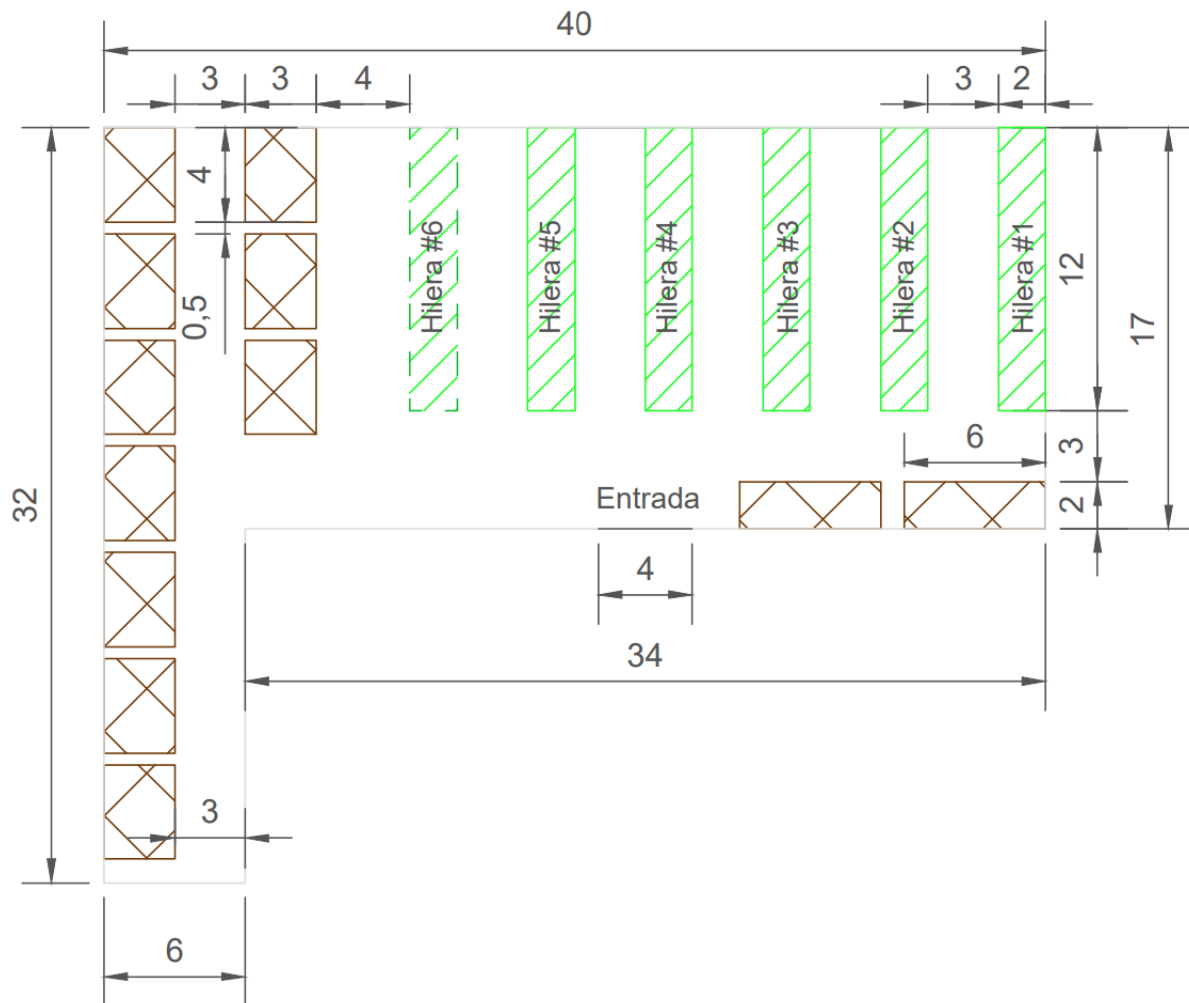


Figura 6. Distribución de facilidades: Opción #3.

Fuente: *Propia*, 2023.

La siguiente tabla muestra una comparativa sobre las características de las tres opciones presentadas anteriormente:

Tabla 7. Comparativa de opciones para distribución de facilidades.

Características	Opción #1	Opción #2	Opción #3
Descripción de hileras	5 hileras: 16m x 2m	2 hileras: 32m x 2m + 1 hilera: 20m x 2m	6 hileras: 12m x 2m
Área total de hileras (m ²)	160 m ²	168 m ²	144 m ²
Área total de maduración (m ²)	160 m ²	168 m ²	144 m ²
Área total hileras + maduración (m ²)	320 m ²	336 m ²	288 m ²
Sistema de volteo	Maquinaria mezcladora/volteadora	Maquinaria mezcladora/volteadora	Traslado de hilera hacia espacio desocupado de próxima hilera

Fuente: *Propia, 2023.*

La opción #2 es la que incluye mayor área para las hileras (como se puede observar en la tabla 7), lo cual implica que es la opción que permitirá compostar una mayor cantidad de biorresiduos. Le sigue la opción #1 y por último la opción #3, está siendo la que menor cantidad de residuos permitirá compostar por hilera.

Existen distintas formas de volteo o mezclado de la hilera, los más comunes son: revolvimiento de la hilera o volteo de un lado hacia el otro. En las opciones #1 y #2 se asignó un volteo con la volteadora/mezcladora disponible, lo que indica que la hilera queda en su mismo lugar tras ser mezclada. Sin embargo, en la opción #3 se propone un volteo hacia el lado izquierdo de cada hilera; es decir, se hace avanzado disponiendo las nuevas hileras en el espacio desocupado por la hilera volteada

anteriormente. Este sistema de volteo puede ser ejecutado con la pala bobcat, pero esto prolongaría el proceso; para que este sistema de volteo sea eficiente, se recomienda una maquinaria específica que va trasladando la hilera hacia el lado. Adicionalmente, el volteo avanzado también implica que las hileras deben de estar una al lado de la otra, esto causa que en este espacio las hileras de maduración tendrán que estar más alejadas; como consecuencia se debe invertir más tiempo en el traslado de la hilera de la fase de descomposición a la fase de maduración.

La opción #3 fue descartada, ya que de manera general causará un aumento de tiempo para el volteo y traslado dentro de las facilidades. Consecuentemente, quedan las opciones #1 y #2. Entre estas dos opciones, la #2 es la que permite compostar más material (8 m² más), sin embargo la opción #1 permite más movilidad dentro de las facilidades. Es decir, a la entrada dispone de un pasillo para acceder a las hileras 2 y 4 con mayor facilidad; mientras la opción #2 obliga a dar la vuelta completa para el transporte de material hacia la hilera 3. Por esta razón se puede considerar que la opción #1 es la más conveniente, a pesar de aguantar menos material la diferencia no es significativa; la movilidad dentro de las facilidades es esencial y disminuirá los tiempos de proceso, por lo tanto también la consumición de combustible de las maquinarias.

6.4. Objetivo #4.

La ejecución de procesos para el compostaje demanda la realización de una “fórmula” adecuada de mezclar los biorresiduos, de manera que se asegure un buen balance de materiales que garanticen la ocurrencia del proceso de descomposición. Para elaborar esta “fórmula” es fundamental comprender el proceso de compostaje, con la finalidad de crear la mezcla más adecuada en base a los biorresiduos que se disponen.

El compostaje es un proceso natural de descomposición de materiales orgánicos que se lleva a cabo en condiciones controladas. Durante este proceso, los biorresiduos se descomponen mediante la acción de microorganismos y otros organismos vivos, que logran transformar los biorresiduos en compost (un producto final rico en nutrientes y beneficioso para la fertilidad del suelo). Este proceso, de manera general, se puede resumir en dos etapas: descomposición y maduración. Dentro de estas etapas se pueden identificar las siguientes fases:

1. **Fase mesófila:** esta fase comienza en temperatura ambiente y el pH, habitualmente, se encuentra un poco ácido. Sin embargo, en pocos días (o horas), debido a la actividad microbiana se genera calor en el proceso y la temperatura sufre un gran aumento. Mediante la utilización de fuentes sencillas de carbono y nitrógeno (materiales fáciles de degradar tales como: azúcares y aminoácidos), las bacterias y hongos mesófilos y termotolerantes

intervienen, produciendo ácidos orgánicos. Esto ocasiona una bajada del pH entre el rango de 4.0 o 4.5 (Zhang *et al.*, 2016). En esta fase, las bacterias predominan el proceso debido a que poseen mayor velocidad de crecimiento y versatilidad que los hongos. La prevalencia de bacterias causan un aumento relevante de la temperatura provocando el cambio de las condiciones mesófilas a condiciones termófilas. Esto ocurre cuando las temperaturas alcanzan aproximadamente 45 °C. Esta etapa puede prolongarse desde dos a ocho días (Román, *et al.*, 2013).

- 2. Fase termófila o de higienización:** esta fase inicia en el momento que la hilera llega a temperaturas mayores de 45°C, como consecuencia los microorganismos mesófilos (ya que no soportan las altas temperaturas existentes) son eliminados y reemplazados por microorganismos que tienen capacidad de crecimiento a temperaturas diversas desde 20°C hasta 60°C (como bacterias termófilas y organismos termotolerantes). Estas comienzan a incrementar su población y se fijan como las microbiota residente del proceso (Moreno *et al.*, 2021). Estas trabajan en la descomposición de fuentes más complejas de carbono (por ejemplo de celulosa). En esta fase el pH incrementa ya que los microorganismos presentes se encargan de transformar el nitrógeno en amoníaco. Esta fase también se conoce como fase de higienización debido a que se eliminan bacterias y contaminantes

por el calor generado (por ejemplo de bacterias *Escherichia coli* y *Salmonella spp*). Las altas temperaturas también consiguen la destrucción de: quistes, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas. A temperaturas aún más elevadas (mayores de 60°C), surgen bacterias productoras de esporas y actinobacterias, tiene como objetivo: descomponer ceras, hemicelulosas y otros compuestos de carbono más complejos (Román, *et al.*, 2013). Esta fase puede tardar unos días, semanas o incluso meses; dependiendo de los biorresiduos utilizados, las condiciones climáticas ambientales, entre otros factores.

- 3. Fase mesófila II o de enfriamiento:** esta fase comienza cuando las fuentes de carbono y nitrógeno presentes en la hilera comienzan a ser un factor limitante. Es decir, como en la fase anterior el proceso llega a temperaturas que superan los 60°C, el calor inhibe a los microorganismos; esto causa la inactivación de enzimas y limita el suministro de oxígeno. Esto ocasiona la reducción de la actividad microbiana, ya que a mayor temperatura la solubilidad del oxígeno en agua disminuye, causando una caída en la temperatura que ronda entre los 40°C y 45°C. Por consecuencia del descenso de las temperaturas, los organismos mesófilos reanudan su actividad. La degradación de polímeros continúa y además pueden aparecer hongos. En esta fase el pH del medio disminuye un poco y permanece levemente alcalino. La

duración de esta fase de enfriamiento puede tardar unas cuantas semanas (Román, *et al.*, 2013).

4. **Fase de maduración:** en esta fase “*se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos*” (Roman, *et al.*, 2013), es decir, no se encuentran compuestos biodegradables (en su mayoría) y se forman compuestos muy estables (Zheng *et al.*, 2021). Ocurre una la pérdida del 40 a 50% del peso de los sustratos debido a la presencia de hongos (como *Absidia*, *Mucor* y *Allescheria*), encargados de la humidificación durante la fase de maduración (López-González *et al.*, 2015b; Miller, 1993). También hay presencia de bacterias mesófilas, aunque en menor cantidad, juegan un papel importante en el proceso de oxidación de la materia orgánica, del hidrógeno, amonio, nitrito, entre otras funciones (Beffa *et al.*, 1996). Esta fase puede demorar meses a temperatura ambiente.

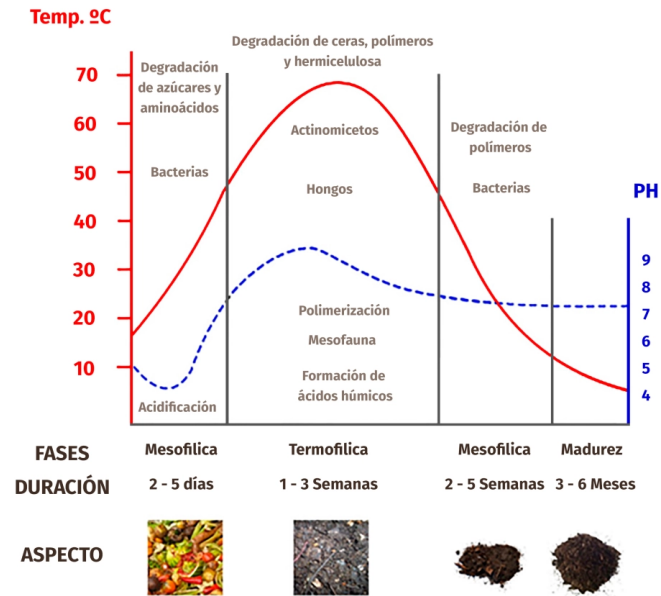


Gráfico 7. Temperatura y pH durante las fases del compostaje.

Fuente: *PuntoCompost, 2016.*

Para que todas estas fases antes descritas ocurran correctamente es necesario, previo a ejecutar el proceso de compostaje, asegurar que los materiales cumplan con los siguientes parámetros:

- **Humedad:** si los materiales están muy húmedos no se permitirá la circulación de oxígeno, esto puede causar que se creen condiciones anaeróbicas. Por otro lado, si los materiales carecen de humedad no permiten la solubilización de materia orgánica, esto puede causar el declive de la actividad microbiana (Castells, 2005).
- **Porosidad:** es la relación entre el volumen que no se encuentra ocupado por los materiales sólidos y el volumen total de la toda mezcla. La porosidad se encarga de facilitar la oxigenación (necesario para el crecimiento y actividad de los microorganismos

aeróbicos que descomponen la materia orgánica), la eliminación de gases (gases que si permanecen en el interior del compost pueden afectar negativamente la actividad microbiana), el control de la humedad (permite el drenaje adecuado del agua y evita la acumulación de humedad excesiva en el compost), la entrada de nutrientes (facilita la difusión de los nutrientes a través del material compostado, promoviendo una descomposición homogénea y uniforme) y la formación de una estructura adecuada del compost (Grima, *et al.*, 2013).

- **Tamaño de partícula:** La molienda, astillado y trituración de materiales aumenta la superficie en la cual los microorganismos pueden alimentarse. Cuando las partículas son de menor tamaño se crea una mezcla más homogénea y se mantienen temperaturas más óptimas en la hilera (por aislamiento). El tamaño óptimo que deben tener los biorresiduos para iniciar el proceso es desde 10 cm hasta 20 cm, sin embargo se puede permitir un rango mínimo de 5 cm y un rango máximo de 30 cm. Si se utilizan partículas muy diminutas puede causar impedimento del aire que debe fluir a través de la pila. (Román, *et al.*, 2013).
- **Relación C/N:** Para lograr mantener una actividad microbiológica los microorganismos deben tener los nutrientes necesarios para su crecimiento. Los microorganismos (como bacterias y hongos) utilizan carbono como fuente de energía y nitrógeno como nutriente

para su crecimiento y reproducción. Una relación C/N adecuada es crucial para mantener una temperatura óptima en el compostaje. Si la relación C/N es demasiado alta (existe un exceso de carbono en comparación con el nitrógeno), la descomposición microbiana se ralentiza y la temperatura del compost disminuye. Por otro lado, si la relación C/N es demasiado pequeña (existe un exceso de nitrógeno en comparación con el carbono), se puede producir una descomposición rápida pero desequilibrada, lo que puede generar olores desagradables y pérdida de nutrientes. La relación C/N también es importante para que los compuestos orgánicos se descompongan de manera más estable y madura, lo que resulta en un compost final más rico en nutrientes y con una menor probabilidad de causar fitotoxicidad en las plantas. Es recomendado una relación C/N entre 30 y 35 (Castells, 2005).

Los parámetros antes descritos deben ser considerados en la fase de “pre-compostaje”, la cual consiste en recibir, inspeccionar, acondicionar y determinar las cantidades de materiales adecuadas para asegurar crear la mejor mezcla para la ejecución del proceso de compostaje. La inspección se basará principalmente en la revisión de humedad y tamaño de partícula, y en caso de ser necesario acondicionar el material para que cumpla estos parámetros. Sin embargo para determinar las cantidades que se adicionará a la hilera de cada material es necesario realizar el

análisis relación C/N. Es crucial mantener un equilibrio adecuado entre los materiales ricos en carbono (tales como hojas secas y ramas) y los materiales ricos en nitrógeno (tales como restos de comida, grama y hojas verdes) que serán utilizados para la ejecución del compostaje. Una relación C/N óptima promueve una descomposición eficiente y una calidad adecuada del compost, además, asegura que no existan o se reduzcan las emisiones de olores desagradables. La relación ideal C/N para el compostaje generalmente se encuentra dentro del siguiente rango: 25:1 a 35:1 (Roman, *et al.*, 2013). La siguiente fórmula puede ser utilizada para el cálculo de la relación C/N óptima al momento de mezclar biorresiduos de distintas naturalezas para el compostaje:

$$R = \frac{Q_1 \times (C_1 \times (100 - M_1)) + Q_2 \times (C_2 \times (100 - M_2)) + Q_3 \times (C_3 \times (100 - m_3)) + \dots}{Q_1 \times (N_1 \times (100 - M_1)) + Q_2 \times (N_2 \times (100 - M_2)) + Q_3 \times (N_3 \times (100 - m_3)) + \dots}$$

Las variables mostradas en la fórmula anterior se refieren a:

- Q = Cantidad de material a adicionar
- M = Humedad en peso del material
- C = Carbono en peso
- N = Nitrógeno en peso

Dependiendo de la cantidad de materiales a adicionar, se van sumando las cantidades y luego se divide la cantidad de carbono total entre la cantidad de nitrógeno total. Este resultado proporciona la cantidad de carbono por cada unidad de nitrógeno.

Con el fin de lograr calcular la cantidad de material que puede ser consumido en cada hilera, es necesario calcular el volumen que ocupa cada una. En la técnica de compostaje en hileras que no superan una altura de 2 metros se puede asumir que la hilera toma una forma de prisma trapezoidal (Cochachi, 2008). En este caso, las dimensiones de las hileras tendrán cada una: 16 metros de largo, 2 metros de ancho y 1 metro de altura. El volumen fue calculado con la siguiente fórmula (volumen de un prisma trapezoidal):

$$\text{Volumen} = \frac{B + b}{2} \times \text{Altura} \times \text{Largo}$$

Las hileras tienen las siguientes dimensiones:

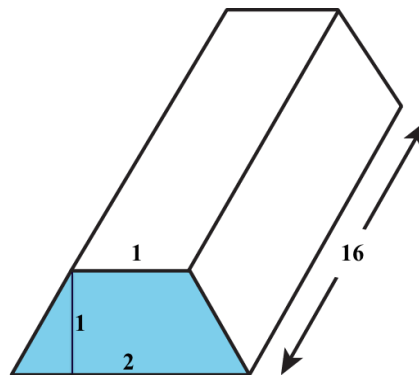


Figura 7. Dimensiones de las hileras.

Fuente: *Propia*, 2023.

En este caso,

- B = 2 metros
- b = 1 metro
- Altura = 1 metro
- Largo = 16 metros

Sustituyendo los valores en la fórmula se obtiene:

$$\text{Volumen} = \frac{2 + 1}{2} \times 1 \times 16$$

Este cálculo resulta en 24 m³ por hilera, si se multiplica este valor por la cantidad de hileras en las facilidades (5), se obtienen 120 m³ de espacio que serán ocupados por las hileras para el compostaje.

Consecuentemente, se procedió a calcular la cantidad de material que debe ser consumido por cada hilera, de manera que se asegure una buena relación C/N. Según las características obtenidas de los biorresiduos generados en el hotel (mostrados en tabla 4, p.40) y tomando en cuenta el volumen de las hileras de la opción elegida, se obtuvo la mezcla mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 8. Cantidad de materiales que se deben agregar por hilera para asegurar relación C/N.

Material	Kilogramos /m ³	m ³ /hilera	Kilogramos/hilera	Cantidad de carbono	Cantidad de nitrógeno
Borra de café	450	0.5	225	270,000	13,500
Gramas y hojas verdes	404	2.5	1,010	210,080	12,322
Restos de comida	125	13.0	1,625	1,889,063	125,938
Ramas y hojas secas	319	3.0	957	4,311,285	81,345
Hojas de coco (triturada)	319	3.0	957	1,914,000	54,549
Compost	76	2.0	152	107,160	7,144
TOTALES		24	4,926	8,701,588	294,798
				Relación C/N	30

Fuente: *Propia, 2023.*

Según estos valores, la relación C/N resultante será de 30:1, es decir, 30 unidades de carbono para una unidad de nitrógeno. Esta relación se

encuentra dentro del rango óptimo de relación C/N para la ejecución del compostaje. Como se muestra en la tabla anterior (8), adicional a los biorresiduos generados por las operaciones del hotel también se agregó compost a la mezcla para el compostaje. Debido a que este material suma una numerosa cantidad de microorganismos beneficiosos que aceleran el proceso de compostaje y potencialmente mejoran la calidad del compost terminado. Este material suministra un activador y un inóculo de compost. Los activadores son las sustancias utilizadas para acelerar un proceso de descomposición, mientras los inoculantes son otro tipo de activador compuestos (generalmente) por bacterias y hongos que están inactivos hasta que se agregan a la mezcla de compost. Además, agregar compost a la hilera puede ayudar a reducir posibles olores fuertes y aparición de insectos o moscas. El compost será el único material que tendrá que ser adquirido (una única vez) para el armado de las primeras hileras, luego tras la producción del primer lote por las operaciones de la planta de compostaje, se tomará el compost resultante de la producción de la planta. La cantidad a adicionar por hilera representa una cantidad mínima en comparación a las cantidades que se van a producir.

En la técnica de compostaje por hileras, los biorresiduos a utilizar se van colocando capas sucesivas (en área delimitada), una encima de la otra, hasta agotar todo el material que se definió para esa hilera. Las capas deben ser alternadas entre los biorresiduos más secos y los más

húmedos en proporciones correctas, esto facilitará la entrada de microorganismos, creando un entorno adecuado para que las bacterias y los hongos descompongan los biorresiduos en compost; además evita que se compacten los materiales.

A partir de la cantidad del biorresiduo que se utilizará en mayor cantidad (en este caso restos de comida) para la formación de cada hilera, se procedió a calcular aproximadamente cuántas capas se deben amontonar para ocupar el volumen de la hilera. Mediante la división de los 24 m³ que ocupa la hilera entre los 13 m³ que ocupan los restos de comida en la hilera, resultando en 1,84. En base a este número se puede concluir que se deben hacer dos grandes capas por hilera, que contengan 6 subcapas (una para cada material). La siguiente imagen muestra una sección transversal de cómo debería verse la hilera al momento de armarla.

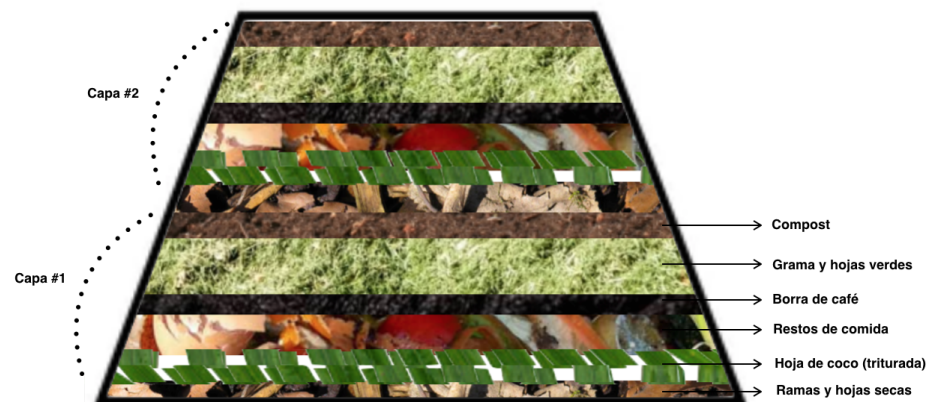


Figura 8. Sección transversal de hilera de compostaje.

Fuente: *Propia*, 2023.

La primera subcapa debe ser “marrón” para funcionar como drenaje, entre los materiales a utilizar, las ramas, hojas secas y hoja de coco son los materiales que cumplen con esta función. Por lo tanto, se adicionan estos materiales en las cantidades definidas (más información en tabla 8). Esta subcapa también proporciona una fuente vital de alimento para los organismos descomponedores, ya que es rica en carbono. Luego, se debe adicionar una subcapa “verde”, es decir, materiales ricos en nitrógeno; estos serán responsables de proporcionar una fuente crítica de alimento para la descomposición. Por lo tanto se procede a adicionar los restos de comida, la borra de café (ayuda a controlar olores de capa anterior), la grama y por último una ligera subcapa de compost maduro (suma microorganismos beneficiosos y reduce aparición de insectos o moscas); con esto materiales se termina la primera capa. Finalmente, se procede a agregar los mismos materiales en el mismo orden anterior para formar una segunda capa. Es decir, nuevamente materiales “marrones”, aunque en este caso, tienen como función prioritaria equilibrar la humedad en la pila, ya que es el material más seco de la hilera; además crean una capa porosa que permite el flujo normal del aire en la hilera y elimine el exceso de agua de las subcapas. Por último, se adicionan nuevamente las subcapas “verdes” que cumplen las mismas funciones que en la capa anterior, y con esto se culmina el armado de la hilera. Estas capas sólo serán “visibles” al momento de armar la hilera, ya que

cuando comienza el proceso de descomposición, y a medida que la hilera se va mezclando, los materiales forman una mezcla más homogénea.

La capacidad de pala del bobcat es de 360 litros, equivalente a $0,36 \text{ m}^3$. Esta maquinaria recoge un poco más de material que lo que el volumen de la pala permite (ver figura 9), se puede asumir un 5% de material adicional. Por lo tanto, el volumen de $0,36 \text{ m}^3$ por pala pasa a ser un volumen de $0,38 \text{ m}^3$ por pala.



Figura 9. Recogida de material con pala bobcat.

Fuente: *Arriendo de maquinarias, 2023.*

Tomando en cuenta los kilogramos que se utilizarán de cada material para el armado de una hilera, el volumen total que ocupa y el volumen que recoge la pala a la vez ($0,38 \text{ m}^3$), se puede calcular la cantidad de veces que será necesario llenar la pala para el armado de cada capa de la hilera. En la siguiente tabla muestra los valores correspondientes a cada material.

Tabla 9. Unidades de pala bobcat para armado de hilera.

Material	m ³ /hilera	Unidades de pala bobcat	Unidades de pala bobcat por capa
Borra de café	0.5	1.3	0.7
Gramina y hojas verdes	2.5	6.6	3.3
Restos de comida	13.0	34.4	17.2
Ramas y hojas secas	3.0	7.9	4.0
Hojas de coco (triturada)	3.0	7.9	4.0
Compost	2.0	5.3	2.6
TOTALES	24	63	32

Fuente: *Propia, 2023.*

6.5. Objetivo #5.

El proceso de compostaje es un sistema productivo, en el cual se debe controlar la materia prima introducida para iniciar el proceso, el desarrollo del proceso y la calidad del producto resultante. Con el fin de esquematizar las actividades que se deben ejecutar para llevar a cabo el proceso de compostaje, se crearon los siguientes diagramas de flujo de procesos. Estos muestran, de manera resumida, los pasos a seguir para transformar los biorresiduos (materia prima) en compost (producto final); mediante el empleo de un sistema abierto de descomposición aerobia. Abarca las operaciones desde que se reciben los biorresiduos hasta que se empaca el compost resultante.

Existen varios parámetros fundamentales que son importantes de monitorear y controlar durante el proceso de compostaje. Estos parámetros pueden variar dependiendo de las condiciones específicas y

del tipo de compostaje que se esté llevando a cabo. A continuación, se presentan algunos de los parámetros a tomar en cuenta:

- **Humedad:** para que los microorganismos que habitan en la hilera de compostaje logren sobrevivir, demandan humedad. Humedecer la hilera con agua incita a que las sustancias fluyan dentro de esta, asegurando que los nutrientes sean asequibles para los microbios. El contenido de humedad ideal es generalmente del 40% al 60%. Demasiada humedad puede resultar en un montón empapado y maloliente, mientras que muy poca humedad puede inhibir la actividad microbiana (EPA, 2023).
- **Oxígeno:** es esencial asegurar una adecuada aireación y circulación de aire dentro de la hilera de compostaje, para suministrar oxígeno a los microorganismos aeróbicos y permitir que suceda la descomposición con mayor velocidad. Sin embargo, no es correcto proporcionar demasiado oxígeno ya que puede causar que la hilera se seque dificultando el proceso de compostaje (EPA, 2023). Para proporcionar oxígeno se puede: dar vuelta o mezclar la hilera periódicamente, colocar la hilera por encima de tubos perforados que lleguen a los extremos de la hilera y/o incluir materiales “secos” que colaboren a la aireación.
- **Temperatura:** para que los microorganismos puedan ejecutar sus actividades de manera adecuada, necesitan un rango de temperatura específico. El control de la temperatura puede acelerar

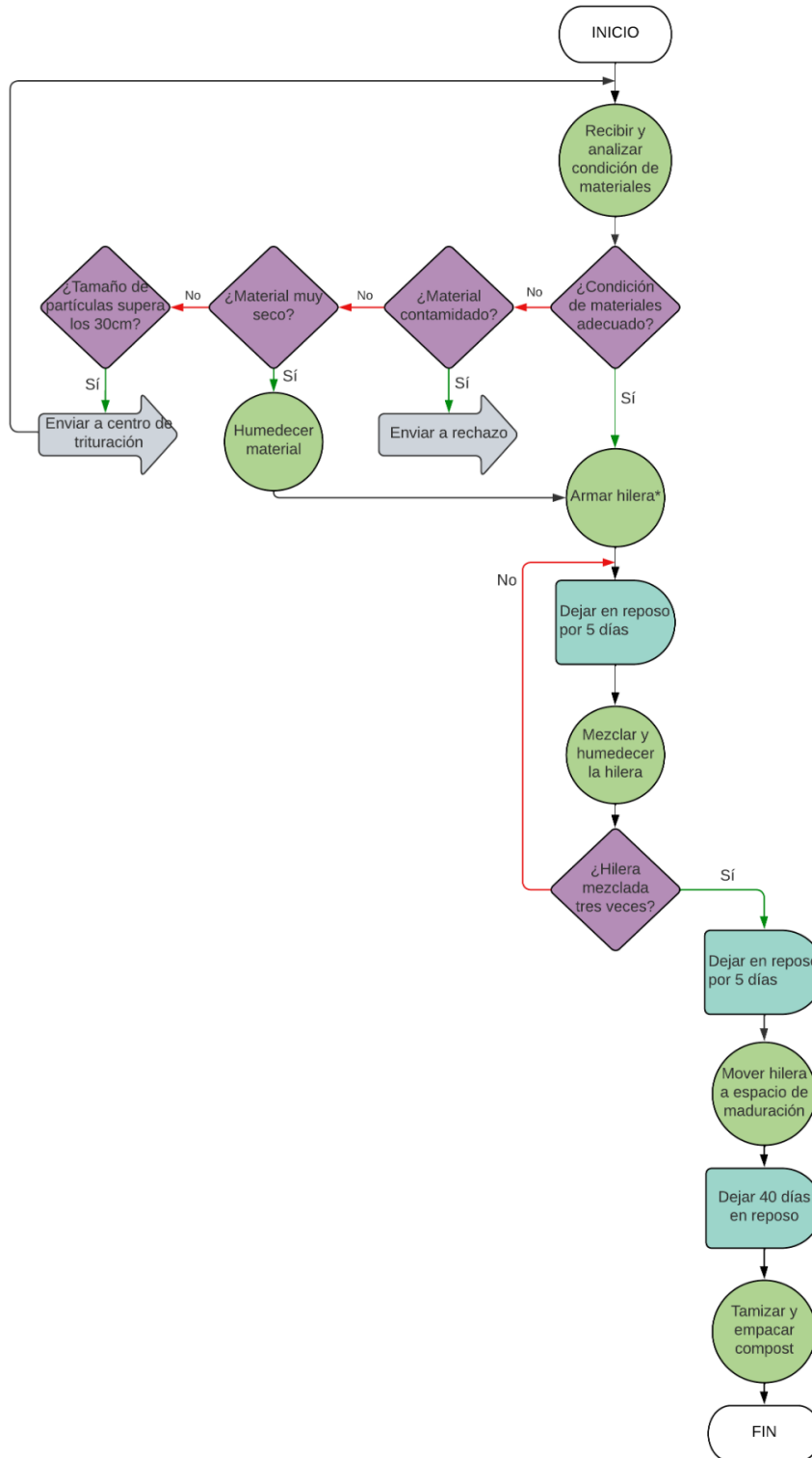
y mejorar el proceso de compostaje, además de exterminar semillas de malezas (EPA, 2023). Si la temperatura no aumenta dentro de la hilera de compostaje, es posible que se creen condiciones inadecuadas de carácter anaeróbico (como putrefacción). La temperatura es un indicador importante del progreso del compostaje y puede proporcionar información sobre la actividad microbiana y la descomposición. Para el compostaje el monitoreo de esta se puede utilizar un termómetro de compostaje, este mide si la temperatura de la hilera/pila se encuentra en el rango óptimo para una descomposición efectiva (Louie, R. 2015). La temperatura también es fundamental al momento de asegurar la muerte de patógenos, en la siguiente tabla se muestran las temperaturas y tiempos de exposición necesarios para asegurar la muerte de los patógenos más relevantes.

Tabla 10. Temperaturas para la eliminación de patógenos.

Microorganismo	Temperatura	Tiempo de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55°C	1 hora
	65°C	15-20 minutos
<i>Escherichia coli</i>	55°C	1 hora
	65°C	15-20 minutos
<i>Brucella abortus</i>	55°C	1 hora
	62°C	3 minutos
<i>Parvovirus bovino</i>	55°C	1 hora
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	55°C	3 días

Fuente: Jones, et al., 2003.

El siguiente diagrama de flujo de proceso muestra los pasos a seguir para la correcta ejecución de las actividades definidas para el compostaje.



*Proceso detallado en diagrama de flujo de "Armado de hilera"

Figura 10. Diagrama de flujo de procesos para el compostaje.

Fuente: *Propia, 2023.*

El proceso, como indica en la figura 10, inicia con el recibimiento separado de los biorresiduos a utilizar, de manera que se realice una breve inspección de la condición de los biorresiduos. Las razones por las cuales los materiales pueden no estar en condiciones para el compostaje son:

- **Contaminación:** es importante asegurar que los biorresiduos no estén contaminados con ningún elemento (tóxico o no) que pueda alterar las características propias de cada material. Mediante una revisión visual se puede determinar si los biorresiduos están mezclados con otros. También mediante una inspección holística básica se puede identificar si el material está contaminado con productos químicos. En caso de que se sospeche una contaminación, es adecuado rechazar el material y determinar que este no puede ser empleado para el compostaje; ya que, trabajar con materiales contaminados puede sacrificar todo el proceso biológico de los microorganismos causando posible putrefacción, lentitud en el proceso, un compost de mala calidad y/o olores desagradables. Por ejemplo, si los restos de comida vienen mezclados con grasas o aceites, o en caso de que los materiales huelan a lejía; estos deben ser rechazados y transportados a otro lugar.
- **Humedad:** es recomendable que los materiales contengan cierto nivel de humedad previo a ser adicionados a la hilera,

especialmente los materiales “secos”, como lo son las ramas, hojas secas y hojas de coco. Por lo tanto, si se determina visualmente o mediante el tacto que el material está muy seco (y en algunos casos caliente); se debe proceder a rociar el material con agua; para luego proseguir a armar la hilera. El exceso de humedad tampoco es recomendable para el rendimiento de la hilera de compostaje, por lo tanto los materiales no deben de ser sumergidos en agua.

- **Tamaño:** es relevante comprobar la granulometría o tamaño de partícula de los biorresiduos a utilizar. El tamaño de la partícula puede condicionar la humedad y la aireación de la hilera, si las partículas sobrepasan los 30 cm puede ocasionar que disminuya la temperatura de la hilera (debido a conductos de exceso de aireación) y por lo tanto causar que se desacele el proceso de descomposición. En caso de que las partículas sean menores de 5 cm, se pueden crear poros pequeños que normalmente se llenan de agua y ocasionan un flujo limitado del aire (Román, *et al.*, 2013). Por lo tanto, debe ocurrir una inspección visual breve donde se determine que el tamaño de la mayoría de las partículas no sean menores de 5 cm y no sobrepasen los 30 cm. Por ejemplo, si las hojas de coco vienen con muy poca trituración y muchas superan los 30 cm, deben ser transportadas nuevamente al centro de trituración para asegurar el tamaño de partícula adecuado.

Luego de inspeccionar y acondicionar el material, se puede proceder a ejecutar la actividad de “armado de la hilera”, donde se apilan ordenadamente (en el espacio de la hilera) los biorresiduos en el orden y en las proporciones definidas (ver figura 8, p.75). Este es un proceso que conlleva varias tareas; por lo que se creó un diagrama de flujo específico sobre las actividades que se deben llevar a cabo para su correcta ejecución (figura 11, p.88).

Al culminar con el armado de la hilera, se determinó que esta debe permanecer en reposo por cinco días para luego, utilizando la mezcladora, remover y humedecer la hilera; repitiendo este proceso tres veces en el que transcurren 20 días. Las principales razones de voltear o mezclar las hileras de compostaje es aflojar y soltar el material, para que el aire pueda moverse más libremente dentro de esta. El mezclado asegura que todas las partes de una masa de compostaje estén expuestas a las condiciones necesarias para eliminar patógenos y malezas. La agitación de las partículas durante el volteo también estimula tasas más altas de descomposición al exponer nuevas superficies al ataque microbiológico (Roman, *et al.*, 2013). Si la hilera no se oxigena y se vuelve anaeróbica puede generar malos olores y afectar la actividad microbiana. Generalmente, las hileras de compostaje deben ser mezcladas durante la etapa de descomposición, cuando las temperaturas

disminuyen a menos de 45°C o cuando superen los 65°C (sin permitir que llegue a 70°C). Por lo general, esto ocurre de tres a cinco días en el método de compostaje por hileras (*Agriculture Victoria, 2023*). En este caso, las hileras fueron diseñadas con una altura de 1 metro y un ancho de 2 metros, estas dimensiones son consideradas pequeñas y por lo general causa que las hileras no lleguen a superar los 70°C fácilmente. Por lo tanto, para estandarizar el proceso y evitar la actividad de monitoreo constante de temperatura de la hilera, se estableció un mezclado cada cinco días. En este lapso de tiempo se asegura que la hilera estará expuesta a las temperaturas requeridas para la muerte de patógenos (ver tabla 9, p.80) y estará en los rangos de temperatura anteriormente especificados. Se establecieron 20 días de etapa de descomposición debido a las dimensiones de la hilera, la frecuencia de mezclado y la humedad que se le proporcionará. Estudios demuestran que estas condiciones pueden permitir que el proceso dure 20 días antes de entrar al proceso de maduración (*Agriculture Victoria, 2023*).

Es importante humedecer la hilera cada vez que se mezcla. Durante el compostaje se pierde humedad a través de la refrigeración evaporativa, y debe ser reemplazada mediante riego. El contenido óptimo de humedad para el compostaje generalmente se considera del 40% al 60%, si el nivel de humedad está por debajo del 30%, la actividad microbiológica se ve

limitada. Por lo tanto se debe añadir agua durante el compostaje mediante mangueras, aspersores o mangueras porosas.

Finalmente, tras pasar los 20 días (desde que se armó la hilera) esta debe de ser trasladada a una de las áreas de maduración. Cada área de maduración tendrá la mitad de volumen que la hilera, ya que tras transcurrir el proceso de descomposición, el material se consume y solo queda el 50% de su volumen inicial. El proceso de maduración, generalmente, puede durar desde un mes a tres meses. Durante este tiempo, los microorganismos continúan descomponiendo los materiales, lo que ayuda a estabilizar el compost y mejorar su calidad. La duración de la maduración del compost puede variar según varios factores, como los materiales utilizados, las condiciones ambientales y el método de compostaje empleado. El compost maduro suele tener un aspecto oscuro, terroso y con un agradable olor a tierra. En este caso, se utilizaron restos de comida en la mezcla de compostaje, estos ayudan a acelerar la descomposición y la actividad microbiana en la hilera de compostaje. Además, la temperatura en esta ubicación es húmeda y cálida, esto también favorecerá la actividad microbiana y el proceso de descomposición. Se realizarán volteos periódicos que garanticen la oxigenación y temperatura adecuada de la hilera. Por lo tanto, se establece que la hilera debe permanecer en el proceso de maduración, en reposo total, por 40 días. Este lapso de tiempo sobrepasa el mínimo de

duración (1 mes), asegurando que en caso de algún atraso en el proceso exista un tiempo de holgura para recuperación. Además, permite un sistema logístico más estable, en el que cada 20 días se desocupa un espacio de maduración para ser ocupado nuevamente por otra hilera que culminó su etapa de descomposición. Finalmente, al finalizar el reposo de se procede a cernir el compost, donde se pasa el compost maduro través de una serie de tamices o cribas para separar los materiales más grandes (como ramas o residuos no completamente descompuestos) del compost fino y listo para su uso. En general, se utiliza un tamiz con orificios de 1,6 cm (Roman, *et al.*, 2013).

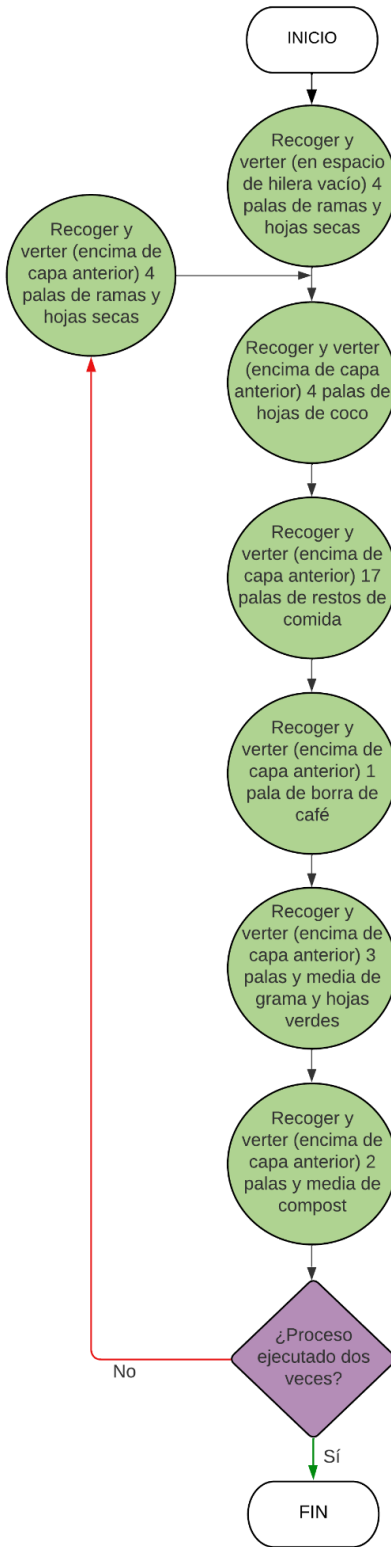


Figura 11. Diagrama de flujo de “Armado de hilera”.

Fuente: *Propia*, 2023.

El compost resultante de las operaciones de compostaje puede ser utilizado para numerosas aplicaciones, sin embargo, según los biorresiduos utilizados para la ejecución del compostaje, se aconsejan aplicaciones específicas.

Tabla 11. Usos aconsejables de compost según los materiales utilizados en el proceso de compostaje.

Aplicaciones más adecuadas de compost de...	Estiércol	Corteza	Restos Vegetales (RV)	Lodos+RV	Residuos Mezclados/Resto	FORS+RV
Agrícola	●			●	●	●
Jardinería privada	●	●	●	●		●
Parques y jardines públicos	●	●	●	●		●
Restauración del paisaje	●		●	●	●	●
Recuperación de espacios degradados	●		●	●	●	●
Revegetación obra pública	●		●	●	●	●
Preparación de substratos		●	●	●		
Céspedes deportivos	●	●	●	●		●

Fuente: Gea, 2005.

Tabla 19. Aproximación a los usos más aconsejables para determinados tipos de compost

Fuente: *Gea, 2005.*

En este caso, el compost resultante se producirá a partir de una mezcla mayormente de FORS (Fracción Orgánica Recogida Separadamente) y RV (Restos Vegetales). Por lo tanto, según los datos expuestos en la tabla 10 y tomando en consideración las aplicaciones que pueda tener dentro del hotel, se puede concluir que este compost puede ser aplicado mayormente para: la jardinería y los céspedes deportivos.

7. Conclusiones.

Tras la realización del presente Trabajo Fin de Máster, se lograron establecer las siguientes conclusiones:

- ❖ Atendiendo a las limitaciones y requerimientos del hotel, y tras evaluar diferentes técnicas de tratamiento de biorresiduos, el compostaje se presentó como la técnica más interesante.
- ❖ Con las limitaciones de espacio presentadas por el hotel, se evaluaron en esta primera fase, tres posibles disposiciones de las hileras de compostaje, siendo la opción #1 la que mejores resultados presentó, atendiendo al aprovechamiento del espacio y la optimización de los recursos disponibles.
- ❖ Con los diferentes residuos generados por el hotel, se ha formulado la composición de los diferentes residuos que permite obtener una relación C/N de 30, siendo esta la que será sometida al proceso de compostaje.
- ❖ Se ha realizado el esquema de procedimientos a seguir para ejecutar el compostaje en hileras.
- ❖ Se ha establecido la manera correcta de disponer y colocar los diferentes biorresiduos en las hileras mediante una metodología de capas, obteniendo la sección transversal de esta.
- ❖ Se han estandarizado los procesos de compostaje, al objeto de facilitar las tareas de volteo y monitorización.
- ❖ La solución propuesta permite contribuir al concepto de economía circular, aprovechando los diferentes residuos producidos en el hotel (biorresiduos

y restos vegetales), valorizándolos para obtener un producto de cierto valor (compost), y por otro lado, contribuyendo a que la empresa se dirija hacia la producción de “cero residuos”.

8. Bibliografía

Arecoa. (2022). Anuncian cierre definitivo de vertedero en zona turística Verón-Punta Cana. Recuperado de <https://www.arecoa.com/destinos/2022/05/31/anuncian-cierre-definitivo-de-vertedero-en-zona-turistica-veron-punta-cana/>

Agencia de Residuos de Cataluña. (2004). *Gestió dels purins*: Ficha 4. Recuperado de <http://www.arc.cat/es/altres/purins/guia/pdf/ficha4.pdf>

Alvarado Dávila, T. L., *et al.* (2021). Revisión de técnicas para el uso de compostaje aerobio generado en hoteles Real en el municipio de Barrancabermeja.

AXIL Integrated Services. (s.f.). *Waste Management Hierarchy*. Recuperado de <https://axil-is.com/blogs-articles/waste-management-hierarchy/>

Baquero, E. (2019). Aprovechamiento de Residuos Orgánicos Residenciales para la Generación de Abono en Bogotá. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7254/1/811710-2019-I-GA.pdf>

Baquero Morón, V. E. (2019). Aprovechamiento de residuos orgánicos residenciales para la generación de abono en Bogotá.

Banco Mundial. (2018). *Global waste to grow by 70 percent by 2050 unless urgent action is taken: World Bank report*. Recuperado de

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>

Banco Mundial. (s.f.). *Global Food Loss and Waste*. Recuperado de https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/global_food_loss_and_waste.html

Brinton, W., (2000). *Compost Science & Utilization*. Recuperado de <https://compost.css.cornell.edu/Brinton.pdf>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2000). Ley 64: Ley General sobre medio ambiente y recursos naturales. Recuperado de <https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/instrument/files/2000.%20Ley%2064%20General%20sobre%20medio%20ambiente%20y%20recursos%20naturales.pdf>

Castells, X. E. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. Díaz de Santos.

Cantor Castro, A. L., *et al.* (2014). Propuesta de diseño de un sistema de compostaje para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables en la Universidad Libre sede Bosque Popular.

Climate-Data.org. (2021). Punta Cana, La Altagracia, República Dominicana. Recuperado de <https://es.climate-data.org/america-del-norte/republica-dominicana/la-altagracia/punta-cana-878298/>

Contratación del Estado. (2019). Guía de compostaje comunitario. Recuperado de

<https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/3808babc-0271-4fe6-829a-ff0eeddd37de/DOC20190507094243anexo+XXIV++Guia+compostaje+comunitario++FEA.pdf?MOD=AJPERES>

Dirección General de Impuestos Internos (DGII). (2020). Ley No. 225-20 sobre lavado de activos provenientes del tráfico ilícito de drogas. Recuperado de <https://dgii.gov.do/legislacion/leyesTributarias/Documents/Leyes%20de%20Instituciones%20y%20Fondos%20de%20Terceros/225-20.pdf>

Department of Agriculture and Food Supply Victoria. (2023). Composting spoiled hay. Recuperado de <https://agriculture.vic.gov.au/farm-management/soil/composting/composting-spoiled-hay>

Negro, M., *et al.* (s.f.). Compost CIEMAT. Recuperado de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/16792/1/2000%20Compost%20CIEMAT.pdf>

Diario Libre. (2012). Un país con demasiados vertederos. Recuperado de <https://www.diariolibre.com/actualidad/un-pas-con-demasiados-vertederos-BIDL331321>

Environmental Protection Agency. (2023). Criteria & Definition of Solid Waste and Solid & Hazardous Waste Exclusions. Recuperado de

<https://www.epa.gov/hw/criteria-definition-solid-waste-and-solid-and-hazardous-waste-exclusions#solidwaste>

Environment Protection Authority NSW. (2022). The Waste Hierarchy.
Recuperado de <https://www.epa.nsw.gov.au/your-environment/recycling-and-reuse/warr-strategy/the-waste-hierarchy>

Environmental Protection Agency. (2023). Types of Composting and Understanding the Process. Recuperado de <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/types-composting-and-understanding-process#basics>

FAO. (2018). The State of Food and Agriculture 2018: Migration, agriculture and rural development. Recuperado de <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>

Figueroa, R. (2019). Más de 30 mil toneladas de desechos han sido reciclados por EcoServices en 7 años. Recuperado de <https://www.diariolibre.com/actualidad/medioambiente/mas-de-30-mil-toneladas-de-desechos-han-sido-reciclados-por-ecoservices-en-7-anos-KC13552293#:~:text=El%20Distrito%20Municipal%20Ver%C3%B3n%20Punta%20Cana%20genera%20diariamente%20unas%20510,la%20zona%20urbana%20y%20residencial>

Garrido, A. (2015). Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles.
Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90483/fichero/TFGAidaGarrido.pdf>

Grima, A. (2013). Gestión de Biorresiduos de Competencia Municipal [PDF]. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/GUIA_MO_DEF_tcm30-185554.pdf

Grupo Puntacana. (2020). Programa Descarga Cero. Recuperado de <https://puntacana.org/es/medio-ambiente/programa-descarga-cero>

Heredia, P. (2022). Anuncia cierre definitivo de vertedero de Verón-Punta Cana. Recuperado de [https://www.diariolibre.com/actualidad/nacional/2022/05/30/anuncia-cierre-definitivo-de-vertedero-de-veron-punta-cana/1860521#:~:text=Anuncia%20cierre%20definitivo%20de%20vertedero%20a%20cielo%20abierto%20de%20Ver%C3%B3n%20Punta%20Cana&text=Cerrar%3%A1n%20de%20manera%20definitiva%20del,Jos%C3%A9%20Leonel%20\(Neney\)%20Cabrera](https://www.diariolibre.com/actualidad/nacional/2022/05/30/anuncia-cierre-definitivo-de-vertedero-de-veron-punta-cana/1860521#:~:text=Anuncia%20cierre%20definitivo%20de%20vertedero%20a%20cielo%20abierto%20de%20Ver%C3%B3n%20Punta%20Cana&text=Cerrar%3%A1n%20de%20manera%20definitiva%20del,Jos%C3%A9%20Leonel%20(Neney)%20Cabrera)

Harris-Ray, N., (2022). *What to Know About Composting in Layers*. Recuperado de <https://www.webmd.com/balance/what-to-know-about-composting-in-layers>

Kalamdhad, AS. (2009). *Rotary drum composting of different organic waste mixtures*. Recuperado de <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242x08091865>

MarketWatch. (2023). *Global Waste Treatment & Disposal Market Analysis by 2023-2030*. Recuperado de

<https://www.marketwatch.com/press-release/global-waste-treatment-disposal-market-analysis-by-2023-2030-in-latest-research-2023-05-09>

Meteoblue. (2023). Datos climáticos históricos de Punta Cana, República Dominicana. Recuperado de

https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/punta-cana_rep%C3%BAblica-dominicana_3494242

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Tratamientos biológicos: Compostaje. Recuperado de

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-compostaje.aspx>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Terminología. Recuperado de

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/terminologia/>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). Biorresiduos. Recuperado de

<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion->

[y-gestion-residuos/flujos/biorresiduos/#:~:text=Los%20biorresiduos%20dom%C3%A9sticos%20son%20los,sean%20similares%20a%20los%20primeros](#)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2011). Manual de compostaje [PDF]. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/images/es/Manual%20de%20compostaje%202011%20PAGINAS%201-24_tcm30-185556.pdf

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). Política de Residuos Sólidos Municipales. Recuperado de <https://ambiente.gob.do/wp-content/uploads/2016/12/Politica-Residuos-Solidos-Municipales.pdf>

Modelo Economía Circular Fondo Global para el Medio Ambiente (2023). Protocolo de segregación. Recuperado de <https://www.modeloeconomicircularfgpc.com/wp-content/uploads/2023/04/Protocolo-de-segregacion.pdf>

Rana, M., (2015). *Physical and mechanical properties of coconut palm (Cocos nucifera) stem.*

Román, P., y otros. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Recuperado de <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>

Observatorio del Ambiente Urbano (2020). De lo establecido a lo percibido: residuos sólidos en Santo Domingo y el Distrito Nacional. Recuperado de

<http://www.ciudadalternativa.org.do/wp-content/uploads/2020/06/De-lo-establecido-a-lo-percibido-residuos-s%C3%B3lidos-en-Santo-Domingo-y-el-Distrito-Nacional.pdf>

Organización Mundial del Turismo (s.f.). Invertir en la República Dominicana. Recuperado de <https://www.unwto.org/es/inversion/turismo-y-negocio-invertir-en-la-republica-dominicana#:~:text=Por%20todo%20ello%2C%20el%20sector,econom%C3%ADa%20de%20la%20Rep%C3%ABlica%20Dominicana>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (s.f.). *Solid Waste Management*. Recuperado de <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/solid-waste-management>

Reciclorganicos. (s.f.). Proyectos de compostaje. Recuperado de <https://reciclorganicos.com/proyectos/compostaje/>

Soliva, M., (2011). Guía para la recogida separada y gestión de la fracción orgánica. MITECO. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-biometanizacion.aspx>

Sánchez Romero, Á., *et al.* (s.f.). Estudio de alternativas de diseño de plantas de compostaje en almazaras ecológicas de tamaño reducido.

Vilas, A. (2016). *Productos compostables*. En PuntoCompost. Recuperado de <https://puntocompost.wordpress.com/productos/>

Weather Spark. (s.f.). Clima promedio en Punta Cana, República Dominicana durante todo el año. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/27410/Clima-promedio-en-Punta-Cana-Rep%C3%BAblica-Dominicana-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Wilson, D. C., *et al.* (2015). *Global Waste Management Outlook*.

Wolf, J. (2018). Informe Final Estado GIRS República Dominicana. Recuperado de <https://cambioclimatico.gob.do/phocadownload/Documentos/giz/Wolf,%20Judith%20-%20Informe%20Final,%20Estado%20GIRS%20Rep.Dom.%20Nov.%202018.pdf>