



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**EVALUACIÓN DE TÉCNICAS PARA EL AUMENTO DE LA
CAPACIDAD DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE
LA PLANTA DE LA ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE VIÑA DEL
MAR**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: CAROLINA OLIVERA ARANCIBIA
PROFESOR GUÍA: DANIEL UNDURRAGA PERALTA

VALPARAÍSO, 2022.

RESUMEN

En Chile se producen aproximadamente 7.5 millones de toneladas de residuos sólidos municipales al año, de los cuales cerca del 50% corresponde a residuos orgánicos. Existe una baja tasa de valoración de los residuos, terminando la mayoría de estos, en rellenos sanitarios y/o vertederos con corta vida útil; provocando impactos ambientales, económicos y sociales.

Los residuos orgánicos, por su parte, al ser dispuestos en rellenos sanitarios y vertederos, generan emisiones de gases de efecto invernadero, malos olores, vectores sanitarios, entre otros; siendo un problema a nivel nacional. Es por lo que el Ministerio del Medio Ambiente ha propuesto estrategias para su valorización y de este modo, combatir la crisis climática actual, tanto a nivel domiciliario como a nivel comunal.

La ilustre Municipalidad de Viña del Mar posee una planta de compostaje municipal, con una capacidad cercana al 750.000 kg de residuos orgánicos, es decir, el 0,6% del total de residuos orgánicos generados en la comuna. Sin embargo, se requiere de un sistema de compostaje que tenga una capacidad de reciclaje de residuos orgánicos mayor a la actual, debido a que la comuna de Viña del Mar se declaró en emergencia climática y ecológica y busca seguir las metas de valorización de residuos orgánicos impuestos por el Ministerio del Medio Ambiente y la Hoja de ruta para un Chile circular al 2040 las que establecen la meta de valorizar el 30% de los residuos orgánicos generados a nivel comunal al año 2030. Es por ello, que en este trabajo se realizó un análisis técnico y de costos de dos alternativas de compostaje adecuadas para la implementación en la planta municipal. Estos análisis contemplan el funcionamiento, los requerimientos de infraestructura, equipamiento, mano de obra y los parámetros de control para el funcionamiento adecuado de la planta. Las dos técnicas seleccionadas fueron la técnica de pilas con volteo mecánico por medio de volteador de compost (opción A) y de pilas estáticas con cubierta semipermeable y aireación forzada (Opción B), ambas alternativas cumplen con una capacidad mayor a 19.000 ton/año lo que cumple con las metas de valorización descritas anteriormente.

El análisis de costos evidenció que la opción A tiene un costo de implementación de 0,10 UF por tonelada valorizada, mientras que la opción B asciende a un costo de 0.61 UF por tonelada, además las alternativas poseen un tiempo de recuperación de la inversión de 1.3 años y 4.8 años respectivamente. Esta información favorecerá la toma de decisiones en cuando a la alternativa a utilizar por parte del municipio de Viña del Mar.

Finalmente se proponen indicadores de calidad y eficiencia del proceso de compostaje y parámetros de control para evitar inconvenientes en el procesamiento del material y contaminantes en el compost resultante con el fin de aplicarlos en el procesamiento de los residuos contribuyendo a la mitigación del cambio climático de una forma segura y eficaz.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

*A mi madre.
Gracias por todo .*

ÍNDICE GENERAL

1- INTRODUCCIÓN	1
1.1 RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES	1
1.1.1 Problemáticas asociadas a residuos orgánicos municipales	2
1.1.1.1 Emisiones de GEI	2
1.1.1.2 Rellenos sanitarios	4
1.1.2 Beneficios de la gestión de residuos orgánicos municipales.....	5
1.1.2.1 Disminución de emisiones de GEI	5
1.1.2.2 Disminución de costos y uso asociado a rellenos sanitarios	6
1.1.2.3 Mejora de suelos	7
1.2 ESTRATEGIAS DE VALORIZACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES	8
1.2.1 Estrategias de valorización y gestión de residuos orgánicos municipales a nivel mundial	8
1.2.2 Estrategias de valorización y gestión de residuos orgánicos municipales a nivel Nacional	11
1.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE EN CHILE REFERENTE A RESIDUOS ORGÁNICOS	14
1.4 TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGANICOS MUNICIPALES EN CHILE	17
1.4.1 Técnicas de tratamiento de residuos orgánicos municipales.....	17
1.4.1.1 Compostaje	17
1.4.1.2 Lombricultura o Vermicompostaje.....	20
1.4.2 Tratamiento de residuos orgánicos municipales en comunas del país.....	21
1.5 TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES EN LA COMUNA DE VIÑA DEL MAR.	23
1.5.1 Comuna de Viña del Mar.....	23
1.5.2 Departamento de Servicios del Ambiente (DSA)	24
1.5.3 Reciclaje de residuos orgánicos	26
1.5.4 Beneficios del reciclaje de residuos orgánicos.	27
2. PROBLEMA.....	28
3. OBJETIVOS	29
3.1 Objetivo General	29
3.2 Objetivos Específicos	29

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	30
5-RESULTADOS	35
5.1 ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES	35
5.1.1 Sistemas abiertos	35
5.1.1.1 Pilas estáticas	36
5.1.1.2 Pilas con volteo manual	37
5.1.1.3 Pila con volteo mecánico	38
5.1.1.4 Compostaje de pilas con aireación pasiva.....	41
5.1.1.5 Pila estática con aireación forzada.....	43
5.1.1.6 Compostaje las pilas estáticas aireadas con cubierta semipermeable.....	44
5.1.2 Sistemas cerrados	45
5.1.2.1 Compostaje en reactores	45
5.1.3 Análisis comparativo de técnicas de compostaje.....	46
5.2 Evaluación técnica de dos alternativas de compostaje eficientes para la Municipalidad de Viña del Mar.....	48
5.2.1 Requerimientos de la planta de compostaje municipal de Viña del Mar	49
5.2.1.1 Generación de residuos orgánicos en la comuna de Viña del Mar.....	49
5.2.2 Selección de técnicas de compostaje para su evaluación	53
5.2.3 Análisis técnico de la Opción A.....	54
5.2.3.1 Pretratamiento.....	55
5.2.3.2 Fase activa	57
5.2.3.3 Fase de maduración	61
5.2.3.4 Tamizado	62
5.2.3.5 Balance de masa de la Opción A	63
5.2.4 Análisis técnico de la Opción B.....	64
5.2.4.1 Preprocesamiento.....	65
5.2.4.2 Fase de compostaje activo.....	67
5.2.4.3 Fase de compostaje de maduración	74
5.2.4.4 Tamizado	76
5.2.4.5 Balance de masa Opción B.....	77
5.3 Análisis de costos asociados a las alternativas evaluadas técnicamente	78
5.3.1 Análisis de costos de la opción A	78

5.3.1.1 Análisis costo-beneficios de la Opción A	80
5.3.1.2 Periodo de recuperación de la inversión Opción A	81
5.3.2 Análisis de costos opción B	81
5.3.2.1 Análisis costo- beneficios de la Opción B	84
5.3.2.2 Periodo de recuperación de la inversión Opción B	85
5.3.3 Comparación de la opción A y B	85
5.4 Indicadores de calidad y eficiencia en el proceso de compostaje y en el compost resultante	86
5.4.1. Parámetros de control	86
5.4.2 Indicadores de eficiencia del proceso de compostaje.....	88
5.4.3 Indicadores de calidad del compost resultante.....	91
6- DISCUSIÓN.....	94
7- CONCLUSIÓN	97
8-BIBLIOGRAFÍA	99
9-ANEXOS.....	107
Anexo 1: Información técnica de la maquinaria y equipos propuestos para la Opción A	107
Anexo 2: Información técnica de la maquinaria y equipos propuestos para la Opción B.....	110
Anexo 3: Cotización construcción de estructura Opción B	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Vida útil rellenos Sanitarios región de Valparaíso.....	4
Tabla 1.2: Costos por disposición Final de RSD en 22 comunas del país.....	6
Tabla 1.3: Tipo de materiales para el proceso de Compostaje	18
Tabla 1.4: Parámetro a considerar en el proceso de compostaje	20
Tabla 1.5: Parámetros a considerar en el proceso de vermicompostaje.....	21
Tabla 1.6: Tratamiento de residuos orgánicos municipales en comunas del país	21
Tabla 1.7: Comunas con proyectos de gestión de residuos orgánicos con asesoramiento técnico de programa Reciclo Orgánicos.	23
Tabla 1.8: Balance de residuos recuperados por el municipio de Viña del Mar.	26
Tabla 1.9: Cantidad de residuos orgánicos valorizados en la comuna de Viña del Mar	26
Tabla 4.1: Puntaje de los parámetros a evaluar en cada técnica de compostaje.....	32
Tabla 5.1: Síntesis de técnicas de compostaje.....	47
Tabla 5.2: Parámetros para el cálculo de PPC.....	50
Tabla 5.3: Parámetros para el cálculo de la cantidad de residuos proyectados.....	51
Tabla 5.4: Proyección de RSD al año 2030 en la comuna de Viña del Mar.	51
Tabla 5.5: Proyección de RSD al año 2030 en la comuna de Viña del Mar.	52
Tabla 5.6: Requerimiento de residuos orgánicos a compostar al año 2030 en a la comuna de Viña del Mar.	52
Tabla 5.7: Evaluación de técnicas de compostaje para la planta de la comuna de Viña del Mar	54
Tabla 5.8: Área utilizada para la Opción A.....	55
Tabla 5.9 Tiempo de almacenamiento del material orgánico.....	56
Tabla 5.10: Maquinaria y equipo a utilizar en la etapa de pretratamiento	57
Tabla 5.11: Dimensiones pilas de compostaje.....	58
Tabla 5.12 Requerimientos de temperatura para la higienización del material a compostar	60

Tabla 5.13: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase Activa.	61
Tabla 5.14: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración	62
Tabla 5.15: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de tamizado.....	63
Tabla 5.16 Áreas requeridas para el tratamiento de residuos	65
Tabla 5.17: Equipo y maquinaria necesaria en el preprocesamiento.	67
Tabla 5.18 Dimensiones pilas de Fase Activa.	69
Tabla 5.19 Generación de lixiviados en el proceso de compostaje en Fase activa	71
Tabla 5.20: Equipos y maquinarias necesarias para la Fase activa de compostaje	74
Tabla 5.21: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración	76
Tabla 5.22: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración	76
Tabla 5.23: Estimación de costos asociados a material y maquinaria	79
Tabla 5.24: Estimación de costos asociados a mano de obra requerida Opción A	80
Tabla 5.25: PRI Opción A.....	81
Tabla 5.26: Estimación de costos asociados a material y maquinaria	82
Tabla 5.27: Estimación de costos asociados a mano de obra requerida Opción B.....	83
Tabla 5.28: PRI Opción B	85
Tabla 5.29: Comparación Opción A y Opción B.....	86
Tabla 5.30 Fuentes hábiles y no hábiles de materia prima para el compostaje.....	87
Tabla 5.31: Parámetros indicadores de eficiencia del proceso de compostaje	89
Tabla 5.32: Parámetros del compost Clase A y Clase B	92
Tabla 5.33: Test grupo 1 y 2.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Emisiones de gas metano asociada a desechos sólidos municipales en Chile.....	3
Figura 1.2: Objetivos de desarrollo sostenible	10
Figura 1.3: Tratamiento realizado a residuos orgánicos por comuna.	22
Figura 1.4: Mapa comuna de Viña del Mar.....	24
Figura 1.5: Organigrama resumido municipio de Viña del Mar.	25
Figura 5.1: Sistema de compostaje en pilas estática	37
Figura 5.2: Cargador frontal.	39
Figura 5.3: Volteador de compost remolcado por tractor	40
Figura 5.4: Volteador de compost autónomo	41
Figura 5.5: Pila de compostaje con aireación pasiva	42
Figura 5.6: Pila estática con aireación forzada	43
Figura 5.7: Pila estatica aireada con cubierta semipermeable	45
Figura 5.8: Compostaje en túneles.....	46
Figura 5.9: Balance de masa proceso de compostaje Opción A).	64
Figura 5.10: Membrana Goretex®.....	68
Figura 5.11: Plano tuberías de ventilación.	72
Figura 5.12: Balance de masa proceso de compostaje Opción B.	77

LISTADO DE ACRÓNIMOS

COP: Conference of the parties.

DSA: Departamento de Servicios del Ambiente

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

INE: Instituto Nacional de estadísticas

MIDESO: Ministerio de Desarrollo Social y familia

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

NDC: Nationally Determined Contributions.

NMP: Número Más Probable

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

RI: Residuos industriales.

RSD: Residuos sólidos domiciliarios.

RSM: residuos sólidos municipales.

PNRS: Programa Nacional de Residuos sólidos

PPC: Producción Per Cápita de residuos

SCAM: Sistema de Certificación Ambiental Municipal.

SUBDERE: Subsecretaria de Desarrollo Regional y administrativo

UN: United Nations.

1- INTRODUCCIÓN

1.1 RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES

La Ley 20.920 del Ministerio del Medio Ambiente, define residuo como aquel objeto o sustancia que su generador desecha o tiene la intención u obligación de desechar de acuerdo con la normativa vigente. Estos residuos se generan como consecuencia de un modelo lineal de producción y consumo que se basa en extraer, producir, consumir y eliminar para satisfacer las necesidades humanas, como lo son la habitación, el alimento, vestimentas, transporte, comunicación, entre otras (Fundación Ellen MacArthur, 2014).

Los residuos se pueden clasificar según su origen como residuos sólidos municipales (RSM) o como residuos industriales (RI).

Los Residuos industriales, definidos en el Decreto supremo N° 594/99 del Ministerio de Salud, son aquellos resultantes de procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza o mantenimiento, generados por la actividad industrial. A su vez, son residuos sólidos o líquidos, o combinaciones de éstos, provenientes de los procesos industriales y que por sus características físicas, químicas o microbiológicas no pueden asimilarse a los residuos domésticos.

Por otro lado, los RSM son los aquellos provenientes de sectores prestadores de servicios y pequeñas industrias y comercios, además de los residuos provenientes de vías públicas, aseo, mantenimientos de áreas verdes y residuos sólidos domiciliarios.

Este tipo de residuos se pueden clasificar según sus propiedades químicas en residuos inorgánicos y residuos orgánicos. Los residuos inorgánicos son plásticos, metales, vidrios, textiles, entre otros, y los residuos orgánicos son todos los desechos o residuos de origen

animal y/o vegetal, lo que hace que estos residuos tengan la capacidad de degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica (Volta, 2019).

Mundialmente, en el informe “What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050” del Banco Mundial se establece que el año 2016 se generaron 2010 millones de toneladas de desechos, de los cuales el 44% corresponde a residuos orgánicos.

En Chile el año 2019 se generaron 7,5 millones de toneladas de RSM de los cuales la fracción de residuos orgánicos es aproximadamente el 58%, lo que equivale a 4,3 millones de toneladas en peso, correspondiendo a más del doble de lo que representan otras fracciones, como los envases y embalajes (plástico, cartón, vidrio, latas, etc.), No obstante, la tasa de valorización de los residuos orgánicos es inferior al 1% del total de toneladas generadas cada año (MMA, 2020).

1.1.1 Problemáticas asociadas a residuos orgánicos municipales

Los residuos orgánicos son causantes de diversos impactos ambientales asociados a una inadecuada disposición final, tales como la generación de lixiviados, generación de olores, proliferación de vectores, la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y la disminución de la disponibilidad de espacio en rellenos sanitario. Además de estos impactos, el manejo actual que se le da a los residuos orgánicos en el país implica un desaprovechamiento de importantes oportunidades de generación de valor, puesto que los residuos que hoy en día se pierden al ser enterrados en rellenos sanitarios y vertederos podrían ser utilizados para generar energía y nutrientes para los suelos del país (MMA, 2020).

1.1.1.1 Emisiones de GEI

Los residuos orgánicos municipales son grandes generadores de GEI. Estos gases se emiten en el transporte y la disposición final de los residuos.

En el transporte de los residuos orgánicos, producto de la combustión interna de los vehículos utilizados para este fin se emite GEI, principalmente dióxido de carbono, además de la dispersión de Material Particulado MP 10 y MP 2,5 por el tránsito vehicular en caminos pavimentados y no pavimentados. Por otro lado, los residuos orgánicos al ser dispuestos en rellenos sanitarios o vertederos se encuentran en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno, lo que favorece la descomposición de estos generando como producto gas metano, el cual es un GEI con un potencial de calentamiento global de 28. Cabe destacar que el potencial de Calentamiento global del Dióxido de carbono es 1.

El crecimiento de la población y el desarrollo económico han provocado un aumento directamente proporcional en la generación de residuos sólidos municipales, lo que conlleva a un aumento en las emisiones de GEI. Según lo descrito por la FAOSTAT en el año 2018 la generación de emisiones del GEI metano ha aumentado cerca de un 20%, contrastado con las emisiones del año 1990 como se muestra en la figura 1.1.

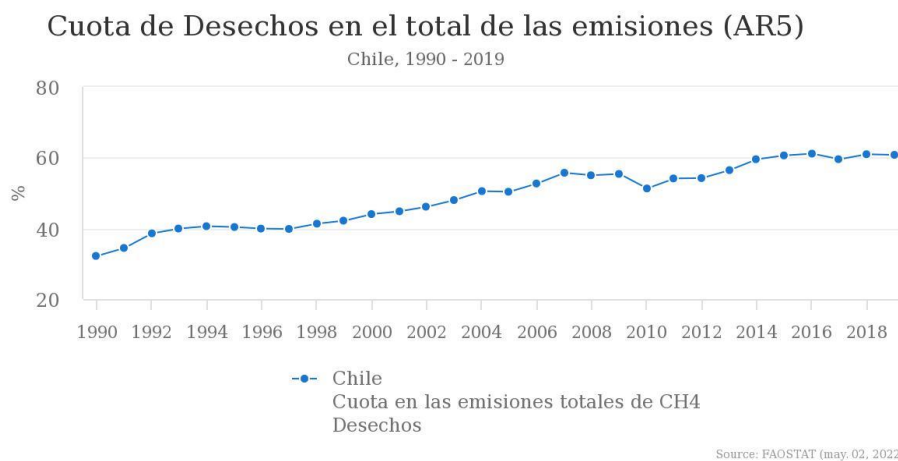


Figura 1.1: Emisiones de gas metano asociada a desechos sólidos municipales en Chile (FAOSTAT, 2022).

Los vertederos y/o rellenos sanitarios son la tercera fuente antrópica más grande de metano en el mundo, siendo responsable de aproximadamente el 11% de las emisiones mundiales de este gas (Global Methane Initiative, 2011).

1.1.1.2 Rellenos sanitarios

Los RSM en la actualidad se disponen mayoritariamente en rellenos sanitarios y vertederos regulados. La problemática actual radica en que estos rellenos sanitarios poseen una vida útil limitada, la que se ha visto disminuida debido al aumento de la generación de residuos producto del aumento de la población, además de la baja cantidad de rellenos sanitarios existentes. Chile posee 38 rellenos sanitarios para poder abarcar los RSM y RI de 346 comunas.

En la región de Valparaíso se emplazan 3 rellenos sanitarios, Relleno Sanitario El Molle, Relleno Sanitario San Pedro y Relleno Sanitario La Hormiga. El cierre de estos rellenos es en dentro de 6 a 12 años desde la actualidad.

Tabla 1.1: Vida útil rellenos Sanitarios región de Valparaíso (En base a SUBDERE, 2019).

Rellenos sanitarios	Población regional que atiende	Año de cierre
El Molle	64,13%	2028
San Pedro	22,62%	2033
La Hormiga	10,75%	2034

La generación de residuos orgánicos e inorgánicos trae consigo costos asociados a su transporte y disposición en rellenos sanitarios. El decreto 2385|1996 del Ministerio del Interior, en su artículo 6° define que *“El servicio municipal de extracción de residuos sólidos domiciliarios se cobrará a todos los usuarios de la comuna, pudiendo este cobro ser diferenciado, utilizando al efecto diversos criterios, tales como programas ambientales, que incluyan, entre otros, el reciclaje; la frecuencia o los volúmenes de extracción; o las condiciones de accesibilidad. Los criterios utilizados para la determinación del cobro de estos servicios deberán ser de carácter general y objetivo, y establecerse por cada municipalidad a través de ordenanzas locales.”*

En la actualidad los costos de disposición final en rellenos sanitarios van desde los \$2.830 hasta los \$19.560 por tonelada en distintas comunas del país. Es importante destacar que la generación promedio de basura por habitante es del 1,19 kilo al día (MMA, 2021).

1.1.2 Beneficios de la gestión de residuos orgánicos municipales

La valorización y correcta gestión de los residuos orgánicos municipales trae beneficios ambientales, sociales y económicos, según lo detallado en la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos, Chile 2040, del Ministerio del Medio Ambiente.

Los principales beneficios que trae consigo la gestión de estos residuos son la reducción de la demanda de fertilizantes sintéticos, mejora en el ciclo de nutrientes, potencial de producir energías renovables (biogás), mejoras en las condiciones de trabajo, reducción de pérdidas y desperdicios de alimentos, nuevas fuentes laborales, reducción de costos asociados a disposición final en rellenos sanitarios, reducción de GEI, reducción en la cantidad de residuos depositados en rellenos sanitarios, comercialización de productos resultantes y mejoramiento de suelos degradados.

1.1.2.1 Disminución de emisiones de GEI

Al realizar una gestión adecuada de los residuos orgánicos municipales, es decir, al llevar a cabo un proceso de reciclaje de estos residuos o alguna otra forma de valorización o aprovechamiento, se puede disminuir la generación de GEI.

Al efectuar reciclaje por medio del proceso de compostaje de residuos orgánicos se disminuyen las emisiones de GEI ya que estos residuos podrán descomponerse de forma aeróbica impidiendo la formación de gas metano, debido a que el carbono presente en la materia orgánica no se mineraliza y queda retenido en el compost (resultante del proceso de

compostaje) el cual es un producto estable. Cabe destacar que materia orgánica estable tarda entre 100 y 1.000 años en descomponerse de esta manera (Amigos de la tierra, 2013).

Por otra parte, se puede realizar el reciclaje de estos residuos con tecnologías de biodigestores, los que consisten en un proceso de digestión anaeróbica de los residuos orgánicos, produciendo gas metano en un recipiente cerrado por lo que el metano es captado para su aprovechamiento energético en forma de biogás.

1.1.2.2 *Disminución de costos y uso asociado a rellenos sanitarios*

Al segregar y valorizar los residuos orgánicos municipales se ahorra energía y costos de transporte y disposición final en rellenos sanitario además de extender la vida útil de éstos minimizando, a su vez, otros impactos asociados a la descomposición de residuos como la proliferación de vectores sanitarios (moscas, aves, ratones), la generación de lixiviados y olores molestos (MMA,2020).

En el territorio nacional el costo de disposición final es variado y puede alcanzar valores cercanos a los \$20.000 por tonelada dispuesta, como es el caso de la comuna de Copiapó, la que genera un total de 57.927 toneladas de RSD y asimilables generando un costo total de disposición final de \$1.133.052.120. Este monto puede ser disminuido realizando segregación de los RSD y realizando reciclaje de estos residuos.

Tabla 1.2: Costos por disposición Final de RSD en 22 comunas del país (En base a SUBDERE, 2019).

COMUNA	Nº Hab. 2017	Total, RSD y asimilables(tonelada)	Tipo de instalación	Costo por tonelada dispuesta.	Costo de disposición final total.
Arica	221.364	136.986	Vertedero	\$2.830	\$387.670.380
Iquique	191.468	122.400	Vertedero	\$18.295	\$2.239.308.000
Alto Hospicio	108.375	43.537	Vertedero	\$6.393	\$278.332.041
Antofagasta	361.873	176.528	Vertedero	\$7.723	\$1.363.325.744
Caldera	17.662	11.976	Relleno Sanitario	\$6.500	\$77.844.000
Copiapó	153.937	57.927	Relleno Sanitario	\$19.560	\$1.133.052.120
Viña del Mar	334.248	151.423	Relleno Sanitario	\$7.000	\$1.059.961.000

Continuación tabla 1.2

COMUNA	N° Hab. 2017	Total, RSD y asimilables(tonelada)	Tipo de instalación	Costo por tonelada dispuesta.	Costo de disposición final total.
San Antonio	91.350	37.804	Relleno Sanitario	\$14.875	\$562.334.500
Villa Alemana	126.548	73.590	Relleno Sanitario	\$8.000	\$588.720.000
Rapa Nui	7.750	2.988	Vertedero	0	0
La Pintana	177.335	71.449	Relleno Sanitario	\$10.822	\$773.221.078
Maipú	521.627	179.337	Relleno Sanitario	\$8.930	\$1.601.479.410
Peñalolén	241.599	89.886	Relleno Sanitario	\$8.930	\$802.681.980
Calera de Tango	25.392	11.662	Relleno Sanitario	\$8.397	\$97.925.814
Rancagua	241.774	100.987	Relleno Sanitario	\$7.737	\$781.336.419
Talca	220.357	101.614	Relleno Sanitario	\$5.400	\$548.715.600
Santa Juana	13.749	3.679	Relleno Sanitario	\$11.694	\$43.022.226
Talcahuano	151.749	62.169	Relleno Sanitario	\$15.717	\$977.110.173
Curanilahue	32.288	11.617	Relleno Sanitario	\$13.322	\$154.761.674
Puerto Varas	44.578	16.287	Relleno Sanitario	\$6.666	\$108.569.142
Coyhaique	57.818	27.200	Relleno Sanitario	\$13.915	\$378.488.000
Punta arenas	131.592	45.550	Vertedero	\$13.317	\$606.589.350

El 58%, en peso, de los residuos sólidos municipales corresponde a residuos orgánicos, por lo que, al realizar la valorización de la totalidad de estos residuos evitando que se dispongan en rellenos sanitarios y/o vertederos, se ocuparía un 58% menos de la capacidad de los rellenos sanitarios.

1.1.2.3 Mejora de suelos

El reciclaje de residuos orgánicos mediante la técnica de compostaje y la gestión en biodigestores de residuos orgánicos tienen como producto final del proceso el compost y el digestato respectivamente. Estos productos son ricos en nutrientes e incrementan la disponibilidad de nitrógeno, fosforo, hierro y potasio (entre otros) y pueden ocuparse como

fertilizantes para el mejoramiento de suelos degradados y en suelos de zonas áridas pobres en materia orgánica, ya que mejoran la fertilidad del suelo por su fuente de nutrientes y materia orgánica, contribuyen con la estructura, el mantenimiento de las propiedades del suelo (Odlare *et al.*, 2011) y con la actividad biológica (Farrell y Jones, 2009), permitiendo así implementar áreas verdes de esparcimiento, zonas de cultivos, entre otros usos (MMA, 2020) en áreas con suelos degradados.

1.2 ESTRATEGIAS DE VALORIZACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES

El IPCC en el informe “Cambio Climático 2013” demuestra que el calentamiento global y el cambio climático son consecuencias de la actividad antrópica, enfatizando en la generación de GEI por parte de las actividades humanas.

El modelo económico actual lineal de “tomar- usar- desechar” es responsable en gran medida del cambio climático y el agotamiento de los recursos (Albaladejo *et al.*, 2021). Las estrategias de valorización y gestión de residuos surgen para combatir el modelo económico lineal actual para potenciar la economía circular y de este modo disminuir la generación de gases de efecto invernadero y la generación de residuos a nivel mundial.

La generación de residuos orgánicos, abordado por el modelo económico lineal genera problemáticas ambientales que potencial la generación de GEI y el calentamiento global, es por esto, que se elaboraron estrategias específicas para la gestión y valorización de estos residuos a nivel de políticas públicas y contribuciones voluntarias.

1.2.1 Estrategias de valorización y gestión de residuos orgánicos municipales a nivel mundial

- Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático adoptado por 196 países en la COP 21. Tiene como principal objetivo limitar el calentamiento global a 2°

Celsius en comparación con las temperaturas medias mundiales de periodos anteriores a la revolución industrial, para esto se establecen límites máximos de emisiones de GEI para cada país y medidas para la reducción de estas a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas. Este acuerdo entró en vigor el 4 de noviembre de 2016.

Los países que firmaron el acuerdo deben cumplir con los compromisos voluntarios, los que se refieren como “Contribuciones Determinadas a Nivel nacional” (NDC). Estas NDC abarcan las medidas que se tomarán para reducir los GEI y para el desarrollo de una resiliencia ante los impactos del calentamiento global.

- Objetivos de Desarrollo Sostenible- Naciones Unidas

La estrategia de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (UN) en el marco de la Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible contempla 17 objetivos para combatir desafíos globales actuales como la pobreza, cambio climático, degradación ambiental y justicia, entre otros. Los estados miembros de las Naciones Unidas deben prever un desarrollo coordinado a estos objetivos.



Producido en colaboración con TROLLBACK COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1 212 529 1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: @gicamp@trollback.org

Figura 1.2: Objetivos de desarrollo sostenible (UN, 2022).

En relación con la gestión y valorización de los residuos orgánicos el objetivo número 12 “producción y consumo responsable” pretende garantizar el consumo y producción sostenible con el fin de preservar y resguardar el medio ambiente.

Dentro del objetivo N°12 se encuentran metas asociadas a la gestión y valorización de residuos orgánicos, las metas 12.3 y 12.5 respectivamente.

La meta 12.3 establece que de aquí al año 2030, se debe reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha.

La meta 12.5 establece que de aquí al año 2030, se debe reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

1.2.2 Estrategias de valorización y gestión de residuos orgánicos municipales a nivel Nacional

En el marco de las estrategias mundiales del Acuerdo de París y los ODS se generaron, en Chile, una serie de estrategias para el reciclaje y valorización de residuos orgánicos municipales.

- Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos: Chile 2040

Nace a partir de la NDC al firmar el Acuerdo de París, ya que Chile se comprometió a elaborar una estrategia nacional de residuos orgánicos para dar cumplimiento a este compromiso en el contexto de la reducción de las emisiones de GEI y además para lograr un desarrollo hacia una economía circular mediante la valorización de estos residuos.

La estrategia se propone como meta pasar de un 1% a un 66% de valorización de los residuos orgánicos generados a nivel municipal al año 2040. En concreto, busca que la ciudadanía genere sustancialmente menos residuos orgánicos y separe en origen aquellos que no logran evitar en sus hogares, comercios, oficinas, establecimientos educacionales, parques, mercados y ferias libres, además de contar con infraestructura, equipamiento y sistemas logísticos que permitan que los residuos orgánicos sean utilizados como recurso en la producción de mejoradores de suelo, energía eléctrica y/o térmica (MMA, 2020).

Para cumplir con este objetivo se proponen metas al año 2030 en las cuales destacan: Contar con un 50 % de las instituciones públicas con sistemas de separación en origen y valorizando los residuos orgánicos generados por las mismas y valorizar un 30% de los residuos orgánicos

generados a nivel municipal, siendo fundamentalmente el trabajo de valorización municipal el principal alcance de esta estrategia.

- Programa Reciclo Orgánicos

El programa Reciclo Orgánicos surge del acuerdo de cooperación ambiental entre Chile y Canadá, el cual se crea para cumplir con las NDC del Acuerdo de París para disminuir las emisiones de GEI. El programa es implementado por el Ministerio del Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá y el Ministerio del Medio Ambiente de Chile y ejecutado por Arcadis Canadá con apoyo de Arcadis Chile e ImplementaSur.

El programa busca combatir el cambio climático a lo largo de Chile mediante la disminución de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios, a través del tratamiento por separado de la materia orgánica mediante uso de técnicas como compostaje o la digestión anaeróbica y también de la captura de gas en rellenos sanitarios, lo que resulta en la conversión de los residuos orgánicos en energía limpia y fertilizante natural. (ARCADIS, 2021). Además, ofrece orientación y asistencia técnica a distintos municipios para la valorización de los residuos orgánicos, además de difusión de material educativo y fomento del reciclaje a nivel nacional.

Reciclo orgánicos a prestado asistencia técnica a las municipalidades de las comunas de Rapanui, Talca, Santa Juana, Talcahuano, Villarrica, Castro, Puerto Varas, entre otras.

- Cobro Derechos de Aseo

El reajuste de los cobros de derechos de aseo es un incentivo que busca disminuir los costos asociados a un monto fijo anual de derechos de aseo. Si bien existe una gran cantidad de población que se encuentra exento de este cobro, este incentivo busca disminuir los valores de derechos de aseo a quienes participen de un programa de separación de residuos orgánicos. La Comuna de San Antonio puso en práctica este sistema ya que la Municipalidad de San

Antonio cuenta con un sistema de recolección diferenciada de residuos orgánicos y ha implementado un mecanismo de descuento a las viviendas que participan en este programa, el cual puede llegar hasta el 50% de la tarifa de aseo (MMA, 2019).

-Sistema de Certificación Ambiental Municipal (SCAM)

El SCAM es un sistema integral de certificación de carácter voluntario, que permite a los municipios poder ejecutarse en los territorios según los estándares de la ISO 14.001 de forma que la infraestructura, los procedimientos y servicios prestados por el municipio, además de que su personal, sea íntegro y cumplan con un servicio de calidad. El SCAM en sus líneas de trabajo contempla, reciclaje, ahorro energético e hídricos en las instalaciones y edificios municipales, fomento de la participación ciudadana, capacitación a todos los funcionarios municipales en temáticas ambientales para poder lograr un prestigio y reconocimiento del municipio, fomento de la educación ambiental en las comunas del país, fomento del reciclaje y gestión de residuos y empoderamiento de las unidades ambientales, entre otros.

SUBDERE asegura que los municipios que poseen algún nivel de certificación SCAM, han implementado o cuentan con algún instrumento de gestión de residuos. En el caso de aquellos municipios que tienen nivel SCAM “Gobernanza Ambiental Climática – Apresto”, todos cuentan, al menos, con un instrumento relacionado con gestión de residuos orgánicos.

- Programa Nacional de Residuos sólidos SUBDERE

Este PNRS es un programa de inversión pública que tiene como principal objetivo mejorar las condiciones de calidad ambiental y salubridad de los centros urbanos y rurales del territorio nacional, a través de la implementación de sistemas sostenibles para el manejo de RSD. Dentro de sus objetivos específicos contempla el fomento a programas e iniciativas destinadas a la reducción de la generación de RSD, promoviendo su reutilización, reciclaje y/o valorización con el fin de aumentar la vida útil de los sitios destinados a la disposición final de residuos (SUBDERE, 2018).

- Hoja de Ruta de Economía Circular al 2040

El año 2019 el Ministerio de Medio ambiente en conjunto con el Ministerio de economía, la Corporación de Fomento de la Producción y la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático iniciaron con la elaboración de una hoja de ruta para la economía circular con el principal objetivo de acelerar la transición del país hacia este modelo económico. Para guiar y evaluar el nivel de avance en la transición, se ha establecido un conjunto de metas de largo plazo al 2040, con metas intermedias al año 2030. Dentro de las principales metas al año 2040 se tiene la disminución del 25 % de la generación de residuos sólidos municipales per cápita, aumento de la tasa general de reciclaje de un 75% y aumentar la tasa de reciclaje de residuos sólidos municipales en un 65%, entre otros (MMA, 2020).

1.3 LEGISLACIÓN AMBIENTAL APLICABLE EN CHILE REFERENTE A RESIDUOS ORGÁNICOS

Actualmente en el país no existen normativas específicas asociadas a los residuos orgánicos o norma que regule el tratamiento de estos. Sin embargo, existe normativa asociada a los requisitos del compost obtenido del tratamiento de reciclaje de residuos orgánicos, normas asociadas al fortalecimiento de las actividades de valorización de residuos y fomento al reciclaje y normas que regulan la gestión de los residuos sólidos domiciliarios.

- Ley N° 19.300 “Sobre bases generales del medio ambiente y su reglamento”- Ministerio del medio ambiente.

Esta ley establece los proyectos que deben ingresar al Sistema de evaluación de impacto ambiental SEIA, encontrándose en ellos las plantas de compostaje debido a que cumplen con lo establecido en el artículo 10 letra o) “ Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos”.

- Ley N° 21.074 “Fortalecimiento de la Regionalización del país”- Ministerio del interior y seguridad pública.

Esta ley introduce una serie de modificaciones a distintos cuerpos legales con el objetivo de fortalecer regionalización en Chile. Entrega mayor autonomía en su gestión y aumento de funciones y atribuciones de los GORE (MMA, 2022). Esta ley fortalece la elaboración de planes regionales de ordenamiento territorial vinculando además de decir localización de la disposición de residuos sólidos domiciliarios entre los que se encuentran los RSM y Residuos orgánicos municipales.

- Ley N° 20.920” Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje”- Ministerio del Medio Ambiente.

Esta ley considera el compostaje como un tipo de reciclaje de residuos orgánicos. Además, establece en el inciso 3 del artículo 5 que “Los residuos sólidos domiciliarios y asimilables deberán ser entregados a la municipalidad correspondiente o a un gestor autorizado para su manejo”.

Por su parte, el artículo 6, indica que “Todo gestor deberá manejar los residuos de manera ambientalmente racional, aplicando las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, en conformidad a la normativa vigente, y contar con la o las autorizaciones correspondientes. Asimismo, todo gestor deberá declarar, a través del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, al menos, el tipo, cantidad, costos, tarifa del servicio, origen, tratamiento y destino de los residuos, de acuerdo con lo dispuesto en el reglamento a que se refiere el artículo 70, letra p), de la ley No. 19.300”.

- Norma Chilena NCh 3382:2016 del Instituto Nacional de Normalización “Gestión de residuos –Plantas de compostaje – Consideraciones para el diseño y operación”.

Norma que detalla los requisitos asociados al diseño y operación de una planta de compostaje.

- Norma Chilena NCh 2880:2015 del Instituto Nacional de Normalización “Compost-requisitos de calidad y clasificación”.

Norma que establece los requisitos de calidad del compost y diferentes categorías de clasificación de este producto.

- D.S. N° 1/2013 del Ministerio del Medio Ambiente “Reglamento del registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC)”.

Este decreto supremo en su artículo 3 define al destinatario de residuos como “todo recinto, edificación, construcción o medio fijo o móvil, debidamente autorizado, donde se realice una valorización o eliminación de residuos, bajo condiciones de operación controladas.” En el sentido de una planta de compostaje esta sería catalogada como un Destinatario de Residuos.

Además, establece en el artículo 18 que “Los establecimientos que generen más de 12 toneladas de residuos al año, las municipalidades, y los destinatarios de residuos, de acuerdo con los artículos 26, 27 y 28 del presente reglamento son sujetos obligados a reportar e informar a través del Sistema de Ventanilla Única”

- Decreto con Fuerza de Ley N° 725 del Ministerio de Salud, “Código Sanitario”

Establece en el artículo 11 letra b) que una obligación sanitaria de las municipalidades es recolectar, transportar y eliminar por métodos adecuados, a juicio del Servicio Nacional de Salud, las basuras, residuos y desperdicios que se depositen o produzcan en la vía urbana.

- Decreto 30/2017 del Ministerio de Relaciones Exteriores: “Promulga el acuerdo de París, adoptado en la vigésimo primera reunión de la conferencia de las partes de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático”.

1.4 TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGANICOS MUNICIPALES EN CHILE

1.4.1 Técnicas de tratamiento de residuos orgánicos municipales.

1.4.1.1 *Compostaje*

El compostaje es un proceso de descomposición y estabilización biológica de substratos orgánicos, bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termófilas como resultado del calor producido biológicamente (Haug, 1993). Los microorganismos presentes en este proceso, como bacterias y hongos utilizan el carbono y nitrógeno disponibles en los residuos orgánicos liberando energía calorífica producto de la actividad metabólica, produciéndose, además, agua, anhídrido carbónico y sales minerales (Avendaño, 2003) obteniendo como resultado un producto final estable llamado compost, libre de patógeno y semillas, y que puede ser aplicado de forma beneficiosa al suelo (Haug, 1993).

El compost puede servir como abono para mejorar las propiedades de los suelos y entregar nutrientes a las plantas y a su vez, funciona como mecanismo de reciclaje de los residuos orgánicos (Reciclo Orgánicos, 2021).

El compostaje presenta dos etapas, la etapa activa y la etapa de curado y posee un tiempo de maduración del compost resultante de 9 a 12 meses (Reciclo orgánicos, 2021)

La etapa activa es aquella donde se manifiesta el proceso de degradación de la materia orgánica en condiciones aeróbicas. En esta etapa la temperatura comienza a subir debido al proceso de descomposición de la materia por parte de organismos mesófilos (Fase mesófila). Posteriormente, los microorganismos termófilos predominan sobre los mesófilos y la temperatura aumenta aún más provocando la higienización del producto, eliminando patógenos (Environment Canada, 2013). Para lograr un correcto tratamiento de la materia orgánica se deben mantener parámetros de aireación y niveles de humedad óptimos para potenciar la actividad de microorganismos y hongos.

En la etapa de curado la materia orgánica comienza a descomponerse lentamente y disminuye la actividad microbiana, provocando la recolonización de los organismos mesófilos (fase mesófila de enfriamiento). La materia orgánica, una vez terminado el proceso de degradación alcanza una temperatura ambiente y se obtiene como resultado el compost maduro. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el material reduce su volumen de un 20 a 60% y reduce su humedad en un 40%.

A nivel municipal, el compostaje se puede realizar con técnicas de pila estática, pilas estáticas aireadas, pilas con volteo manual, pilas con volteo mecánico y vermicompostaje, entre otras.

-Materiales para compostar

Los residuos utilizados en el compostaje se pueden clasificar en material seco o café, los cuales se caracterizan por estar compuesto en gran cantidad por carbono, por ejemplo, podas secas, aserrín, cartón, papel, hojas secas, paja, entre otros; y material húmedo o verde, el que corresponde a residuos cuya composición es mayoritariamente de nitrógeno y agua, por ejemplo, frutas y verduras, podas verdes, entre otros (Reciclo orgánicos, 2021).

Tabla 1.3: Tipo de materiales para el proceso de Compostaje (En base a FAO, 2013)

Material café	Material Verde
-podas secas	- frutas
-aserrín	-verduras
-cartón	-podas verdes
-hojas secas	-bolsas de té
-paja	-pasto
-papel de periódico	
-cajas de huevo	

-Parámetros involucrados en el proceso de compostaje

Temperatura: este parámetro es un indicador de actividad microbiana, debido a que mientras mayor es la actividad microbiana mayor temperatura presentará el proceso de compostaje, es por lo que en la etapa activa de compostaje la temperatura es mayor que en la etapa de curado.

La temperatura promedio de la etapa activa es de 50-60° C, mientras que en la etapa de curado se presenta una temperatura promedio de 40°C (Reciclo orgánicos, 2021).

pH: indica la evolución del proceso de descomposición de la materia orgánica, ya que la formación de dióxido de carbono y ácidos orgánicos provocan que el pH baje a aproximadamente 5, luego el pH asciende a niveles de 8 a 9 debido a la liberación del dióxido de carbono, la producción de amoníaco y la aireación. Por lo tanto, se considera que los valores adecuados para la mezcla de partida se encuentran en el rango entre 5,5 y 8,0 (Docampo, 2013).

Humedad: es importante la humedad en el proceso de metabolismo de los microorganismos ya que estos pueden utilizar únicamente aquellas moléculas orgánicas que se disuelven en agua. En el proceso de compostaje un contenido de humedad de 45%-60% en peso es adecuado, mientras que uno menor indica que la actividad microbiana es lenta y una humedad mayor a 60% impide la aireación adecuada de la pila (FAO, 2013).

Aireación: En el proceso de compostaje la aireación es fundamental para llevar a cabo un proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica, ya que si este se genera en medios anaeróbicos provoca emanaciones de olores y emisiones de GEI, principalmente metano. Las concentraciones de oxígeno mayor del 10% se consideran óptimas para mantener la pila de compost en un medio aeróbico (Reciclo orgánicos, 2021).

Relación Carbono- nitrógeno: El carbono y el nitrógeno son fundamentales en el proceso de descomposición de la materia orgánica. El carbono proporciona una fuente de energía y además constituye aproximadamente el 50% de la masa de células microbiana (Brock y Madigan, 1991). El nitrógeno es un componente crucial de las proteínas, de los ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas y de las coenzimas necesarias para el crecimiento y la funcionalidad de la célula. Una célula bacteriana típica tiene de 12 a 15% de nitrógeno (Brock y Madigan, 1991), es decir, la relación carbono-nitrógeno determinará la velocidad de descomposición de los materiales a compostar contemplando escenarios de temperatura y humedad óptimos (Avendaño, 2013).

Tabla 1.4: Parámetro a considerar en el proceso de compostaje

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura	Etapa activa: 50-60 °C Etapa de curado: 40°C
pH	Etapa Activa: 5,5 Etapa de curado: 8
Humedad	50%-60%
Aireación	> 10%
C: N	25:1- 30-1

1.4.1.2 Lombricultura o Vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso de degradación de la materia orgánica en medio aeróbico combinado con la acción de microorganismo y principalmente de lombrices obteniendo como producto vermicompost o humus de lombriz (Lazcano, 2008).

Para la obtención de vermicompost, la especie de lombriz que comercialmente se emplea es la *Eisenia foetida* conocida comúnmente como la lombriz californiana roja, esta especie de lombriz en un día consume el alimento correspondiente a su propio peso.

La lombriz obtiene su alimento a partir de materiales orgánicos vegetales, frescos o en diferente estado de descomposición, para producir más biomasa de lombriz (crecimiento y nuevas lombrices) (FAO, 2013). Estas lombrices en su proceso digestivo degradan compuestos orgánicos complejos, como la celulosa, a compuestos más simples, quedando disponibles para los organismos vegetales al utilizar el vermicompost como abono.

Las lombrices californianas rojas requieren de altas concentraciones de materia orgánica para su alimentación, y de igual forma requiere de ciertas condiciones ambientales para realizar adecuadamente el proceso de degradación de la materia orgánica, como lo es una temperatura óptima de 19 a 25°C, con humedad del 80%, pH de 6,5-7,5 y baja luminosidad (FAO, 2013).

Para poder llevar a cabo el proceso de vermicompostaje se requiere de un contenedor o cama para el cultivo de lombrices con profundidad de aproximadamente de 50 cm. ya que las

lombrices normalmente profundizan en el sustrato buscando alimento, pero no lo hacen más allá de 40 cm. (Schultz *et al.*, 2007).

Tabla 1.5: Parámetros a considerar en el proceso de vermicompostaje

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura	19-25 °C
pH	6,5-7,5
Humedad	80%

1.4.2 Tratamiento de residuos orgánicos municipales en comunas del país.

Con el fin de poder alargar la vida útil de los rellenos sanitarios y vertederos, además de seguir las estrategias de reciclaje de residuos orgánicos y poder valorizarlos, municipalidades a lo largo de Chile han optado por tratar y/o valorizar los residuos orgánicos.

Al año 2018 solo 46 municipios, de un total de 346, realizaban algún tipo de gestión o valorización de los residuos orgánicos municipales, según lo descrito en el informe de “Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables” de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) del año 2019, como se expone en la tabla 1.6.

Tabla 1.6: Tratamiento de residuos orgánicos municipales en comunas del país (SUBDERE, 2019)

Región	Comunas que realizan tratamientos de residuos orgánicos.				
	Compostaje y vermicompostaje	Compostaje	Vermicompostaje	Sin tratamiento	Municipios por región
Arica y Parinacota	-	-	-	4	4
Tarapacá	-	-	1	6	7
Antofagasta	-	1	-	8	9
Atacama	-	-	-	9	9
Coquimbo	-	-	-	15	15
Valparaíso	7	6	1	24	38
Metropolitana de Santiago	1	4	2	45	52
Del Libertador general Bernardo O'Higgins	3	-	-	30	33
Maule	-	1	-	29	30
Biobío	-	3	-	30	33

Continuación tabla 1.6.

Región	Comunas que realizan tratamientos de residuos orgánicos.				Municipios por región
	Compostaje y vermicompostaje	Compostaje	Vermicompostaje	Sin tratamiento	
Ñuble	-	-	-	21	21
La Araucanía	-	5	1	26	32
Los Ríos	2	4	-	24	30
Los Lagos	1	3	-	8	12
Aysén	-	-	-	10	10
Magallanes y la Antártica Chilena	-	-	-	11	11
Total	14	27	5	300	346

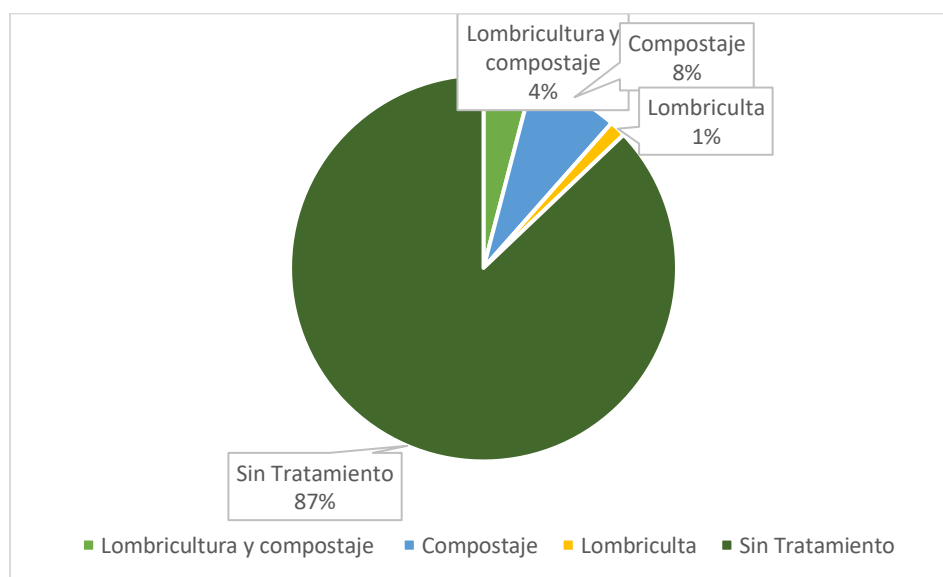


Figura 1.3: Tratamiento realizado a residuos orgánicos por comuna (SUBDERE, 2019).

En conjunto con el Programa Reciclo Orgánicos y el asesoramiento técnico que brinda este programa, las comunas que generaron un sistema de tratamiento de residuos orgánicos son las que se exponen en la tabla 1.7.

Tabla 1.7: Comunas con proyectos de gestión de residuos orgánicos con asesoramiento técnico de programa Reciclo Orgánicos (En base a Reciclo Orgánicos, 2022).

Comuna	Sistema de tratamiento	Potencial de mitigación
Rapa Nui	Planta de compostaje	2.923 ton CO_2 -eq durante 2022-2040
Talca	Planta de compostaje Gore-tex	85.789 ton CO_2 -eq durante 2011-2040
Santa Juana	Planta de compostaje	14.022 ton CO_2 -eq durante 2019-2040
Talcahuano	Planta de compostaje	35.407 ton CO_2 -eq durante 2019-2040
Villarrica	Planta de compostaje	18.929 ton CO_2 -eq durante 2022-2040
Puerto Varas	Planta de compostaje	21.873 ton CO_2 -eq durante 2022-2040
Castro	Planta de compostaje	16.154 ton CO_2 -eq durante 2022-2040
Quellón	Planta de compostaje	16.154 ton CO_2 -eq durante 2022-2040
Ancud	Planta de compostaje	16.154 ton CO_2 -eq durante 2022-2040

1.5 TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES EN LA COMUNA DE VIÑA DEL MAR.

1.5.1 Comuna de Viña del Mar

La comuna de Viña del Mar pertenece a la provincia y región de Valparaíso, es una ciudad costera ubicada en el litoral central perteneciente a la cuenca del estero Marga-Marga. Viña del Mar tiene una superficie total de 121,6 km^2 y se encuentra ubicada en las coordenadas 33°01'23"S 71°33'07"O a una altitud media de 2 msnm.

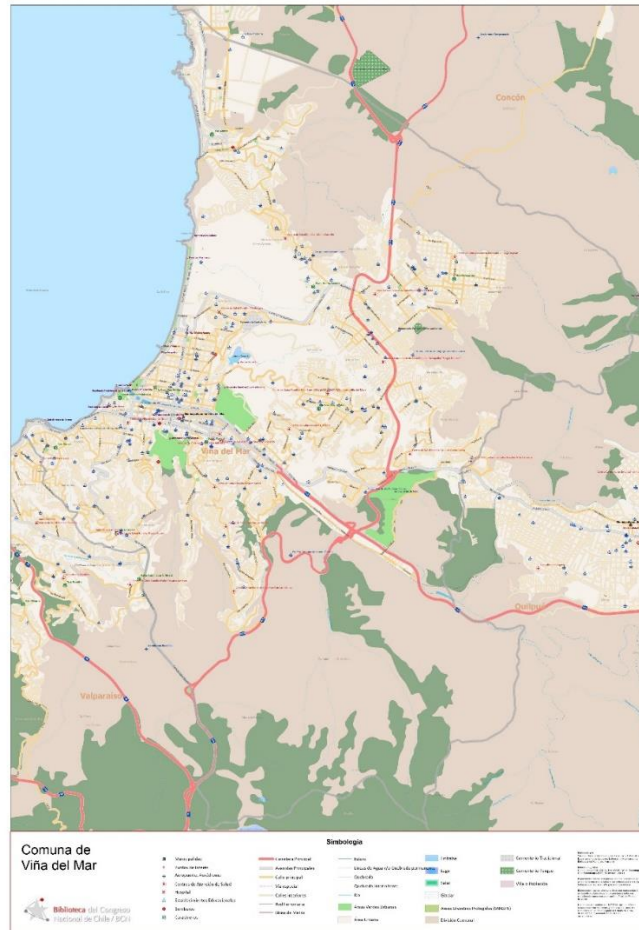


Figura 1.4: Mapa comuna de Viña del Mar (BCN, 2021)

Cuenta con una población de 334.248 habitantes registrados en el censo poblacional del año 2017. Esta comuna posee un clima de tipo templado mediterráneo con lluvias invernales y estaciones secas prolongada, posee una vegetación de tipo esclerófilo costero, según las definiciones de formaciones vegetaciones (Gajardo, 1994).

Se reconoce el nacionalmente el potencial turístico de la comuna, como “capital turística de Chile” debido a su geografía, desarrollo paisajístico y atractivos culturales.

1.5.2 Departamento de Servicios del Ambiente (DSA)

La Ilustre Municipalidad de Viña del Mar, bajo la Dirección de Operaciones y Servicios cuenta con el Departamento de servicios del ambiente, el cual se divide en tres secciones: sección aseo, sección medio ambiente y sección parques y jardines.

En la figura 1.5 se detalla el organigrama resumido de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar, el que se encuentra enfocado en el Departamento de Servicios del Ambiente.

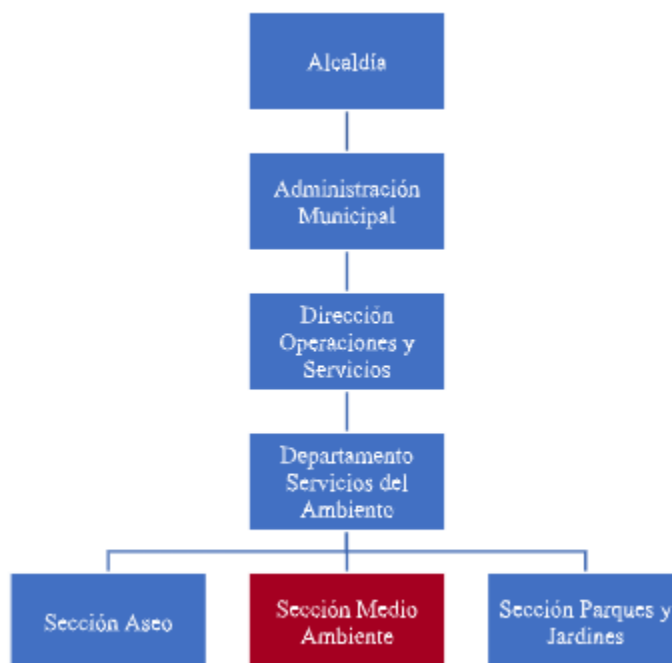


Figura 1.5: Organigrama resumido municipio de Viña del Mar (Sección medio ambiente, 2022).

Este departamento posee un plan integral de trabajo en el área de reciclaje coordinado por el programa “Viña recicla” de la sección de medio ambiente, el cual tiene como objetivo sensibilizar a la comunidad respecto al manejo de los residuos domiciliarios y fomentar la economía circular contemplando el reciclaje de residuos inorgánicos como orgánicos.

El Departamento de servicios del ambiente, en su balance 2021, informa ese mismo año se logró la gestión adecuada de 2.551.636 kg de residuos, el catastro específico de estos se contempla en la tabla 1.8.

Tabla 1.8: Balance de residuos recuperados por el municipio de Viña del Mar (Departamento de servicios del ambiente, 2022).

Tipo de residuo	Cantidad recuperada (kg)
Papel y cartón	59.826
PET 1	173.130
HDPE	408
Vidrio	1.553.270
Neumáticos	6.960
Cajas de bebida	209
Tapas polipropileno	4.659
Aceite vegetal	729
Metales	202
Orgánicos	749.732
Eco ladrillos	2.511

1.5.3 Reciclaje de residuos orgánicos

En base a al programa “Viña Recicla” funciona actualmente la planta de compostaje municipal de la comuna de Viña del Mar. Esta planta cuenta con 65 pilas de compostaje estáticas con volteo manual que permitieron la gestión de aproximadamente 749.732 kilogramos de residuos orgánicos el año 2021, provenientes de podas de parques y jardines municipales, residuos vegetales de ferias libres y de programa piloto de recolección selectiva en origen de residuos orgánicos domiciliarios en la Unidad Vecinal Cerro Castillo. Este sistema de compostaje requiere de una mejora continua para poder sobrellevar las necesidades de la población relacionadas con el contexto de crisis climática actual, además de poder cumplir con el propósito de la Estrategia Nacional de residuos orgánicos que propone un alcance de valorización de residuos orgánicos generados a nivel municipal de un 30%.

Tabla 1.9: Cantidad de residuos orgánicos valorizados en la comuna de Viña del Mar (Departamento de servicios del ambiente 2019-2022).

Año	Cantidad de Residuos orgánicos valorizados (kg)
2017	0
2018	0
2019	545.092
2020	740.876
2021	749.739

1.5.4 Beneficios del reciclaje de residuos orgánicos.

El compostaje de residuos orgánicos municipales, para el municipio de Viña del Mar, ha traído beneficios principalmente económicos (Reginato, 2020). Los beneficios de esta gestión permiten al municipio ahorrar un total estimado de \$115 millones al año ya que se disminuyen los costos de traslado de residuos a rellenos sanitarios y disminuyen los costos asociados a disposición de residuos en relleno sanitario El Molle además de reducir totalmente los costos por compra de tierra de hoja a proveedores externos (Ilustre Municipalidad de Viña del Mar, 2019). Por otro lado, los beneficios sociales del compostaje municipal de residuos orgánicos traen consigo nuevas y mejores condiciones para el trabajo de recolectoras/es de residuos y recicladoras/es de base considerando que los materiales de su interés se encontrarán más limpios, debido al manejo adecuado de residuos orgánicos, impactando positivamente en el cumplimiento de la meta de valorización asociada a la responsabilidad extendida del productor y la generación de nuevas fuentes de trabajo y fortalecimiento de emprendimientos locales existentes (MMA, 2020).

2. PROBLEMA

La comuna de Viña del Mar fue declarada en estado de emergencia climática y ecológica el año 2021 por la alcaldesa Macarena Ripamonti. Esta declaración obedece a un compromiso ambiental del Municipio rigente para abordar los graves problemas ambientales que enfrenta la ciudad, el país y el mundo, con el fin de lograr que la comuna de Viña del Mar sea una ciudad sustentable y respetuosa con el medio ambiente (Macarena Ripamonti, 2021).

Para lograr un municipio sustentable se establecieron líneas de acción y se adoptaron estrategias para el cumplimiento de este propósito, donde destacan las asociadas a gestión de residuos sólidos domiciliarios, principalmente sobre la gestión de residuos orgánicos como lo son la Estrategia de Residuos Orgánicos Chile 2040 y el programa Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040, que establecen el cumplimiento de la meta de valorizar el 30% de los residuos orgánicos generados a nivel municipal al año 2030 y la disminución del 10% de la generación de estos residuos para el mismo año, de este modo, también se alarga la vida útil de los rellenos sanitarios, en especial del relleno El Molle, ya que se encuentran al límite de su capacidad y es el único en el cual la comuna realiza la disposición final de RSD.

El problema radica en que municipio de Viña del Mar posee un centro de compostaje de residuos orgánicos comunal con una capacidad de valorización cercana a los 750.000 kilogramos de residuos orgánicos anuales, los que corresponden al 0,6% de los residuos orgánicos generados en la comuna. Para el cumplimiento de las estrategias adoptadas por el municipio esta fracción debe ascender al 30%, por lo tanto, se hace fundamental una mejora en el sistema de compostaje de la planta comunal incorporando técnicas para aumentar la capacidad de valorización de residuos orgánicos bajo los requerimientos de la comuna.

De este modo se logrará disminuir las problemáticas ambientales asociadas a la disposición final de estos residuos, alargar la vida útil del relleno sanitario y cumplir con las metas de reciclaje de residuos orgánicos al año 2030 de las estrategias del MMA.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Evaluar técnicas para el aumento de la capacidad de compostaje de residuos orgánicos de la planta de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar y contrastar diferentes técnicas para el compostaje de residuos orgánicos a nivel municipal.
- Evaluar técnicamente dos alternativas de compostaje competentes para la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar.
- Realizar un análisis de costos asociados a las alternativas evaluadas técnicamente.
- Proponer indicadores de calidad y eficiencia del proceso de compostaje y del compost resultante.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para llevar a cabo la propuesta se trabajó con una metodología basada en cada objetivo específico propuesto en este trabajo de título, lo que corresponde a un análisis de información y selección de técnicas y tecnologías de compostaje de residuos orgánicos a nivel municipal por medio de revisión bibliográfica e información obtenida por parte del Departamento de Servicios del Ambiente de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar.

A continuación, se presentan los objetivos específicos y la metodología utilizada para llevar a cabo cada uno.

- 1- Analizar y contrastar diferentes técnicas para el compostaje de residuos orgánicos a nivel municipal.

Para llevar a cabo este objetivo específico se realizó la evaluación de tecnologías y técnicas de compostaje de residuos orgánicos a nivel municipal por medio de revisión bibliográfica, de este modo, se logró identificar aquellas alternativas que tienen un menor tiempo de procesamiento de los residuos orgánicos abarcando mayor cantidad de estos en el proceso de compostaje. Para lo cual, se generó un listado de técnicas y tecnologías de compostaje analizadas incluyendo su funcionamiento y los requerimientos respectivos a cada tecnología. Posteriormente se realizó una tabla comparativa en donde se contrastan los distintos requerimientos de cada técnicas y tecnologías antes analizadas.

- 2- Evaluar técnicamente dos alternativas de compostaje competentes para la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar.

Para el logro del segundo objetivo específico se realizó una proyección de generación de residuos orgánicos en la comuna de Viña del Mar para evaluar la capacidad de la planta de compostaje al año 2030, con el fin de conseguir el cumplimiento de las metas de las estrategias de valorización impuestas por el MMA acogidas por el municipio.

Posteriormente se realizó una selección de dos técnicas de compostaje por medio de una evaluación de requerimientos y se analizaron técnicamente.

- Proyección de generación de residuos orgánicos en la comuna de Viña del Mar.

La proyección de residuos orgánicos generados en la comuna de Viña del Mar se realizó por medio de la metodología sugerida por el Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO), para la formulación y evaluación de proyectos del fondo para el reciclaje 2020, donde se utilizó la ecuación 4.1 para el cálculo de la producción per cápita de residuos en la comuna.

$$PPC \left(\frac{kg}{\text{persona día}} \right) = \frac{TAD \left(\frac{ton}{\text{año}} \right) * 1.000 \left(\frac{kg}{ton} \right)}{P(\text{personas}) * 365 \left(\frac{días}{\text{año}} \right)}$$

Ecuación 4.1 Fórmula para el cálculo de la PPC (MIDESO, 2020).

Donde:

PPC: producción per cápita de residuos

TAD: total de toneladas anuales dispuestas en el relleno sanitario

P: Población atendida

Una vez obtenida la producción per cápita de residuos se debe realizar una proyección de la generación de estos en un tiempo determinado considerando la tasa de crecimiento de la población, para lo cual el MIDESO sugiere el uso de las ecuaciones 4.2 y 4.3.

$$PPC_t = PPC_{t-1}(1 + g)$$

Ecuación 4.2 Fórmula para el cálculo de la PPC proyectado (MIDESO, 2020).

Donde:

PPC_t : Producción per cápita de residuos correspondientes al año t

g: tasa de crecimiento media anual sugerida

$$TAD_t = PPC_t * f * P_t$$

Ecuación 4.3 Fórmula para el cálculo de las toneladas de residuos generados en un tiempo proyectado (MIDESO, 2020).

Donde:

TAD_t : total de toneladas de residuos generadas en el año t

PPC_t : producción per cápita de residuos en el año t

f : proporción de la población en el año base

P_t : población total atendida por el servicio de recolección y disposición final al año t

- Evaluación de técnicas de compostaje

Para la selección de técnicas de compostaje adecuadas para su posible implementación en la planta de compostaje municipal de la comuna de Viña del Mar, fue necesario evaluar los parámetros fundamentales de cada técnica abordada en el cumplimiento del primer objetivo específico. Los parámetros fundamentales de evaluación son el tonelaje anual, tipo de material a compostar, tiempo de obtención del compost, tipo de producto final y la escala de compostaje de la técnica evaluada. Los puntajes de cumplimientos se detallan en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Puntaje de los parámetros a evaluar en cada técnica de compostaje

Parámetro para evaluar	Requerimiento	Puntaje cumplimiento	Puntaje no cumplimiento
Tonelaje anual	19.559	10	0
Tipo de material	RSD	20	0
Tiempo de obtención del compost	Hasta 6 meses	10	0
Tipo de producto final	Uniforme	15	0
Espacio	Mediana escala	10	0

Posterior a la evaluación, se realizó un análisis completo del sistema de compostaje para las dos técnicas seleccionadas, donde se detallaron sus principales características, las necesidades de pretratamiento y post tratamiento de los materiales, se describieron los parámetros de control, se establecieron los requerimientos de espacio, maquinaria y mano de obra respectivos de cada técnica, además, se elaboraron diagramas del proceso final de compostaje correspondiente.

3- Realizar un análisis de costos asociados a las alternativas evaluadas técnicamente

En este análisis se realizó una estimación de costos asociados a la implementación de cada sistema de compostaje, basado en cotizaciones realizadas de maquinaria, estructuras y equipos, además del costo mensual de mano de obra requerido por cada técnica.

Se realizó, además, un el cálculo del PRI o periodo de recuperación de la inversión realizada en la implementación de cada técnica, en este cálculo se realizó con la ecuación 4.4.

$$PRI=I_0 /F$$

Ecuación 4.4: Periodo de recuperación de la inversión (Montero ,2017)

Donde:

PRI: Periodo de recuperación de la inversión

I_0 : Inversión año 0

F: valor flujo de caja

Se contrastó el análisis de costos con un análisis de los beneficios de cada técnica de compostaje. El análisis de los beneficios se realizó en base a la capacidad de gestión de residuos de cada sistema por año de funcionamiento, de este modo, se establecen los costos asociados a los beneficios de la gestión y valorización de los residuos orgánicos mediante el compostaje según cada técnica.

4-Proponer indicadores de calidad y eficiencia del proceso de compostaje y del compost resultante.

-Por medio de revisión bibliográfica de la Norma Chilena NCh 2880:2015 del Instituto Nacional de Normalización “Compost-requisitos de calidad y clasificación” se seleccionaron indicadores de eficiencia del proceso de compostaje, en cuanto a parámetros de cumplimiento necesario para un funcionamiento óptimo del proceso de compostaje en base a la normativa antes mencionada,

y de calidad del producto final o compost obtenido en base a las necesidades del producto final deseable resultante del proceso de compostaje, es decir, de un compost de alta calidad para su uso directo, además de identificar los parámetros de control a evaluar en cada técnica, los resultados óptimos deseados y la metodología para abordar el control de parámetros.

5-RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES

El compostaje a nivel municipal es una forma centralizada de valorización de los residuos orgánicos, donde los residuos provenientes de los hogares de la comuna son procesados mediante una técnica de compostaje para obtener como resultado abono natural, rico en nutrientes llamado compost.

La técnica de compostaje que se utilice para realizar una valorización de los residuos orgánicos a nivel municipal dependerá de los requerimientos de la comuna, el tipo de material a tratar, el clima del sitio de emplazamiento, la disponibilidad de terreno, presupuesto, entre otros.

El compostaje municipal es una técnica utilizada hace años para la valorización de los residuos orgánicos, especialmente en Europa y países como Estados Unidos y Canadá, debido a esto, los sistemas de compostaje se han diversificado y perfeccionado para cumplir con distintos requerimientos, desde técnicas simples y económicas hasta técnicas complejas y con mayores costos (Enviroment Canada, 2013). A continuación, se realizará un análisis de diversas técnicas de compostaje y estas se clasificarán en sistemas abiertos y cerrados (Bertoldi *et al*, 1985).

5.1.1 Sistemas abiertos

Los sistemas de compostajes abiertos son aquellos donde los residuos orgánicos se disponen al aire libre y su proceso de degradación es sometido a los cambios climáticos de la zona a

efectuar el proceso de obtención del compost, generalmente estos procesos poseen menor costo de inversión, pero requieren de mayor tiempo de procesamiento (Jarre, 2015; Burgos, 2022).

5.1.1.1 Pilas estáticas

El compostaje con la técnica de pilas estáticas es el sistema de compostaje más antiguo (INTEC, 1999), simple y económico (Tortosa, 2015). La técnica se basa en la formación de pilas con los residuos a compostar, es decir, los materiales se apilan sobre el suelo, en forma de pila, sin comprimirlos, no superando una altura de 2 metros de alto, idealmente al aire libre.

La altura de la pila de compostaje es un parámetro que afecta directamente el contenido de humedad, cantidad de oxígeno y la temperatura del sistema de compostaje. Esta técnica utiliza un sistema de aireación natural propio de los materiales a compostar y las condiciones climáticas de la zona, es por lo que ocurren procesos de anaerobiosis zonales, con generación de malos olores, gases y líquidos (Haus, 2013).

El tamaño y longitud de una pila viene definido por la cantidad de material a compostar y el área disponible para realizar el proceso (FAO, 2013). Sin embargo, no es una técnica adecuada para grandes cantidades de residuos sólidos ricos en nitrógeno (residuos principalmente domiciliarios) ya que las demandas de aireación y la generación de olores no se pueden manejar adecuadamente en grandes cantidades de residuos. Según lo descrito por el Manual de Compostaje de Reciclo Orgánicos, la técnica de compostaje por pilas estáticas es adecuada para pequeñas cantidades de materiales rico en carbono menores a 500 toneladas al año con un tiempo de procesamiento lento debido a la deficiente aireación, demorando entre 18 y 24 meses el proceso total de compostaje del material, así mismo, el producto final obtenido será de baja calidad como consecuencia de las anaerobiosis zonales de la pila por aireación desigual (INTEC, 1999).

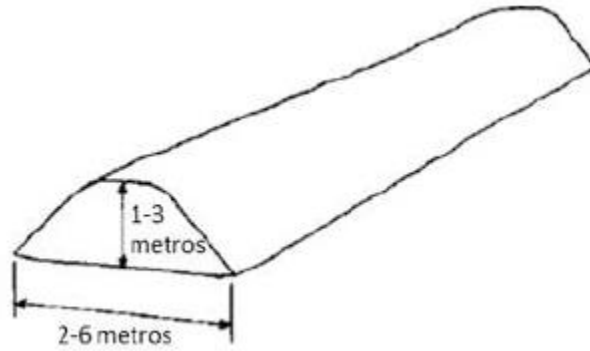


Figura 5.1: Sistema de compostaje en pilas estática (Reciclo orgánicos, 2021)

5.1.1.2 Pilas con volteo manual

El sistema de pilas con volteo es técnicamente idéntico al de pilas estáticas en cuanto a la disposición y formación de la pila, sin embargo, el tamaño de la pila dependerá de la cantidad de residuos a compostar y no podrá superar el metro de alto ya que en esta técnica se realiza aireación mediante volteo manual con el fin de homogenizar la mezcla, mejorar la aireación y disminuir el tiempo de procesamiento de los residuos (Environment Canada, 2013).

Las pilas son aireadas inicialmente en forma natural y luego se realiza volteo del material manualmente. La razón de cambio de aire depende de la porosidad de la pila, si la pila es muy grande, las zonas anaeróbicas cercanas al centro liberan olores cuando la pila es volteada (Virginia Tech, 1997).

La frecuencia de volteo depende de la relación de descomposición, de la humedad contenida, la porosidad de la materia, la temperatura y el tiempo de compostaje deseado. Debido a que la relación de descomposición es mayor al comienzo del proceso, es decir, se descompone mayor masa de materia orgánica debido a la fase termófila del compostaje, la frecuencia de volteo también lo es, y esta decrece con la edad de la pila. Las pilas con mezcla de nitrógeno (material verde como frutas, verduras, podas verdes de pasto, entre otros) requiere volteos

diarios al comienzo del proceso, cuando el proceso continúa la frecuencia de volteo puede ser reducida a un volteo por semana (NRAES, 1992).

5.1.1.3 Pila con volteo mecánico

La técnica de compostaje con volteo mecánico es similar al compostaje con pilas de volteo manual, sin embargo, en esta técnica se utiliza un sistema mecánico de volteo. El volteo puede realizarse por medio de una pala cargadora frontal, volteador lateral de compost o una maquinaria a fin. Actualmente se cuenta con un mercado de sistemas diseñados especialmente para el volteo de biomasa en diversas dimensiones y según distintos requerimientos (Docampo, 2013; FAO, 2013). El sistema utilizado para el volteo determinará las dimensiones de la pila de compostaje fluctuando su altura entre 1 a 4 metros y por su parte la longitud de la pila dependerá del área disponible para el proceso de compostaje y a la cantidad de residuos a compostar.

La técnica de volteo mecánico acelera la degradación física de la materia prima (Reciclo orgánicos, 2021) ya que la maquinaria o volteadoras de material reconstruyen la porosidad de la pila y libera el calor atrapado, el vapor de agua y gases (Virginia Tech, 1997), esto expone todo el material igualmente al aire de la superficie exterior y a las altas temperaturas dentro de la pila. De esta forma, se evitan compactaciones, proliferación de vectores, fermentaciones con emanaciones de gases y se mantiene un control de la temperatura, del pH y de la humedad (Sztern, 1999).

El volteo debe ir disminuyendo a medida que pasa el tiempo de compostaje, se recomienda, por ejemplo, que durante el primer mes se realice dos veces a la semana; en el segundo mes una vez a la semana; el tercer mes cada 15 días y los meses restantes una vez al mes, dependiendo de la mezcla utilizada (INTEC, 1999).

- Pilas de volteo con pala frontal o pala cargadora frontal.

Este sistema es uno de los más simples para las técnicas de volteo mecánico, especialmente utilizados en sistemas de pequeña escala (Docampo, 2013). Las pilas de compostaje pueden alcanzar alturas de 3 metros, debido a la capacidad de volteo de la pala frontal, sin embargo, según lo señalado por el Manual de compostaje de la FAO, idealmente estas pilas deben ser de una altura de 1,5 metros.

Con la pala frontal se puede voltear el compost acercándose perpendicularmente a la pila desde un costado de ésta y extrayendo compost para dejarlo a un costado o en el mismo lugar en que estaba. La manera adecuada para que la pala cumpla su función es elevar el material y dejarlo caer desde cierta altura de manera que el compost se oxigene mientras cae al suelo, realizando esto sucesivamente hasta haber volteado todo el material de la pila (FAO, 2013).

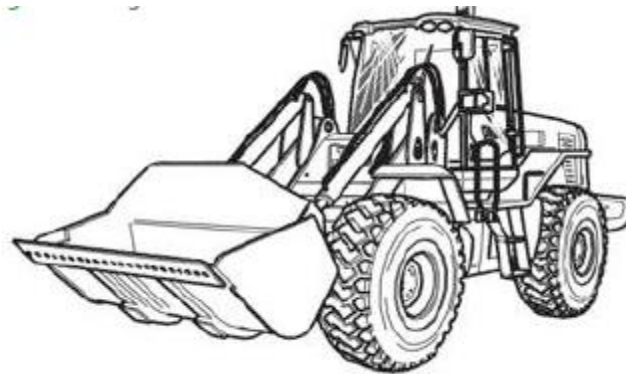


Figura 5.2: Cargador frontal (Reciclo orgánicos, 2021).

- Pilas con volteo mecánico con volteador lateral de compost

Este sistema de compostaje consiste en pilas de material a compostar las cuales son volteadas por una maquina llamada Volteador de compost para realizar el proceso de aireación. Se puede utilizar una maquinaria conectada a un tractor o un volteador autónomo.

El volteador es una maquina creada especialmente para la tarea de voltear las pilas de compost y está compuesto por una estructura metálica que soporta el mecanismo completo, es soportada por un eje con ruedas en la parte posterior de la estructura y conectado a un tractor tanto en el enganche como en la toma de fuerza. De esta manera, con el movimiento del rotor es posible voltear la pila, ya que el rotor eleva el material y lo impulsa hacia arriba y hacia atrás debido a su velocidad de giro, que varía dependiendo del material entre las 150 a 250 rpm. La volteadora avanza a través de la pila arrastrada por el tractor que avanza paralelo a la pila de compostaje y el compost va apilándose en la parte posterior del volteador en forma trapezoidal y pareja (en forma de pila). La pila es volteada completamente con una sola pasada del tractor con la volteadora a lo largo de ella (Montero, 2006), esto permite que una instalación de compostaje en pilas aumente su capacidad de rendimiento anual, debido a que el volteo de pilas introduce oxígeno a estas, acelera la degradación física de las materias primas y brinda la oportunidad de ajustar el contenido de humedad y temperatura al nivel óptimo (Reciclo orgánicos, 2021).

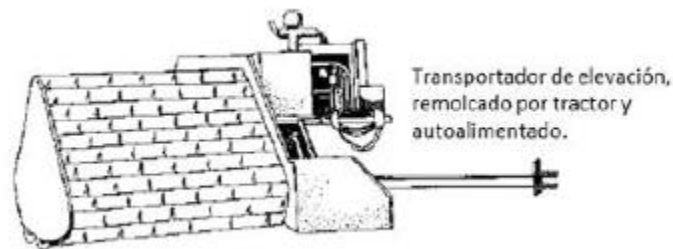


Figura 5.3: Volteador de compost remolcado por tractor (NRAES, 1992).

Por otro lado, el volteador autónomo de compost funciona de la misma manera, sin embargo, este no necesita de un tractor para el desplazamiento, algunos volteadores tienen la capacidad de introducir humedad en la pila durante el giro, en caso de requerirlo (Reciclo orgánicos, 2021).

La frecuencia de volteo determinará el tiempo de compostaje total, debido a que un volteo más frecuente rompe las partículas y reduce el tiempo de degradación aumentando la aireación y porosidad de la pila, acelerando así el proceso de compostaje (Reciclo orgánicos, 2021).

Esta técnica de compostaje tiene una capacidad mayor a 5.000 toneladas anuales y tiene la ventaja de producir un compost uniforme en un tiempo aproximado de 1-6 meses dependiendo de la frecuencia de volteo, con un volteo poco frecuente se estima un tiempo promedio de 6 meses, por otro lado, con un volteo continuo el tiempo de procesamiento promedio es de 2 meses (NRAES, 1992).

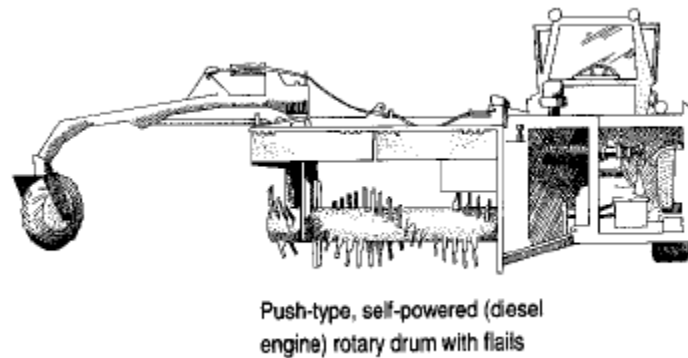


Figura 5.4: Volteador de compost autónomo (NRAES, 1992).

5.1.1.4 Compostaje de pilas con aireación pasiva

Esta técnica de compostaje se basa en la entrada de aire a la pila a través de una red de conductos tubulares, generalmente de PVC, que se colocan en la parte inferior de la pila, el aire entra por los tubos sin presión, debido a que en esta técnica no se utilizan ventiladores para su inyección. Para un funcionamiento óptimo, la altura máxima recomendada para la pila es de 1,0 a 1,5 metros (Avendaño, 2013), ya que el material a compostar permanece estático durante todo el proceso de compostaje, es decir, no se realizan volteos, por esta razón los materiales a utilizar deben ser porosos y homogéneos como fangos o lodos, para utilizar esta técnica en materiales provenientes de RSD se debe realizar volteo (Valverde, 2018).

Las pilas deben ser cubiertas con residuos café, como virutas de madera o compost terminado para evitar la pérdida de calor del interior de la pila, disminuir la emisión de olores y la aparición de vectores sanitarios (NRAES, 1992).

Debido a las altas temperaturas al interior de la pila, los gases generados (vapor de agua y dióxido de carbono) generan una corriente ascendente para su liberación al medio, esto produce un pequeño vacío al interior de la pila que es suplido por el aire rico en oxígeno que circula por los conductos de aireación. Sin embargo, la disposición desigual de la red de conductos tubulares provoca una mala ventilación para el material en proceso de compostaje, debido a que hay material que no quedará en contacto con la aireación de la red de tubos (Pérez, 2008).

Esta técnica tiene un proceso de maduración del compost lento, variando de 12 a 18 meses, además, tiende a producir un compost poco uniforme, debido al flujo de aire desigual (Reciclo orgánicos, 2021).

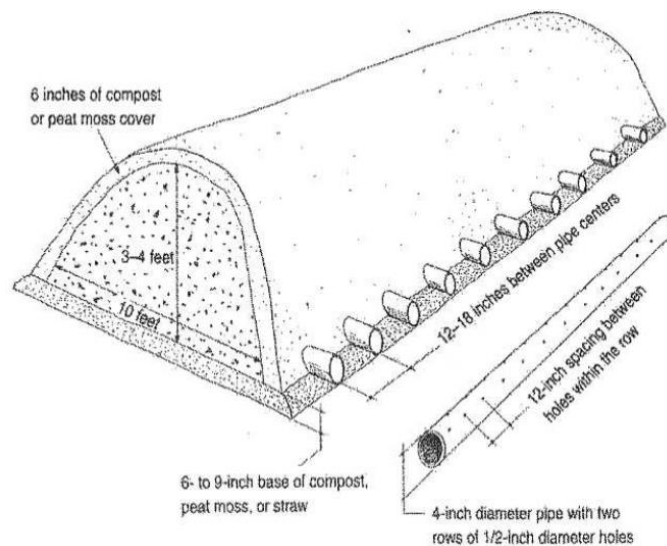


Figura 5.5: Pila de compostaje con aireación pasiva (NRAES, 1992).

5.1.1.5 Pila estática con aireación forzada

Esta técnica de compostaje se basa en el uso de difusores de aireación que inyectan o succionan aire a través de un medio mecánico forzado, como lo son las bombas, el cual se instala en la base de la pila de materiales a compostar. Debido a la potencia en la inyección de aire, este llega a lugares de la pila que en la aireación pasiva no y se logra un proceso de compostaje parejo. Las pilas estáticas aireadas mecánicamente que se operen en el exterior (aire libre) deben usar una aireación negativa (succión de aire a través de la base de la pila) para dirigir el flujo de aire hacia un sistema de control de olores. Las pilas estáticas aireadas en interiores pueden usar una aireación positiva. El aire es recolectado, con el objetivo de eliminar y tratar olores a través de un sistema de control de olores (Reciclo orgánicos, 2021).

Este método ha probado ser uno de los más efectivos sistemas de compostaje, sin embargo, posee requerimientos energéticos y económicos mayores (Ramírez, 2013), ya que requiere una serie de equipamiento, como un compresor, red de tuberías, válvulas, sistema de control de olores y sistemas de control de presión de aire, temperatura y humedad (Avendaño, 2003).

Al igual que las pilas estáticas con aireación pasiva, esta técnica se utiliza principalmente para compostar biosólidos o materias primas de consistencia y homogeneidad similares, como lodos o fangos. Este material se procesa en un período relativamente rápido, suele durar de 4 a 8 semanas, y luego se apila el producto durante 1 a 2 meses para que se estabilice en el proceso de maduración (INTEC, 1999).

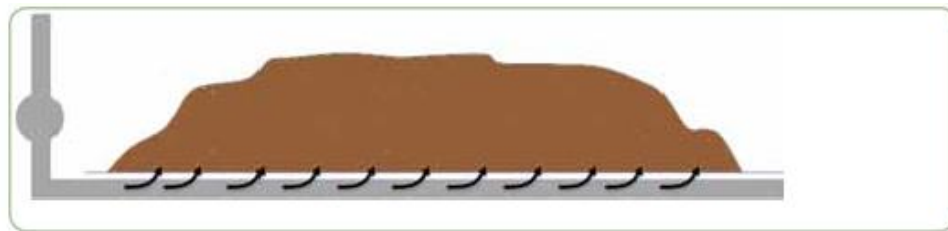


Figura 5.6: Pila estática con aireación forzada (FAO, 2013).

5.1.1.6 Compostaje las pilas estáticas aireadas con cubierta semipermeable.

Esta tecnología de compostaje es similar a las pilas estáticas, pero incluye un sistema de aireación y una cubierta de membrana transpirable. Generalmente esta tecnología se usa principalmente para materiales ricos en nitrógeno, es decir, para residuos orgánicos provenientes de RSD como restos de vegetales y podas verdes (Reciclo orgánicos, 2021).

El funcionamiento de esta técnica consista en extender pilas con residuos a compostar bajo un circuito de aireación en la base de la pila, que aporta suficiente flujo de aire a través de esta, por otro lado, se cubre la pila con una membrana semipermeable que favorece la degradación de la materia orgánica disminuyendo la emisión de olores (Gressmann., 2022).

La membrana semipermeable reduce la vulnerabilidad de los residuos compostados a efectos climáticos, minimiza la generación de lixiviados, emanación de olores y los requerimientos de humidificación de la pila. Esta tecnología no altera la interacción de los microorganismos descomponedores, presentes en el proceso de compostaje, lo que permite mantener los parámetros fisicoquímicos como temperatura y humedad en sus niveles óptimos ya que evita el “shock térmico” que produce el volteo (GeoCiclos, 2015).

Este sistema es adecuado para materiales ricos en nitrógeno, como residuos de alimentos. Permite la obtención de un producto estable, en un periodo entre dos a seis meses pudiendo abarcar cantidades de hasta 100.000 toneladas anuales de residuos orgánicos (Reciclo orgánicos, 2021).

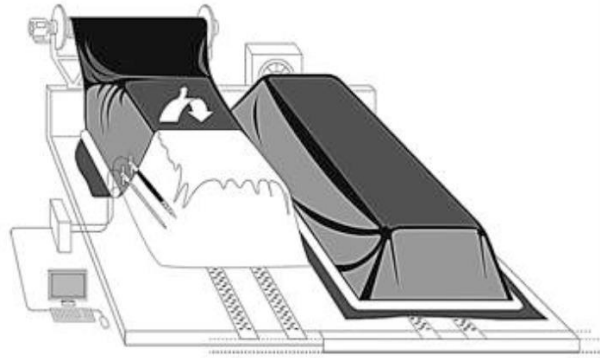


Figura 5.7: Pila estática aireada con cubierta semipermeable (Gore, 2016).

5.1.2 Sistemas cerrados

Los sistemas de compostaje cerrados se realizan generalmente en contenedores sin tener interacción con el medio ambiente, se basan en sistema de giros o volteos mecánicos y aireación forzada para acelerar el proceso de compostaje, lo que permite un mayor control de las condiciones del proceso, sin embargo, estos sistemas presentan elevados costes de inversión, mantenimiento y mayor requerimiento energético (Tortosa, 2015; NRAES, 1992).

5.1.2.1 Compostaje en reactores

Este tipo de técnica se lleva a cabo en túneles, contenedores o recipientes, rígidos llamados reactores, utilizado para contener el material a someter a tratamiento biológico. En este proceso de compostaje se realiza una degradación aeróbica ya que se inyecta aire a las unidades de reacción.

En función de la presencia o ausencia de movimiento del material dentro del biorreactor, se realiza una clasificación adicional en: biorreactor estático y biorreactor dinámico. (Docampo,2013) dentro de los cuales se encuentre el compostaje en silos, compostaje en túnel, entre otros.

- Compostaje en túnel

Este sistema consiste en disponer el material en un túnel cerrado, fabricado generalmente de hormigón donde la ventilación es controlada por impulsión o aspiración del aire (Contreras, 2004). Por otro lado, el aire saliente se limpia en dos etapas pasando por un lavado ácido y un biofiltro, debido a la limpieza del aire saliente también se minimiza la emisión de gases efecto invernadero y de olores procedentes del tratamiento de residuos.

Esta técnica permite que los parámetros de proceso, como aireación, temperatura y humedad, tengan un control óptimo (Reciclo orgánicos, 2021). Gracias a ello se consigue un compost de muy alta calidad, reduciendo el tiempo de permanencia e higienizando por completo los residuos (Liebeneire, 2022). Generalmente se utiliza esta técnica en la primera etapa del compostaje, ya que en esta etapa es fundamental el control del proceso, luego el material tratado debe terminar su proceso de maduración fuera de los túneles. Esta tecnología es el proceso de compostaje más común para grandes tonelajes (más de 50.000 toneladas al año) obteniendo el compost resultante en 4-6 meses (Reciclo orgánicos, 2021).

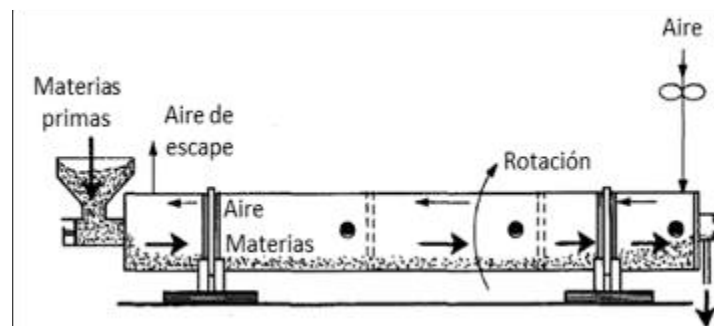


Figura 5.8: Compostaje en túneles (NRAES, 1992).

5.1.3 Análisis comparativo de técnicas de compostaje.

Para el análisis y comparación de las técnicas de compostaje propuestas en el presente capítulo, se realizó una tabla de síntesis de la información asociada a los parámetros fundamentales de cada técnica para la evaluación de compatibilidad de estos con los

requerimientos del municipio de la comuna del Viña del Mar. La información sintetizada se encuentra en la tabla 5.1

Tabla 5.1: Síntesis de técnicas de compostaje.

Técnica	Tonelaje anual (Ton)	Tipo de material	Escala	Tiempo de maduración del compost	Tipo de producto final	Equipos
Pilas estáticas	0-500	RSD	Pequeña escala	18-24 meses	Baja calidad	-Cargador frontal
Pilas con volteo mecánico: cargador frontal	0-5.000	RSD	Pequeña escala	6-12 meses	Uniforme	-Cargador frontal -Triturador o chipeadora -Cribado
Pilas con volteo mecánico: volteador de compost	+6.000	RSD	Mediana – gran escala	1-4 meses	Uniforme	-Cargador frontal -Triturador o chipeadora -Cribado -Volteador de compost
Pilas con aireación pasiva	+10.000	Lodos	Gran escala	12-18 meses	Desigual	-Cargador frontal -Sistema de aireación -Cribador
Pilas con aireación forzada	+10.000	Lodos	Gran escala	2 meses	Desigual	-Cargador -Sistema de aireación forzada -Cribador
Pilas con cubiertas semipermeable	2.000-100.000	RSD	Mediana-gran escala	2-6 meses	uniforme	-Cargador frontal -Triturador o chipeadora -Membrana semipermeable -Cribador -Sistema de aireación forzada

Continuación tabla 5.1.

Técnica	Tonelaje anual (Ton)	Tipo de material	Escala	Tiempo de maduración del compost	Tipo de producto final	Equipos
Compostaje en túneles	25.000-150.000 ton	RSD	Gran escala	4-6 meses	Alta calidad	-Cargador frontal -Triturador -Sistema de volteo especializado -Biofiltros -Cribador o chipeadora -Sistema de aireación forzada

5.2 Evaluación técnica de dos alternativas de compostaje eficientes para la Municipalidad de Viña del Mar.

Para la evaluación técnica de dos alternativas de compostaje se realizó una proyección de los requerimientos del municipio en cuando a la capacidad de compostaje que debiesen tener estas alternativas en función de las estrategias nacionales de valorización y gestión de residuos orgánicos al año 2030.

Una vez obtenida la capacidad de compostaje requerida por el municipio, se valoraron las técnicas descritas en el capítulo 5.1, obteniendo dos alternativas potenciales para su implementación, las cuales se analizaron técnicamente detallando el procesamiento de los residuos, requerimientos de maquinarias, infraestructuras y de mano de obra, los parámetros

de seguimiento en las distintas fases del compostaje y balances de masa generales del proceso.

5.2.1 Requerimientos de la planta de compostaje municipal de Viña del Mar

Para establecer los requerimientos de la planta de compostaje y realizar la elección de dos técnicas adecuadas para su evaluación técnica y análisis de costos se realizó una proyección de la generación de los residuos orgánicos en la comuna de Viña del Mar, atendiendo al cumplimiento de las estrategias anteriormente mencionadas.

5.2.1.1 Generación de residuos orgánicos en la comuna de Viña del Mar.

Para estimar la generación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables se utilizó el reporte de residuos depositados en el relleno sanitario “El Molle” en conjunto con la información sobre la cantidad de habitantes en la comuna, pudiendo así calcular la producción de residuos per cápita (PPC).

Para esto se utilizó la ecuación 4.1 sugerida por el Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO) para la formulación y evaluación de proyectos del fondo para el reciclaje 2020.

Para el cálculo de la producción per cápita de residuos se utilizaron datos obtenidos de la cuenta pública de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar del año 2019, en la cual se especifica que se dispusieron 151.423 toneladas de residuos en el relleno sanitario El Molle, atendiendo al 100% de la población de la comuna, que bajo lo descrito por censo del año 2017 es de 334.248 habitantes.

Por otro lado, para estimar la cantidad de residuos orgánicos producidos por los habitantes de la comuna, se necesita saber la fracción de los residuos sólidos domiciliarios correspondiente a residuos orgánicos. El departamento de Servicios del Ambiente de la

Ilustre Municipalidad de Viña del Mar establece que el 50% de los residuos sólidos domiciliarios totales dispuestos en el relleno sanitario El Molle corresponden a residuos orgánicos.

Los parámetros para el cálculo de la producción de residuos per cápita se sintetizan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros para el cálculo de PPC (En base a SUBDERE, 2018; MIDESO, 2020).

Año	TAD (ton)	Población total atendida.	PPC (kg/Hab-día)	Composición porcentual de residuos orgánicos	Cantidad de residuos sólidos (Ton)
2017	151.423	334.248	1,24	50%	75.712

Se estableció que en la comuna de Viña del Mar se produce en promedio 1,24 kg de residuos per cápita al día y que el 50% de estos corresponde a residuos orgánicos.

- Proyección de la cantidad de RSD generados

Para realizar una proyección sobre la cantidad de RSD generados y de este modo obtener la proyección de residuos orgánicos generados en la comuna de Viña del Mar, se utilizó la metodología del Ministerio de Desarrollo Social para la formulación y evaluación de proyectos del fondo para el reciclaje 2020, donde se establece el uso de las ecuaciones 4.2 y 4.3 para determinar el crecimiento de la generación de RSD per cápita.

Para la proyección de generación de RSD se utilizaron los datos establecidos en la tabla 5.3. En esta tabla se utiliza una tasa de crecimiento anual de la generación de residuos de un 1,8%, la que es sugerida por el MIDESO, por otro lado, se utiliza una tasa de crecimiento de la población de 1 % anual (INE, 2018).

Tabla 5.3: Parámetros para el cálculo de la cantidad de residuos proyectados (En base a SUBDERE, 2018; MIDESO, 2020).

PPC generación (kg/Hab/día)	Rango tasa de crecimiento media anual	Tasa de crecimiento media anual sugerida (g)	Porcentaje de generación (f)
1,24	1-2,5	1,8	100%

Con estos datos se obtuvo la proyección de generación de residuos al año 2030 los que se sintetizan en la tabla 5.4, por otra parte, se estimaron las toneladas de residuos orgánicos asumiendo que la fracción de residuos orgánicos sería del 50% durante todo el periodo de proyección.

Tabla 5.4: Proyección de RSD al año 2030 en la comuna de Viña del Mar. (En base a SUBDERE 2019; MIDESO, 2020).

Año	Proyección de la población (pt)	PPC_t	TAD_t (ton)	Cantidad de residuos orgánicos (ton)
2017	334.248	1,24	151.424	75.712
2018	337.590	1,26	155.691	77.846
2019	340.966	1,29	160.079	80.039
2020	344.376	1,31	164.590	82.295
2021	347.820	1,33	169.228	84.614
2022	351.298	1,36	173.996	86.998
2023	354.811	1,38	178.900	89.450
2024	358.359	1,41	183.941	91.971
2025	361.943	1,43	189.125	94.562
2026	365.562	1,46	194.454	97.227
2027	369.218	1,48	199.934	99.967
2028	372.910	1,51	205.568	102.784
2029	376.639	1,54	211.361	105.680
2030	380.405	1,57	217.317	108.658

Para la proyección de residuos orgánicos generados a nivel domiciliario en la comuna de Viña del Mar se consideró que los residuos disminuirán en un 10% a partir del año 2023, debido a que en este año debería comenzar la disminución de la cantidad de residuos de acuerdo con lo proyectado por el Departamento de Servicios del Ambiente (DSA) en el marco del programa “Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040”. De esta forma se obtuvo un valor aproximado de residuos orgánicos totales generados en una proyección al año 2030, los que se detallan en la tabla 5.5, y de este modo se obtuvo el requerimiento de la planta de compostaje según las estrategias de gestión de residuos orgánicos y economía circular.

Tabla 5.5: Proyección de RSD al año 2030 en la comuna de Viña del Mar (En base a SUBDERE 2019; MIDESO, 2020; DSA, 2022).

Año	Proyección de la población (pt)	PPC_t	TAD_t (ton)	Cantidad de residuos orgánicos (ton)	$TAD_t - 10\%$ (ton)	Cantidad de residuos orgánicos (ton) TAD-10%
2017	334.248	1,24	151.424	75.712	151.424	75.712
2018	337.590	1,26	155.691	77.846	155.691	77.846
2019	340.966	1,29	160.079	80.039	160.079	80.039
2020	344.376	1,31	164.590	82.295	164.590	82.295
2021	347.820	1,33	169.228	84.614	169.228	84.614
2022	351.298	1,36	173.996	86.998	173.996	86.998
2023	354.811	1,38	178.900	89.450	151.424	80.505
2024	358.359	1,41	183.941	91.971	165.547	82.773
2025	361.943	1,43	189.125	94.562	170.212	85.106
2026	365.562	1,46	194.454	97.227	175.009	87.504
2027	369.218	1,48	199.934	99.967	179.940	89.970
2028	372.910	1,51	205.568	102.784	185.011	92.506
2029	376.639	1,54	211.361	105.680	190.225	95.112
2030	380.405	1,57	217.317	108.658	195.585	97.793

Las propuestas de técnicas de compostaje para la comuna de Viña del Mar deben cumplir con un requerimiento de compostaje de residuos orgánicos cercano al 30% del total de estos al año 2030, sin embargo, el DSA tiene una estrategia de gestión de residuos, donde la gestión realizada en el centro de compostaje municipal abordará el 20% de los residuos de la comunidad, mientras que el otro 10% deberá ser abordado con programas de compostaje domiciliario.

Tabla 5.6: Requerimiento de residuos orgánicos a compostar al año 2030 en a la comuna de Viña del Mar.

Cantidad de residuos orgánicos proyectados al año 2030 (ton)	Fracción requerida a tratar en el centro de compostaje	Cantidad de RO a tratar en el centro de compostaje (ton)
97.793	0,2	19.559

Finalmente se obtuvo que el requerimiento del centro de compostaje de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar es de 19.559 toneladas de residuos orgánicos a compostar anualmente el año 2030 y de esta forma cumplir con las metas de las estrategias de Residuos Orgánicos Chile 2040 y Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040.

5.2.2 Selección de técnicas de compostaje para su evaluación

Para la selección de técnicas de compostaje se utilizó una metodología basada en la asignación de puntaje según parámetros de cumplimientos, los puntajes asociados a los parámetros se detallan en la tabla 4.1.

Por otro lado, los parámetros a evaluar son los siguientes:

- Tonelaje anual: El tonelaje anual se refiere a la capacidad de residuos orgánicos, en toneladas, que se puede incorporar al proceso de compostaje según cada técnica, este no puede ser inferior al valor obtenido en la proyección de generación de residuos orgánicos para la comuna a evaluar.
- Tipo de material: El material a compostar debe ser material orgánico de tipo RSD, este parámetro es fundamental y excluyente, debido a que el procesamiento de estos residuos es específico para sus características fisicoquímicas, por lo tanto, una técnica de compostaje no compatible con este material no se podrá implementar, aunque cumpla con los demás parámetros.
- Tiempo de obtención del compost: un tiempo menor de procesamiento permite mayor rotación en el procesamiento de material, por lo tanto, permite el reciclaje de una mayor cantidad de residuos.
- Tipo de compost resultante: el compost resultante debe ser uniforme debido a que este tipo de compost puede utilizarse directamente como sustrato, correspondiendo al uso que le quiere dar el municipio.
- Espacio: las plantas de compostaje pueden ser implementadas en diversas escalas y de esto dependerá la técnica a utilizar. Se entiende por una planta de compostaje de baja escala a aquella con capacidad máxima de 2.600 toneladas al año, media escala a plantas cercanas a 26.000 toneladas al año y de gran escala aquellas plantas con capacidad de 50.000 toneladas de residuos anuales (Reciclo orgánicos, 2021).

Una vez evaluados y asignados los puntajes de cada parámetro, estos se sumaron y se obtuvo un puntaje final para cada técnica. Esta evaluación se encuentra detallada en la tabla 5.7.

Tabla 5.7: Evaluación de técnicas de compostaje para la planta de la comuna de Viña del Mar

Tecnología	Tonelaje anual	Tipo de material	Tiempo de obtención del compost	Tipo de producto final	Espacio	Puntaje total obtenido
Pilas estáticas	0	20	0	0	0	20
Pila volteo mecánico, cargador frontal	0	20	0	15	10	45
Pilas volteo mecánico volteador de compost	10	20	10	15	10	65
Pilas con aireación pasiva	10	0	0	0	10	20
Pilas con aireación forzada	10	0	10	0	10	30
Pilas cubiertas semipermeable	10	20	10	15	10	65
Túneles	10	20	10	15	0	55

Al realizar la tabla de evaluación de técnicas de compostaje, se obtuvo como resultado que las técnicas más adecuadas para la implementación en el centro de compostaje de la comuna de Viña del Mar son las técnicas de compostaje en pilas dinámicas con volteo mecánico con volteador de compost (Opción A) y la técnica de compostaje de pilas estáticas con cubierta semipermeable (Opción B).

5.2.3 Análisis técnico de la Opción A

El centro de compostaje al utilizar la técnica de pilas con volteo mecánico podrá tener una capacidad cercana a 19.560 toneladas anuales de residuos orgánicos a tratar al año 2030, los que serán provenientes de ferias libres, podas invernales y residuos domiciliarios. Estos residuos se dispondrán en pilas dinámicas de volteo mecánico, el cual será realizado por medio de una maquinaria especializada llamada Volteador de Compost.

El tratamiento de residuos orgánicos mediante el uso de esta técnica constará en 4 principales etapas: Pretratamiento, fase activa, fase de maduración y tamizado. Las fases de procesamiento de los residuos orgánicos utilizarán un área total cercana a los 6.000 metros cuadrados, la cual fue estimada en función de las recomendaciones de dimensionamiento de planta de compostaje de mediana escala del Manual de compostaje de Reciclo Orgánicos, adecuadas a las dimensiones de las pilas de compostaje de esta opción. Se detalla el área de cada fase en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Área utilizada para la Opción A

Sector	Área
Compostaje en pilas	3.520 m ²
Área de recepción y almacenamiento	500 m ²
Fase de maduración	1.600 m ²
Área de tamizado y envasado	200 m ²

5.2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento consiste en un procesamiento de los residuos orgánicos antes de comenzar el proceso de compostaje y se divide en dos principales etapas, el ingreso del material y el pretratamiento del material.

- Ingreso de material

El pretratamiento comienza con el ingreso del material a compostar al recinto, el que ingresa en camiones de recolección, los que deben pasar por una báscula de pesaje y posteriormente realizar el registro del origen de los residuos, tipo de residuos y la cantidad de residuos en peso. La NCh 3382 establece que aquellas plantas de compostaje con capacidad igual o superior a 1.000 toneladas mensuales deberán contar con sistema de pesaje en la instalación, preferentemente de pesaje de camiones.

- Pretratamiento

La planta tendrá con un área de pretratamiento de los residuos orgánicos donde estos se almacenarán temporalmente. Los residuos cafés serán dispuestos en 2 pilas de 10 metros de largo, 4 metros de ancho y 1,5 metros de alto, por otro lado, los residuos verdes tendrán una capacidad de almacenamiento de $3,3 m^3$ de material, el cual se dividirá en 3 contenedores de $1,1 m^3$ cada uno. El tiempo máximo de almacenamiento del material antes de ser tratado dependerá del tipo de material orgánico, este tiempo se encuentra descrito en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Tiempo de almacenamiento del material orgánico (En base a GeoCielos, 2020).

Tipos de residuos	Tiempo
Verdes	24 horas
Cafés	1-2 meses

Los residuos cafés, es decir, material proveniente de podas, deberán pasar por un proceso de trituración para disminuir su tamaño y agilizar el proceso de compostaje. La trituración se realizará con una máquina chipeadora.

Se realizará una revisión del material, debido a que puede contener residuos de rechazo, es decir, residuos inorgánicos voluminosos que puedan interferir en el procesamiento del material, como bolsas plásticas, botellas, vidrios, latas, entre otros. La revisión se realizará de forma manual y de encontrarse un residuo inorgánico este será retirado por un trabajador con pinzas de agarre y se depositarán en dos contenedores de 660 litros, para su posterior traslado al relleno sanitario El Molle. Una vez terminada la revisión se procederá a formar la pila de compostaje por medio del uso de un cargador frontal o minicargador hacia la cancha de compostaje.

- Equipos y maquinarias necesarios en el pretratamiento

Los equipos y maquinarias requeridas en la etapa de pretratamiento son detallados en la tabla 5.10.

Tabla 5.10: Maquinaria y equipo a utilizar en la etapa de pretratamiento

Equipo	Función
Báscula	Pesaje de camiones.
Minicargador	Movimiento de los residuos orgánicos.
Chipeadora	Disminución del tamaño del material proveniente de podas.
Pinza de agarre	Recolección de residuos inorgánicos voluminosos.
Contenedores de 1,1 m ³	Almacenar residuos verdes.
Contenedores 660 litros	Almacenar residuos inorgánicos

5.2.3.2 Fase activa

La fase activa tendrá lugar en la cancha de compostaje, donde se dispondrán las pilas dinámicas de material a compostar con el uso de un minicargador.

- Dimensionamiento de las pilas de compostaje

Para el cálculo de las dimensiones de una pila de compostaje se utilizó la metodología del manual de compostaje del agricultor de la FAO, donde se utiliza la fórmula del volumen de un paralelepípedo como medida aproximada del volumen de la pila, utilizando la ecuación 5.1 y una base de cálculo de 0.5 ton/m³ de densidad del material a compostar (Reciclo Orgánicos, 2021).

$$\text{Volumen de la pila} = \text{largo} * \text{ancho} * \text{alto}$$

Ecuación 5.1 volumen de una pila de compostaje (FAO, 2019).

Para el proceso de compostaje en fase activa se contará con 64 pilas de compostaje dispuestas en el área de la planta de compostaje comunal, estas pilas deberán tener una altura máxima de 1,5 metros y un ancho máximo de 2 metros para que el paso del volteador de compost se haga de forma óptima.

El volumen de residuos para compostar por pila se define de forma semanal, obteniendo aproximadamente 376,2 toneladas de material verde y café, teniendo en consideración que el material tiene una densidad de 0.5 ton/m³ se obtiene que se recibirán aproximadamente 753

m^3 de residuos semanales, los que tendrán que ser dispuestos en 32 pilas al comienzo del proceso de fase activa, por lo tanto, cada pila tendrá que abarcar $23.5 m^3$ de material.

$$23.5 m^3 = \text{largo} * 1,5 m * 2m$$

$$\text{Largo} = 7,8 m$$

Se concluye que las dimensiones de la pila de compostaje serán las establecidas en la tabla 5.11 y que se tendrán un total de 64 pilas de compostaje en fase activa para llevar a cabo el proceso de un mes de compostaje de material.

Tabla 5.11: Dimensiones pilas de compostaje

Dimensión	Longitud (metros)
Largo	8
Ancho	2
Alto	1.5

- Formación de las pilas

Para la formación de las pilas se debe disponer un lecho de ramas o material café con un espesor de aproximadamente 20 centímetros para luego proceder a colocar los residuos orgánicos, esto facilita la aireación de la pila. Al agregar el material verde a la pila este se debe cubrir con material café, esto permitirá reducir las emisiones de olores, proliferación de vectores y mantendrá la humedad dentro de la pila.

- Procesamiento del material

Semanalmente se recibirán $753 m^3$ de residuos a compostar el que será dispuesto en 32 pilas, la primera semana tendrán una frecuencia de volteo de tres veces por semana, debido a que son pilas mayoritariamente de material verde rico en nitrógeno y necesitan mayor aireación. El volteo será realizado por un volteador de compost modelo “Backhus A 36”.

Pasada una semana del proceso de compostaje el material reducirá su volumen a la mitad, por lo tanto, se juntará el material de dos pilas en una nueva, quedando así 16 pilas de compostaje. Por otro lado, el volteo de las pilas también se reducirá a dos volteos por semana hasta terminar el periodo de fase activa. Posterior a 4 semanas de compostaje el material reducirá su volumen a la mitad y se tendrán que reagrupar dos pilas en una nueva quedando 8 pilas de compostaje.

El material tendrá un tiempo de residencia en la fase activa de 28 días para luego pasar a la fase de maduración.

- Control del proceso.

Los parámetros que se deben controlar en el procesamiento de los residuos orgánicos por medio del compostaje son la temperatura, la humedad y el pH. El control de los parámetros tiene como finalidad saber si el proceso de degradación se está realizando de forma óptima o, por lo contrario, poder mejorar aquellos parámetros que se encuentran fuera de los niveles óptimos. De este modo se obtendrá un compost de alta calidad.

- Temperatura: la acción microbiana en la fase activa de degradación de la materia orgánica provocará un aumento en la temperatura de la pila, este aumento en la temperatura permitirá la eliminación de vectores sanitarios.

La NCh 3382 en las consideraciones para el diseño y operación de plantas de compostaje establece temperaturas promedio en periodos de tiempo para la higienización del compost, las que se establecen en la tabla 5.12.

El control de la temperatura se realizará mediante un termómetro digital con sonda de penetración larga, el cual deberá ser introducido en la pila hasta llegar a su centro, esta acción se debe repetir en distintos puntos de la pila antes de la realización de los volteos. Se debe realizar este control 3 veces por semana.

Tabla 5.12 Requerimientos de temperatura para la higienización del material a compostar (En base a NCh 3.328)

Temperatura promedio	Tiempo mínimo
55-59 °C	2 semanas
59-65°C	1 semana
>65°C	3 días

- **Humedad:** el rango óptimo de humedad en una pila de compostaje es de 40-60%, una humedad menor a 40% significa que el proceso de degradación de la materia es lento, para solucionar este parámetro se debe regar la pila de compostaje. Por otro lado, un contenido de humedad mayor a 65% indica que el proceso de aireación se ve interrumpido por el contenido de humedad de la pila, por lo tanto, la degradación puede verse interrumpida, en este caso se debe agregar material café a la pila y realizar un volteo adicional.

Para la medición de la humedad se utilizará un sensor de humedad del suelo y las mediciones se realizarán 3 veces por semana antes de cada volteo.

- **pH:** en la fase activa el pH las primeras semanas debe mantenerse entre 4-6, al término del primer mes entre 8-9 para un proceso de compostaje adecuado (GeoCiclos, 2020). Un pH mayor identifica contenidos de nitrógeno mayores, por lo tanto, se debe agregar material café rico en carbono para neutralizar el pH.

Este parámetro se medirá con un electrodo de pH de medición directa en suelo, tres veces por semana antes de cada volteo.

- Equipo y maquinaria necesario

Los equipos y maquinarias requeridas en la etapa de Fase activa son detallados en la tabla 5.13.

Tabla 5.13: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase Activa.

Equipo	Función
Minicargador	Formación de pilas
Instrumentos de control	Medir parámetros de control del proceso de compostaje.
Volteador de compost	Voltear el material orgánico en las pilas de compostaje para favorecer la aireación y reducir el tamaño de las partículas.

5.2.3.3 Fase de maduración

El material semi compostado se agrupará en pilas de dimensiones mayores, debido a que la etapa termófila del proceso cesó y no se realizarán volteos en las pilas de maduración, por lo tanto, las pilas de compostaje serán de 3 metros de ancho, 2 metros de altura máxima y de aproximadamente 6 metros de largo. Esta fase tendrá una duración de 2 meses y se tendrá como resultado un compost rugoso (GeoCiclos, 2020).

- Control del proceso
- Temperatura: la temperatura, una vez finalizada la etapa activa, disminuirá considerablemente hasta llegar a la temperatura ambiente y definirá el término del proceso de maduración del compost (Reciclo orgánicos, 2021). Este parámetro se medirá de igual forma que en la fase activa, una vez por semana.
- Humedad: la humedad disminuye a un 40% aproximadamente al término del proceso de maduración del compost. Se debe medir este parámetro una vez por semana de igual forma que en la fase activa.
- pH: el pH de un compost maduro debe oscilar entre los 6-8 y se medirá de forma igual a la fase activa.

- Equipo y maquinaria necesario

Los equipos y maquinarias requeridas en la fase de maduración son detallados en la tabla 5.14.

Tabla 5.14: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración

Equipo	Función
Minicargador	Formación de pilas
Instrumentos de control	Medir parámetros de control del proceso de compostaje.

5.2.3.4 Tamizado

El compost rugoso posee material grueso e impurezas inorgánicas (fracción gruesa), por lo tanto, debe pasar por un proceso de tamizado o cribado. Se sugiere que el tamizado sea a 10-12 mm para obtener un compost de partículas finas (Reciclo orgánicos, 2021).

Para el tamizado del compost rugoso se utilizará un harnero rotativo circular, modelo Rotary Sieve CT0611, el cual tiene un tamaño de tamizado de 12 mm.

La fracción gruesa se dividirá en dos tipos de residuos, residuos de recirculación que será aquella fracción de material orgánico con partículas mayores a 12 mm. que recircularán a la etapa de formación de pilas de compostaje nuevas y en una fracción de residuos de desechos, los que al poseer material inorgánico se descartará y el material de descarte será enviado al relleno sanitario. Para este proceso se contará con dos contenedores de 660 litros, en los cuales se dispondrá la fracción gruesa de recirculación y la fracción de descarte respectivamente.

Una vez obtenido el compost final de partículas finas, será envasado en sacos de nylon y se realizará la entrega de este al vivero municipal para su uso.

- Equipo y maquinaria necesario

Los equipos y maquinarias utilizados en la fase de tamizado del material se detallan en la tabla 5.15.

Tabla 5.15: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de tamizado.

Equipo	Función
Minicargador	Formación de pilas
Palas	Facilitar el movimiento del compost rugoso al tamizador
Harnero rotativo circular	Tamiza el compost rugoso.
Contenedores de 660 litros.	Almacenar la fracción gruesa.

5.2.3.5 Balance de masa de la Opción A

Se estimó un ingreso de 19.559 toneladas de residuos orgánicos al año a la planta de compostaje, para un adecuado procesamiento del material y una relación de carbono-nitrógeno estable se prevé que debe ingresar un 70% de residuos verdes y 30% de residuos cafés, es decir, se deben procesar cerca de 13.700 toneladas de residuos verdes y 5.800 toneladas de residuos cafés.

El procesamiento del compost tendrá pérdidas de volumen en cuanto a humedad, por lo que se obtendrá un 30% del volumen total de residuos de ingreso en compost (GeoCiclos, 2020). En el proceso de tamizado se obtendrá una fracción gruesa, la que se divide en residuos orgánicos gruesos que recircularán al proceso de compostaje en la formación de las pilas y en residuos de rechazo que comprenderán residuos inorgánicos de menor tamaño, los que tendrán una disposición final en el relleno sanitario. Finalmente se obtendrán cerca de 5.900 toneladas de compost fino de alta calidad, para su uso inmediato.

En la figura 5.9 se muestra el balance de masa global del proceso de la planta de compostaje con el uso de la técnica de volteo mecánico con volteador de compost en un periodo de un año de funcionamiento.

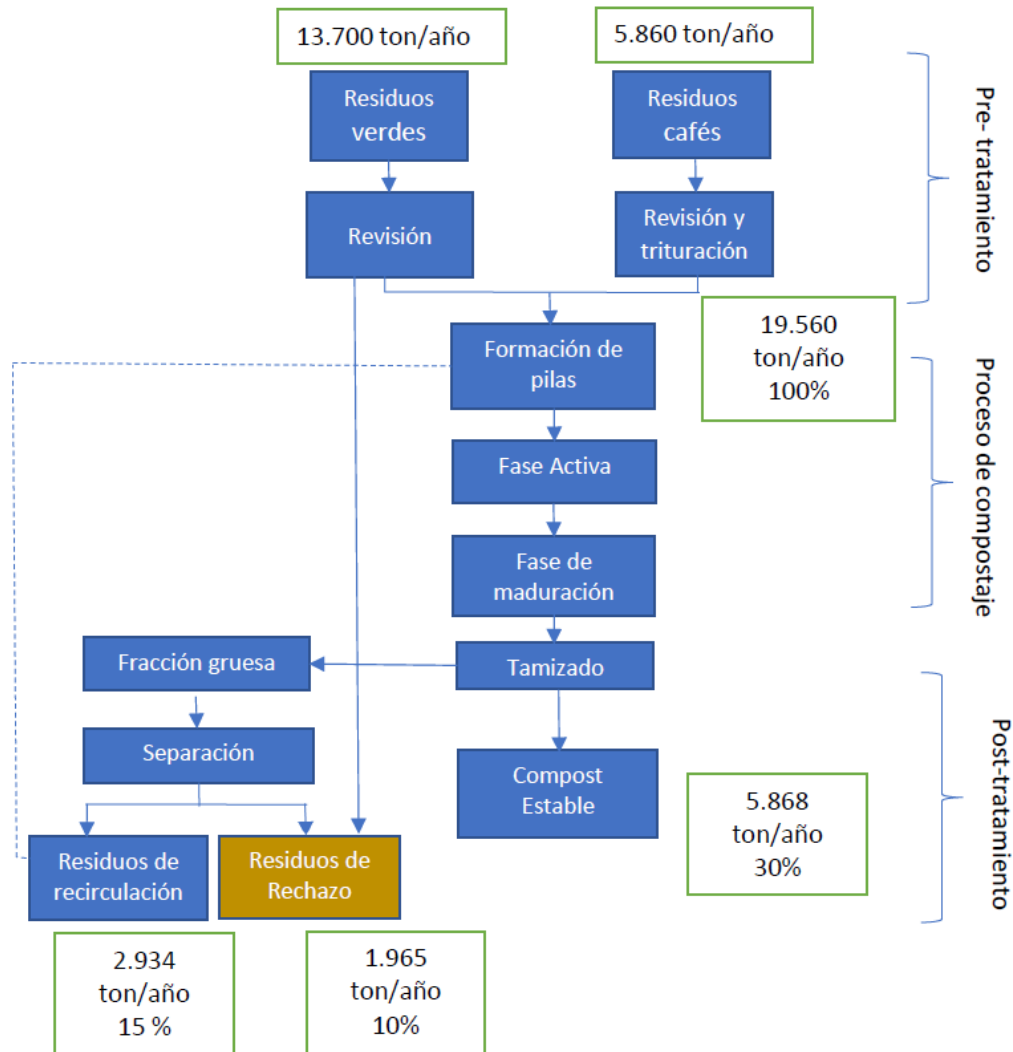


Figura 5.9: Balance de masa proceso de compostaje Opción A (elaboración propia).

5.2.4 Análisis técnico de la Opción B

La técnica de compostaje de pilas con cubierta semipermeable es utilizada principalmente cuando se deben tratar más de 5.000 toneladas de residuos orgánicos al año. Al instalar la planta de compostaje en la comuna de Viña del Mar esta podría alcanzar el tratamiento cercano a 26.000 toneladas de residuos al año.

La técnica consiste principalmente en el tratamiento de residuos orgánicos en pilas estáticas con inyección de aire de manera forzada las que, a su vez, son cubiertas con una membrana semipermeable con tecnología GORE® o similar, que permite que el proceso de degradación del material orgánico dure aproximadamente 40-50 días.

Esta técnica posee 4 principales etapas, el preprocesamiento de los residuos, la fase de compostaje activo, fase de compostaje de maduración y finalmente el tamizado del compost rugoso. Estas etapas se realizan en un área estimada de 2.000 m^2 , el área utilizada para cada etapa se detalla en la tabla 5.16.

Tabla 5.16 Áreas requeridas para el tratamiento de residuos

Etapa	Área
Compostaje en pilas	472 m^2
Área de recepción, almacenamiento y control de ingreso	521 m^2
Fase de maduración	594 m^2
Área de tamizado y envasado	200 m^2

5.2.4.1 Preprocesamiento

El preprocesamiento consiste en dos etapas, el ingreso de los residuos y el preprocesamiento de estos para la posterior fase de compostaje activo.

- Ingreso del material

El preprocesamiento comienza con el ingreso de los residuos orgánicos (material a compostar), los que debe ser pesados y registrado en las dependencias de la planta. El pesaje se realizará con una báscula de pesaje de camiones, posteriormente los residuos orgánicos se dispondrán en pilas diferenciadas para material verde y para material café, las que serán de aproximadamente 10 metros de largo, 5 metros de ancho y 1 metro de alto. Se realizará una revisión manual de los residuos y de haber residuos inorgánicos (residuos de rechazo) de gran volumen serán retirados con una pinza de agarre por un operador.

Los residuos de rechazo, de estar en condiciones óptimas se dispondrán en contenedores de reciclaje, por lo contrario, serán dispuestos en contenedores para su posterior disposición final en el relleno sanitario.

-Preprocesamiento

El preprocesamiento consiste principalmente en la trituración del material y en la mezcla de este antes de iniciar el proceso de compostaje (COSMA Toledo, 2019).

La trituración se realizará con una máquina chipeadora donde ingresarán los residuos orgánicos para disminuir su tamaño, para esto se debe contar con área destinado exclusivamente al proceso de trituración, el cual se recomienda sea una plataforma de 1,8 metro de largo y de 6,4 metros de ancho (Reciclo orgánicos, 2021).

Los residuos orgánicos verdes y los residuos orgánicos cafés deben ser mezclados para conseguir una adecuada porosidad y equilibrar el contenido de humedad, ya que no se realizarán volteos en la fase de compostaje activo. En este tipo de técnica lo ideal es que la mezcla sea en una proporción de 2:1, es decir, 66% de residuos verdes y 34% de residuos cafés para así disminuir la producción de lixiviados en el procesamiento de la materia. La zona de mezcla debe encontrarse cercana al área de trituración y la acción será realizada con la maquinaria cargador frontal (COSMA Toledo, 2019).

- Control del proceso

- **Tamaño de las partículas:** El tamaño de la partícula es fundamental en el proceso de compostaje debido a que un menor tamaño favorece la descomposición de la materia orgánica, sin embargo, si las partículas son muy pequeñas se dificulta la aireación y difusión de oxígeno en el interior de la pila, por lo que las partículas deben tener un tamaño óptimo de 1 a 5 cm (GeoCiclos, 2015).

-Equipo y maquinaria necesaria

Los equipos y maquinarias utilizada en la etapa de preprocesamiento se detallan en la tabla 5.17.

Tabla 5.17: Equipo y maquinaria necesaria en el preprocesamiento.

Equipo	Función
Cargador frontal	Desplazar los residuos orgánicos de un lugar a otro.
Chipeadora	Disminución del tamaño del material orgánico.
Pinza de agarre	Agarrar residuos inorgánicos para su separación.

5.2.4.2 Fase de compostaje activo

Una vez mezclado el material este será dispuesto, por medio de un minicargador frontal, sobre pilas con aireación forzada, es decir, sobre tubos de PVC que inyectarán aire a la pila. El sistema de aireación forzada debe estar instalado en un radiér con inclinación para favorecer el escurrimiento de lixiviados a un tanque de recepción. Una vez formada la pila, será cubierta con la membrana semipermeable con tecnología GORTEX ® o similar, posteriormente se fijarán al suelo con agarraderas para permitir que la cubierta quede fija en el área de la pila.

El material compostado no debe ser volteado ni descubierto, debe quedarse en la pila con la cubierta semipermeable por un tiempo estimado de 22 días

- Membrana semipermeable Gore-Tex

La membrana utilizada está compuesta por una lámina de poliéster, una membrana con tecnología GORE-TEX ® y luego otra lámina de poliéster, como se muestra en la figura 5.2. Esta membrana es semipermeable, es decir, permite el intercambio de dióxido de carbono y de oxígeno con el medio externo, sin embargo, genera un efecto de condensación en el interior de la pila, además, impide el paso de compuestos aromáticos al exterior, favoreciendo

la minimización de olores en el proceso de degradación de la materia orgánica (GeoCiclos, 2014).

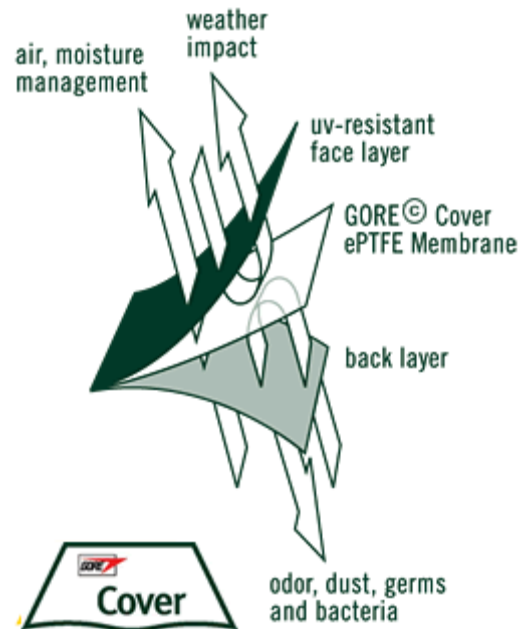


Figura 5.10: Membrana Goretex® (Kompostanlagen, 2015)

- Formación y dimensionamiento de pilas.

El área de compostaje debe estar pavimentada con una inclinación de 2% que permitirá el escurrimiento de los líquidos lixiviados a un canal de recepción de aproximadamente 20.000 litros.

Cada pila de compostaje recibirá diariamente 50 m^3 de residuos orgánicos, debido a que la planta tendrá una capacidad de procesamiento de 26.000 toneladas al año. Teniendo en cuenta una densidad de los residuos de $0,5 \text{ ton/m}^3$, se utilizarán pilas de 30 metros de largo, 3 metros de ancho y 3 metros de alto, abarcando aproximadamente 370 m^3 de capacidad. Cabe destacar que la pila al ser de forma trapezoidal el volumen disminuye y se estima que cada

pila será llenada con 250 m^3 de material orgánico. Las dimensiones se detallan claramente en la tabla 5.18.

Tabla 5.18 Dimensiones pilas de Fase Activa.

Dimensión	Longitud (metros)
Largo	30
Ancho	3
Alto	3

Para el cálculo de pilas requeridas se utilizó la Ecuación 5.5, tomando en consideración que cada pila tendrá una permanencia de 20 días en el proceso de fase activa de compostaje.

$$PR = \frac{FO \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) * \text{días}}{V_{\text{pila}} (\text{m}^3)}$$

Ecuación 5.2: ecuación para el cálculo de las pilas requeridas (GeoCiclos, 2014)

Donde:

PR: Pilas requeridas.

FO: flujo diario de materia orgánica.

Vpila: el volumen aproximado de cada pila.

$$3,7 = \frac{50 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) 20}{270(\text{m}^3)}$$

Se obtuvo que se requerirán aproximadamente 4 pilas de compostaje en fase activa, para el llenado de cada pila de compostaje se necesitará una semana de flujo de residuos orgánicos. Las pilas deberán pasar 20 días cubiertas con la membrana semipermeable en fase activa de compostaje.

- Dimensionamiento de las membranas

Para el dimensionamiento de la membrana se utilizó la Ecuación 5.3 y 5.4.

$$\textit{Ancho Membrana} = \textit{Alto} * 2 + \textit{base de la pila}$$

Ecuación 5.3: ecuación para el cálculo del ancho de la membrana (elaboración propia)

$$\textit{Largo membrana} = \textit{largo de la pila} + \textit{alto de la pila} * 2$$

Ecuación 5.4: ecuación para el cálculo del largo de la membrana (elaboración propia)

Por lo tanto, se obtiene un ancho de 9 metros y un largo de 36 metros, para la membrana semipermeable.

- Dimensionamiento radier

Las pilas contarán con un sistema de ventilación forzada para la aireación de la materia orgánica, este sistema de ventilación se instalará en conjunto con un radier que contenga las tuberías de aireación. Si bien esta técnica de compostaje minimiza la generación de lixiviados, de generarse estos escurrirán por canales de drenaje ubicados en el radier, el escurrimiento será beneficiado por una inclinación del 2% en la plataforma.

En el radier se instalarán únicamente las 4 pilas de fase activa que serán las que contarán con la cubierta semipermeable, cada pila tiene una dimensión de 90 m^2 , se separará cada pila de la otra por una distancia de 1,5 metros para permitir el paso del mini cargador frontal, además, se proporcionará un camino de acceso a hacia las pilas 1,5 metros a un costado de estas para el paso del equipo, de este modo se contempla que el área del radier sea de 472 m^2 con un espeso de 0.15 metros construido de hormigón.

- Sistema de recolección de lixiviados

La técnica de compostaje con membrana semipermeable y ventilación forzada reduce la producción de lixiviados, sin embargo, como medida preventiva y de control, se construirá el radier con inclinación que posibilitará el flujo del líquido debido a la gravedad, de este modo, se instalarán canales de recolección en un extremo de las pilas de compostaje que derivarán el líquido a un estanque de almacenamiento.

Para el cálculo de la producción de lixiviados se utilizó la Ecuación 5.5 planteada por Gillon el año 2006 y los parámetros de cálculo establecidos en la tabla 5.19

$$\text{Generación Lixiviados} = VR[m^3] * HR * PA * FR$$

Ecuación 5.5: ecuación para el cálculo de la generación de lixiviados (Gillon, 2006)

Donde:

VR: Volumen de residuos en la pila

HR: contenido de humedad de los residuos

PA: Pérdida de agua

FR: Factor de corrección

Tabla 5.19 Generación de lixiviados en el proceso de compostaje en Fase activa (En base a GeoCiclos, 2014; Gillon, 2006)

Parámetros para el cálculo de la generación de lixiviados				
VR	HR	PA	FR	Generación de Lixiviados
250 m ³	50%	20%	0,3	7,5 m ³

A partir del cálculo para estimar la producción de lixiviados se obtuvo que se generarán 7,5 m³ de lixiviados. De este modo, el estanque de almacenamiento de lixiviados tendrá un volumen de 10 m³, cabe destacar que este estanque tendrá un mecanismo de recirculación, el cual inyectará líquidos a las pilas de compostaje en caso de ser necesario.

- Sistema de ventilación

El sistema de ventilación constará con la implementación de una tubería de PVC de 30 metros de largo, con orificios cada 1 metro longitudinal, ubicadas en el centro de las pilas de compostaje, la cual va a estar conectada a un ventilador centrífugo en la base de la pila, como se muestra en la figura 5.11, el que inyectará aire a la pila de compostaje.

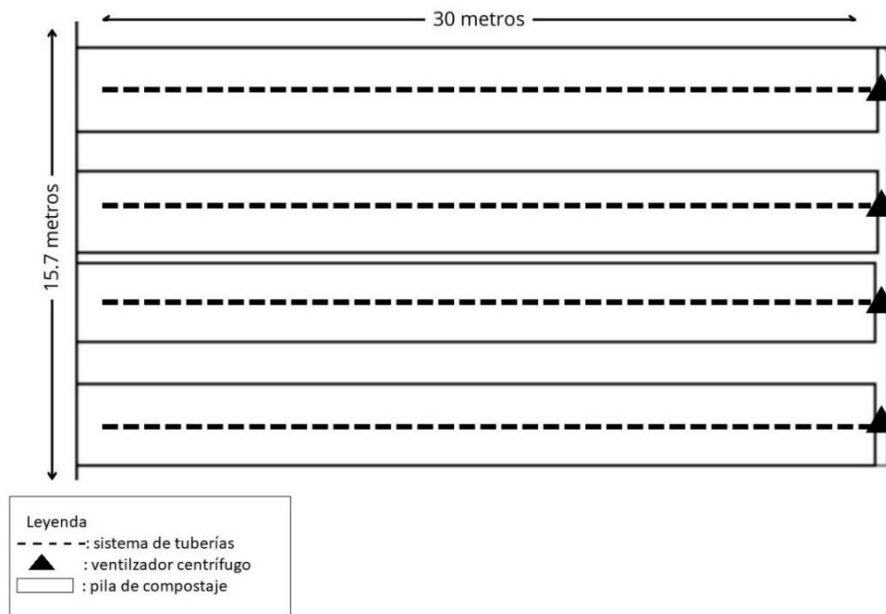


Figura 5.11: Plano tuberías de ventilación.

Se recomienda que para compostaje de residuos orgánicos con tecnología de aireación forzada y cubierta semipermeable Goretex® se utilicen ventiladores de caudal máximo de 2.400 m³/h a 2.940 rpm y potencia del ventilador de 2,5 kW (Al-Alawi *et al*, 2019). Los ventiladores deben estar conectados a un temporizador, el cual permitirá que la inyección de aire se realice 15 minutos cada hora, es decir, 15 minutos de aireación y 45 minutos sin aireación (Al-Alawi *et al*, 2019), de este modo se controla la temperatura de la pila y se impide que la temperatura tome valores mayores a 60°C ya que de tomar temperaturas mayores el proceso de descomposición sigue un ritmo lento debido a la inactividad de la población de microorganismos descomponedores (NRAES, 1992).

- Control del proceso

Temperatura: El control de la temperatura se realizará mediante un termómetro digital con sonda de penetración larga, el cual deberá ser introducido en la pila hasta llegar a su centro, esta acción se debe repetir en distintos puntos de la pila con una frecuencia de muestreo diaria, debido a que en condiciones de temperatura mayores a 60 °C se debe aumentar la aireación de la pila para favorecer la degradación de la materia orgánica.

- Humedad: el rango óptimo de humedad en una pila de compostaje es de 40-60%, una humedad menor a 40% significa que el proceso de degradación de la materia es lento, para esto se debe inyectar líquido la pila de compostaje, en este caso se realizará la adición de líquidos proveniente de los lixiviados. Por otro lado, un contenido de humedad mayor a 65% indica que el proceso de aireación se ve interrumpido por el contenido de humedad de la pila, por lo tanto, la degradación puede verse interrumpida y se debe aumentar la frecuencia de aireación en la pila. Para la medición de la humedad se utilizará un sensor de humedad del suelo y las mediciones se harán 1 vez al día.
- pH: en la fase activa el pH las primeras semanas debe mantenerse entre 4-6, al término del primer mes entre 8-9 para un proceso de compostaje adecuado (GeoCiclos, 2020). Este parámetro se medirá con un electrodo de pH de medición directa en suelo, una vez al día.
- Aireación: la aireación se realizará en intervalos de 15 minutos de aireación y 45 minutos sin aireación, sin embargo, si la pila cuenta con niveles de temperatura mayores a 65°C la aireación se realizará con mayor frecuencia hasta llegar a una temperatura óptima cercana a los 55 °C. Por otro lado, si la humedad se encuentra en valores superiores a 60%, también se debe aumentar la frecuencia de inyección de aire.

-Equipo y maquinaria necesaria

La maquinaria y equipos utilizados en la fase activa de compostaje se detallan en la tabla 5.20.

Tabla 5.20: Equipos y maquinarias necesarias para la Fase activa de compostaje

Equipo o maquinaria	Función
Cubierta semipermeable Goretex®	Impedir el paso de vectores sanitarios, retener humedad y agilizar el proceso de compostaje.
Ventiladores centrífugos	Inyectar aire a la pila de compostaje
Sistema de tuberías para ventilación	Transportar el aire a las pilas de compostaje
Cargador frontal	Realizar el movimiento de los residuos orgánicos previamente tratados a la formación de pilas.
Instrumento de control de parámetros	Controlar los parámetros fundamentales del proceso de compostaje
Sistema de recolección de lixiviados	Recolectar lixiviados
Tanque de recepción de lixiviados	Almacenar los lixiviados
Agarres de membrana	Mantiene fija la cubierta al suelo.

5.2.4.3 Fase de compostaje de maduración

En esta zona se produce la estabilización del material pre compostado, el material de la fase activa se transporta a pilas descubiertas de maduración, en las cuales deberá permanecer durante 20 a 30 días más. Las pilas de maduración deben ser volteadas mecánicamente una vez a la semana, este volteo se realizará con un cargador frontal.

- Dimensionamiento de las pilas

La fase de maduración necesitará 3 pilas de compostaje, las que no tendrán cubierta semipermeable ni sistema de aireación forzada, se estima que el volumen de las pilas de fase activa se reduzca a la mitad al ingreso de la fase de maduración, por lo tanto, cada pila deberá abarcar 160 m^3 de residuos orgánicos pre compostados. Debido a que estas pilas se voltearan mediante el uso de un cargador frontal, estas deben tener una altura máxima de 2 metros, Formándose 3 pilas de 2 metros de alto, 30 metros de largo y 3.5 metros de ancho.

El área total utilizada para la fase de maduración será de 594 m^2 , los que correspondan al área utilizada por las 3 pilas de compostaje, al área entre cada pila que será de 2,5 metros para

facilitar el paso de la maquinaria y la rampa de acceso que será de 3 metros. En esta fase no se hace necesaria la construcción de radier ni tampoco de una superficie con inclinación debido a que la producción de lixiviados en la etapa de maduración es escasa.

-Control del proceso

La fase de maduración se puede comprender como un sistema de compostaje aparte con la técnica de volteo mecánico con el uso de cargador frontal, por lo tanto, los parámetros de control del proceso serán aquellos utilizados en esta técnica.

- Temperatura: la temperatura una vez finalizada la etapa activa, disminuirá considerablemente hasta llegar a la temperatura ambiente y definirá el término del proceso de maduración del compost (Reciclo orgánicos, 2021). El control de la temperatura se realizará mediante un termómetro digital con sonda de penetración larga, el cual deberá ser introducido en la pila hasta llegar a su centro, esta acción se debe repetir en distintos puntos de la pila antes de la realización de los volteos. Se debe realizar este control 1 vez por semana.
- Humedad: la humedad disminuye a un 40% aproximadamente al término del proceso de maduración del compost. Para la medición de la humedad se utilizará un sensor de humedad del suelo y las mediciones se harán 1 vez por semana antes de los volteos.
- pH: El pH de un compost maduro debe oscilar entre los 6-8. Este parámetro se medirá con un electrodo de pH de medición directa en suelo, una vez por semana antes de cada volteo.

- Equipo y maquinaria necesario

Los equipos y maquinarias requeridas en la fase de maduración son detallados en la tabla 5.21.

Tabla 5.21: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración

Equipo	Función
Minicargador	Formación de pilas y volteo del material
Instrumentos de control	Controlar parámetros fundamentales en el proceso de compostaje.

5.2.4.4 Tamizado

El proceso de tamizado es fundamental para obtener un compost de alta calidad, debido a que en este proceso se remueven impurezas inorgánicas y material orgánico de mayor tamaño. Este proceso se realizará con una Criba de tambor donde se hará ingreso del compost rugoso proveniente de la fase de maduración. El material inorgánico será separado, almacenado en contenedores y posteriormente enviado a relleno sanitario El Molle, por otro lado, el material orgánico de mayor tamaño será recirculado al proceso de compostaje como material café en la formación de las pilas.

Una vez tamizado el material, se envasará en sacos de nylon para su posterior traslado al vivero municipal de la comuna de Viña del Mar.

-Equipo y maquinaria necesaria

En la tabla 5.22 se detallan los equipos y maquinarias necesarias para la fase de maduración.

Tabla 5.22: Equipos y Maquinarias a utilizar en Fase de maduración

Equipo	Función
Minicargador	Formación de pilas
Palas	Disminución del tamaño del material proveniente de podas.
Criba de tambor	Tamiza el compost rugoso.
Contenedores de residuos	Almacenar la fracción gruesa del compost.

5.2.4.5 Balance de masa Opción B

La planta de compostaje tendrá una capacidad de recibir 26.000 toneladas de residuos orgánicos al año, de este modo puede abarcar una cantidad mayor a la proyectada al año 2030.

Esta técnica degrada la materia orgánica a un compost de alta calidad. Se estima que la cantidad de compost resultante es entre el 20% al 40% del volumen total del material orgánico. Por otro lado, se estima que el 10% del volumen total de residuos de ingreso serán residuos de rechazo que tendrán disposición final en el relleno sanitario o en contenedores de reciclaje y que el 15% de del total de residuos orgánicos sea fracción gruesa de recirculación (GeoCiclos, 2014). En la figura 5.3 se especifica el balance de masa esperado para la planta de compostaje.

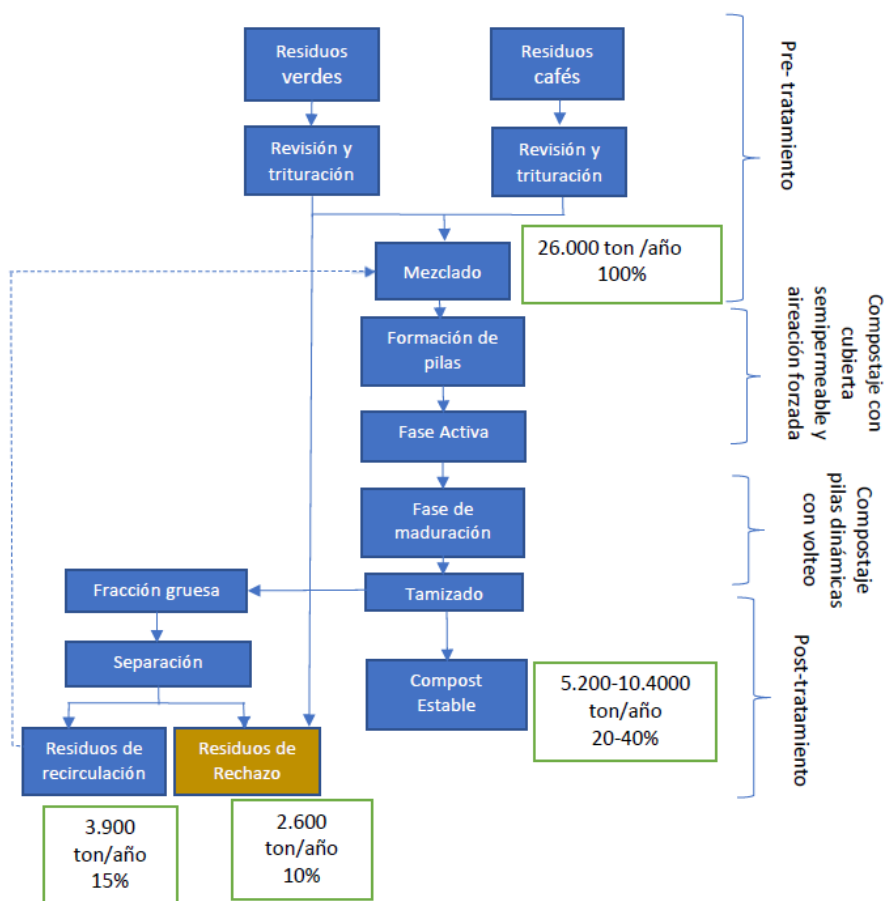


Figura 5.12: Balance de masa proceso de compostaje Opción B.

5.3 Análisis de costos asociados a las alternativas evaluadas técnicamente

Se realizó un análisis de los costos asociados a la implementación de las dos alternativas seleccionadas de acuerdo con la información obtenida por medio de cotizaciones, además, se evaluaron estos costos en contraste con los beneficios que traía consigo cada opción y posteriormente se compararon las dos opciones de compostaje seleccionadas.

5.3.1 Análisis de costos de la opción A

Este análisis consta de la estimación de los costos de materiales y equipos (disponibles en el mercado nacional) necesarios para la implementación de la planta de compostaje con la técnica de volteo mecánico con volteador de compost, además de la estimación de costos asociados a mano de obra para la operación de la planta.

- Costos de materiales y equipos

Para obtener los costos de maquinarias y equipos se realizó cotizaciones en el mercado nacional, por otro lado, la ficha técnica de cada material y equipo se encuentra en el Anexo 1.

En la tabla 5.23 se especifica el equipo, modelo, cantidad y valor de la maquinaria necesaria para la operación de la planta. La planta actual cuenta con Minicargador, chipeadora y palas, por lo que estos implementos no fueron contabilizados en el análisis de costos.

Tabla 5.23: Estimación de costos asociados a material y maquinaria

Equipo	Modelo	Cantidad	Valor	Valor total con IVA	Valor en UF
Báscula	Plataforma de pesaje Ecobeck modelo XK7516/100100	1	\$39.767.690	\$39.767.690	1.153
Minicargador	-	1			
Chipeadora	Bandit Modelo 280 XP.	1	-	-	-
Pinza de agarre	Brazo Extensible Recogedor Plegable Pinza Ai75	4	\$16.500	\$66.000	2
Volteador de compost	Backhus A36	1	\$25.000.000	\$25.000.000	725
Termómetro digital de sonda larga	Checktemp® 1 Termómetro Digital de Bolsillo - HI98509	1	\$51.000 sin IVA	\$60.690	2
Sensor de humedad de suelo	H4704120	1	\$310.959 sin IVA	\$370.042	11
Electrodo	Electrodo de pH HALO con Cuerpo de Vidrio Rellenable y Bluetooth® - HI11312	1	\$312.000 sin IVA	\$371.280	11
Palas	-	-	-		-
Harnero	ROTARY SIEVE CT0611	1	660.000 sin IVA	\$785.400	23
Contenedores 1.1 m ³	CB-1100L	3	\$339.900 sin IVA	\$1.213.443	35
Contenedores 660 litros	CB-V660	4	\$362.990 sin IVA	\$1.727.832	50

La opción A solo contempla la compra de maquinaria y equipos, debido a que esta opción no contempla construcciones de ningún tipo. El costo asociado a maquinaria y equipos para el funcionamiento de la planta de compostaje es de aproximadamente 2.012 UF.

- Mano de obra estimada

En la tabla 5.24 se resume el personal requerido para la operación de la planta de compostaje, cargo a utilizar y sueldo estimado. La estimación de sueldos se realizó mediante la cotización de sueldos en página web www.Talent.com, la cual realiza un estudio de los sueldos según tipo de trabajo, cabe destacar que se utilizó el mayor sueldo establecido por cargo.

Tabla 5.24: Estimación de costos asociados a mano de obra requerida Opción A

Trabajadores	Cantidad	Sueldo
Administrador de planta	1	\$1.600.000
Supervisor	1	\$ 866.667
Operarios de maquinaria	2	\$ 908.000
Operarios	4	\$650.000
Total mensual		\$6.882.667

La opción A tiene un costo de mano de obra aproximado de \$ 6.882.667 mensuales y de \$82.592.004 anuales.

5.3.1.1 Análisis costo-beneficios de la Opción A

La planta de compostaje mediante el uso de la técnica de pilas dinámicas con volteo mecánico con volteadora de compost tiene un costo de inversión en equipos y maquinarias de aproximadamente 70 millones de pesos, y un costo fijo mensual de \$6.882.667 de mano de obra pudiendo, de este modo, realizar la valorización de 19.560 toneladas de residuos orgánicos al año 2030.

La disposición final de RSD en la comuna de Viña del Mar tiene un valor de \$7.000 por tonelada dispuesta en el relleno sanitario El Molle. Al realizar el compostaje de 19.560 toneladas de residuos orgánicos se realizaría un ahorro de \$136.920.000 anuales en disposición final, sin embargo, con un gasto anual de \$82.592.004 en mano de obra para la

implementación de esta técnica de compostaje, el ahorro neto en la disposición final sería de \$54.327.996. Cabe destacar que con el compost obtenido se cubre el requerimiento de sustrato para la elaboración de parques y jardines y la propagación de plantas en el Vivero municipal de la comuna de Viña del Mar, ahorrando la compra de sustrato a proveedores externos.

Al realizar la valorización de los residuos orgánicos y evitar que estos sean dispuestos en rellenos sanitario o vertederos, se podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La EPA considera que una tonelada de residuos orgánicos genera aproximadamente 4,2 toneladas de dióxido de carbono equivalentes, por lo tanto, al valorizar 19.560 toneladas de residuos orgánicos se podrían reducir las emisiones en aproximadamente 82.152 toneladas de CO_2 -eq al año.

5.3.1.2 Periodo de recuperación de la inversión Opción A

Para el cálculo del periodo de recuperación de la inversión se utilizó la ecuación 4.4, donde se utilizó el valor de la inversión en pesos y como valor de flujo de caja se utilizó el valor del beneficio económico, es decir, el ahorro que se obtendría por no realizar la disposición final de los residuos en el Relleno Sanitario. Estos valores se detallan en la tabla 5.25.

Tabla 5.25: PRI Opción A

IO	F	PRI
\$70.213.790	\$54.327.996	1.3 años

De este modo, se obtiene que la inversión realizada para la implementación de la Opción A se recuperaría en un periodo de 1.3 años.

5.3.2 Análisis de costos opción B

Para obtener los costos de maquinaria, equipo y estructuras, se realizó cotizaciones en el mercado nacional, por otro lado, la ficha técnica de cada material y equipo se encuentra en el Anexo 2.

- Maquinarias y equipos

En la tabla 5.26 se especifica el equipo, modelo, cantidad y valor de la maquinaria necesaria para la operación de la planta. La planta actual cuenta con Minicargador, chipeadora y palas, por lo que estos implementos no contabilizados en el análisis de costos.

Tabla 5.26: Estimación de costos asociados a material y maquinaria

Equipo	Modelo	Cantidad	Valor	Valor total con IVA	Valor en UF
Báscula	Plataforma de pesaje de camiones	1	\$39.767.690	\$39.767.690	1.153
Minicargador	-	1			
Cargador frontal	SW405K	1	\$128.602.348	\$128.602.348	3.729
Chipeadora	Bandit Modelo 280 XP.	1	-	-	-
Pinza de agarre	Brazo Extensible Recogedor Plegable Pinza Ai75	4	\$16.500	\$66.000	2
Membrana Goretex	Goretex	26.000 ton	14.137 CLP/ton	\$ 367.562.000	10.659
Termómetro digital de sonda larga	Checktemp® 1 Termómetro Digital de Bolsillo - HI98509	1	\$51.000 sin IVA	\$60.690	2
Sensor de humedad de suelo	H4704120	1	\$310.959 sin IVA	\$370.042	11
Electrodo	Electrodo de pH HALO con Cuerpo de Vidrio Rellenable y Bluetooth® - HI11312	1	\$312.000 sin IVA	\$371.280	11
Palas	-	-	-	-	-
Criba de tambor	ROTARY SIEVE CT0611	2	\$660.000 sin IVA	\$1.570.800	46
Estanque de lixiviados	ESTANQUE VERTICAL 10.000L EVS10000	1	\$903.271	\$903.271	26
Bomba para líquidos	BOMBA COMEX 1.0HP	1	\$211.955	\$211.955	6

Continuación tabla 5.26.

Equipo	Modelo	Cantidad	Valor	Valor total con IVA	Valor en UF
Ventiladores	CPV-1325-2T IE3	4	\$1.321.000	\$ 5.284.000	153
Tuberías de aireación	Tubería PVC	120 metros	\$447 CLP /metro	\$53.600	2
Contenedores 660 litros	CB-V660	4	\$362.990 sin IVA	\$1.727.832	50

La opción B contempla un costo para la compra de maquinaria y equipo para el funcionamiento de la planta de compostaje de 15.850 UF.

- Construcción de estructuras

La estructura principal que se necesita en la implementación de la planta de compostaje es un radier de 472 m² con un espesor de 0.15 metros en hormigón. Se cotizó el trabajo abarcando mano de obra, compactaciones, base estabilizada, retiro de escombros y materiales en Vacal Construcciones por un monto total de \$20.372.000 neto. En el Anexo 3 se adjunta imagen de cotización.

-Mano de obra

Se estima un total de 6 trabajadores para la planta de compostaje, en la tabla 5.27 se especifican los cargos y sueldos estimados. La estimación de sueldos se realizó mediante la cotización de sueldos en página web “www.Talent.com” la cual realiza un estudio de los sueldos según tipo de trabajo, cabe destacar que se utilizó el mayor sueldo establecido por cargo

Tabla 5.27: Estimación de costos asociados a mano de obra requerida Opción B

Trabajadores	Cantidad	Sueldo
Administrador de planta	1	\$1.600.000
Supervisor	1	\$866.667
Operarios de maquinaria	2	\$908.000
Operarios	2	\$ 650.000

La opción A tiene un costo de mano de obra aproximado de \$5.582.667 mensuales.

5.3.2.1 *Análisis costo- beneficios de la Opción B*

La implementación de la técnica de compostaje de pilas con cubierta semipermeable y aireación forzada tiene un costo de implementación total de \$566.923.508 contemplando la compra de equipos, maquinarias e instrumentos de control del proceso, además de la infraestructura. Por otro lado, esta técnica tiene un costo fijo mensual de aproximadamente \$5.582.667 de mano de obra, pudiendo realizar la valorización de 26.000 toneladas de residuos orgánicos al año 2030.

La disposición final de RSD en la comuna de Viña del Mar tiene un valor de \$7.000 por tonelada dispuesta en el relleno sanitario El Molle. Al realizar la valorización de 26.000 toneladas de residuos orgánicos, se obtendría un ahorro cercano a los \$182.000.000 en disposición final, sin embargo, la planta tendría un gasto anual de mano de obra de \$66.992.004, por lo tanto, el ahorro neto derivado de la implementación de esta técnica de compostaje sería de \$115.007.996.

El compost obtenido es utilizado como sustrato para la elaboración de parques y jardines y para la propagación de especies vegetales en el vivero municipal de la comuna de Viña del Mar, cubriendo de este modo el gasto de la compra de sustratos a proveedores externos para este fin.

Por otro lado, al no realizar la disposición final de 26.000 toneladas de residuos orgánicos en el relleno sanitario o en vertederos, se podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernador en 109.200 toneladas de CO_2 -eq al año.

5.3.2.2 Periodo de recuperación de la inversión Opción B

Para el cálculo del periodo de recuperación de la inversión se utilizó la ecuación 4.4, donde se utilizó el valor de la inversión en pesos y como valor de flujo de caja se utilizó el valor del beneficio económico, es decir, el ahorro que se obtendría por no realizar la disposición final de los residuos en el Relleno Sanitario. Estos valores se detallan en la tabla 5.28.

Tabla 5.28: PRI Opción B

I0	F	PRI
\$553.125.533	\$115.007.996	4.8 años

De este modo, se obtiene que la inversión realizada para la implementación de la Opción B se recuperaría en un periodo de 4.8 años.

5.3.3 Comparación de la opción A y B

En la tabla 5.29 se realizó una síntesis comparativa de los parámetros relevantes para la implementación de las técnicas en la planta de compostaje de la comuna de Viña del Mar.

Se contrastaron los datos de cada alternativa, además se realizó un análisis de los recursos requeridos y beneficios obtenidos por 1 tonelada de residuos a compostar para fines de una comparación asertiva.

Cabe destacar que se dispone de espacio para la implementación de ambas opciones, ya que se disponen de diferentes lugares donde las actividades de cada técnica se pueden segregar.

Tabla 5.29: Comparación Opción A y Opción B.

Parámetro	Opción A	Opción A por 1 tonelada valorizada	Opción B	Opción B por 1 tonelada valorizada
Capacidad de compostaje	19.560 ton/año	1	26.000 ton/año	1
Área requerida	6.000 m ²	0.31	2.000 m ²	0.08
Costo de implementación	2.012 UF	0.10	15.850 UF	0.61
Costo de mano de obra	\$6.882.667	352	\$5.582.667	214
Beneficios económicos	\$54.327.996	2778	\$115.007.996	4423
Reducción de gases de efecto invernadero	82.152 toneladas de CO ₂ -eq al año	4.2	109.200 toneladas de CO ₂ -eq al año.	4.2
Recuperación de la inversión	1.3 años	-	4.8 años	-

5.4 Indicadores de calidad y eficiencia en el proceso de compostaje y en el compost resultante

En el siguiente apartado se establecieron indicadores de calidad y eficiencia del proceso de compostaje y de la calidad del compost resultante basados en la Norma Chilena 2880: Compost- Clasificación y requisitos, además se proponen procedimientos de control para un proceso eficiente.

5.4.1. Parámetros de control

El compostaje es un proceso que requiere de parámetros de control para favorecer el correcto procesamiento de la materia.

Se proponen dos tipos de controles para mantener un registro del procesamiento de los residuos orgánicos para que de este modo se asegure un proceso eficaz y se eviten emanaciones de GEI o contaminación del los residuos.

1- Control de origen de la materia prima

La NCh 2880 establece que el proceso de compostaje deberá utilizar un sistema de registro de la materia prima para la trazabilidad del material . En la tabla 5.30 se detallan las fuentes de materia prima hábiles y no hábiles para un compost de alta calidad según la NCh 2880.

Tabla 5.30 Fuentes hábiles y no hábiles de materia prima para el compostaje (En base a NCh2880)

Fuentes hábiles de materias primas para compostaje	Fuentes no hábiles de materias primas para compostaje
Residuos de producción agrícola de frutas, hortalizas, legumbres, cereales, tabaco y otros similares	Residuos de plantas impregnadoras de madera
Residuos de industrias de conservas, deshidratados, industrias de tabaco y levaduras	Residuos de baños anti-manchas
Residuos orgánicos de producción pecuaria primaria	Especies utilizadas para la remediación de silos contaminados.
Residuos orgánicos de la industria azucarera	
Residuos orgánicos de la industria lechera	
Residuos orgánicos de la industria panadera	
Residuos orgánicos de la industria de reciclaje de papel	
Residuos orgánicos de la industria de bebidas alcohólicas y analcohólicas.	
Residuos orgánicos de la industria del cuero que no contengan cromo	
Residuos orgánicos domiciliarios	

Se establecieron los siguientes parámetros de registro para el cumplimiento de la NCh 2880 y el procesamiento eficiente de los residuos.

- Fecha de ingreso
- Cantidad de residuos ingresados
- Tipo de residuos
- Origen
- Camión de ingreso (placa patente)

De esta manera, se tendrá un control en los materiales de ingreso para asegurar un correcto proceso de compostaje, evitando así, utilizar materiales no aptos para el proceso, además ,

este control podrá ser utilizado para verificar que el balance de masa del proceso se cumpla, ya que de lo contrario podría encontrarse problemas en el procesamiento del material.

2- Control del proceso de compostaje

El proceso de compostaje utilizará métodos de control para asegurar un correcto funcionamiento de la planta, Se sugiere que cada pila de compostaje tenga una ficha de control, en la que se debe registrar la siguiente información:

- Tipo de material
- Origen del material
- Fecha de inicio y de término de la formación de la pila
- Masa de los residuos de la pila
- Registros de temperaturas
- Registros de pH
- Registros de humedad
- Fecha de término del proceso de compostaje
- Masa de compost obtenido.

Estos parámetros de control son fundamentales para la eficiencia del proceso de compostaje, debido a que se pueden evaluar al comparar con los parámetros establecidos para el procesamiento de los residuos, como lo son el balance de masa estimado para el proceso, el tiempo de duración de este y los parámetros óptimos de pH, temperatura y humedad según la fase en la que se encuentre.

5.4.2 Indicadores de eficiencia del proceso de compostaje

Se propuso que el proceso de compostaje tenga un indicador de eficiencia en el procesamiento de los residuos orgánicos y un indicador disminución de residuos orgánicos

dispuestos en rellenos sanitarios asociado a las metas de reciclaje y valorización de residuos orgánicos y economía circular al año 2030.

- Indicador de eficiencia del proceso de compostaje

Los parámetros de temperatura, humedad y pH son indicadores de eficiencia del proceso de compostaje. Se propone que se lleve registro y control de estos parámetros dado que un procesamiento ideal del material orgánico cumplirá con los valores óptimos para cada parámetro, los que se indican en la tabla 5.31, y se obtendrá como resultado un compost de alta calidad.

Es importante cumplir con los parámetros señalados en la tabla 5.31, ya que estos permiten la higienización del material, la eliminación de patógenos, bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella* spp, además de la eliminación de esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas (FAO, 2013).

Tabla 5.31: Parámetros indicadores de eficiencia del proceso de compostaje (En base a NCh 2880; FAO, 2013).

Temperatura		
Etapa	Temperatura promedio	Tiempo mínimo
Fase Activa	55-59 °C	2 semanas
	59-65°C	1 semana
	>65°C	3 días
Fase de maduración	Temperatura ambiente	
Humedad		
Fase activa	50-60%	
Fase de maduración	30-40%	
pH		
Fase activa	6.5-8	
Fase de maduración	6.5-8.5	

- Indicador de % de disminución de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios.

El MMA propone un indicador del cumplimiento de las metas de gestión de residuos orgánicos con vistas al 2030 y 2040. Este indicador nos modela el porcentaje de disminución de residuos orgánicos con disposición final en vertederos o rellenos sanitarios.

La ecuación para el cálculo de este indicador es la que se muestra en la ecuación 5.6. Esta fórmula incluye la cantidad de residuos orgánicos valorizadas del municipio en SINADER y la cantidad de residuos valorizados en casas, establecimientos educacionales y barrios.

Cabe destacar que los residuos orgánicos valorizados con la técnica de compostaje deberán ser declarados en el SINADER.

$$\%DRO = \frac{\text{Ton valorizadas(SINADER)} + \text{tonvalorizadas(casas, EE, barrios)}}{\text{To tal ton valorizadas} + \text{estimación de RO no valorizados}} * 100\%$$

Ecuación 5.6: Indicador de disminución de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios

Donde:

Ton valorizadas (SINADER): residuos orgánicos valorizados por el municipio y declarados en el SINADER.

Ton valorizadas (casas, EE, barrios): estimación de la cantidad de residuos orgánicos valorizados en casas, establecimientos educacionales y en barrios.

Estimación de RO no valorizados: Este término corresponde a la estimación de residuos orgánicos que no fueron valorizados y que se destinaron a disposición final. Para el año N se

considerará la información obtenida en una caracterización que será realizada cada 5 años, y para los años N+1 al N+4 se realizará una proyección en base a una fórmula elaborada por el MMA.

5.4.3 Indicadores de calidad del compost resultante

La Norma Chilena 2880 tiene por objetivo establecer la clasificación y requisitos de calidad del compost resultante del proceso de compostaje de residuos orgánicos. Esta norma clasifica el compost en tres distintas clases según su nivel de calidad:

- Compost clase A: producto de alta calidad que no presenta restricciones de uso.
- Compost clase B: producto de nivel intermedio de calidad que presenta restricciones de uso, generalmente este compost requiere ser mezclado con otros sustratos para su uso.
- Compost inmaduro o subestándar: producto que no ha alcanzado la total descomposición del material orgánicos, debido a que ha sufrido una descomposición inicial, pero no ha alcanzado la etapa de enfriamiento y maduración correspondiente. El compost inmaduro presenta restricciones de uso y debe ser mezclado con otros sustratos.

El compost resultante del proceso de compostaje será utilizado para la producción de plantas en el Vivero Municipal, por el departamento de Parques y Jardines de la Ilustre Municipalidad de Viña del Mar. Este producto es el único utilizado como sustrato para las plantaciones, es decir, no es mezclado con otros sustratos. Esto hace fundamental que el compost resultante sea de una alta calidad, con una clasificación según la NCh 2880 de Compost de clase A.

Los indicadores y requisitos mínimos de calidad de compost a cumplir según la NCh 2880 son los siguientes:

- Indicadores del Compost resultante

El compost resultante del proceso de compostaje debe presentar parámetros según clase establecidos en la tabla 5.32.

Tabla 5.32: Parámetros del compost Clase A y Clase B (En base a NCh 2880)

Parámetro	Compost Clase A	Compost Clase B
pH	5-8.5	5-8.5
Materia orgánica	≥ 20%	≥ 20%
Tamaño de la partícula	≤16 mm	-
Densidad aparente	≤700 kg/m ³	-
Humedad	30-45%	-
Contenido de nutrientes	Contenido en nitrógeno ≥ 0,5 % /Base seca)	
Arsénico	15 mg/kg	20 mg/kg
Cadmio	2 mg/kg	8 mg/kg
Cobre	100 mg/kg	1000 mg/kg
Cromo	120 mg/kg	600 mg/kg
Mercurio	1 mg/kg	4 mg/kg
Níquel	20 mg/kg	80 mg/kg
Plomo	100 mg/kg	300 mg/kg
Zinc	200 mg/kg	2000 mg/kg
Conductividad eléctrica	< 2 [dS/m]	<8 [dS/m]
Relación C/N	≤25	30
Coliformes fecales	< 1000 NMP por gramo de compost en base seca	
Salmonella sp	3 NMP en 4 gramos de compost en base seca	
Huevos de helmintos viables	1 a 4 gr de compost en base seca	

Cada uno de los parámetros abordados en la tabla 5.32 son indicadores de calidad del compost. Para la medición de estos parámetros se deben realizar ensayos con la metodología TMECC preferentemente.

- Índice de madurez

El compost para ser considerado maduro, además de encontrarse a temperatura ambiente debe cumplir con los siguientes puntos, según lo descrito por la NCh 2880.

- La relación C/N debe ser menor o igual a 30, de presentar un valor menor, no se realizará otro ensayo.
- Debe presentar niveles dentro los rangos óptimos establecidos por la norma en dos ensayos, uno debe ser del grupo 1 de testeo y otro del grupo 2 de testeo, los que se muestran en la tabla 5.33.

Tabla 5.33: Test grupo 1 y 2 (en base a NCh 2880)

Test grupo 1	Rangos de aceptación
Evolución de CO ₂ (respiración)	≤ 8 mg de C-CO ₁ /g de materia orgánica por día
Absorción de o ₂	≤ 3.5 mg de oxígeno/g de materia orgánica por día
Autocalentamiento	≤ 20°C
Test grupo 2	Rangos de aceptación
Relación amonio/nitrato	≤ 3
Concentración de amonio	≤500 mg/kg
Contenido de ácidos orgánicos volátiles	≤300 mg/kg
Germinación de rabanitos	≥ 80%

De cumplir con al menos un testeo de cada grupo se considerará que el compost completó el proceso de maduración y se encuentra en estado estable para su utilización.

6- DISCUSIÓN

El compostaje resulta ser una estrategia con técnicas muy variada en el procesamiento de la materia, con el uso de adecuado de los recursos resulta ser altamente efectiva en el procesamiento de la materia orgánica para contribuir con la mitigación del cambio climático (Reciclo Orgánicos, 2021)

De este trabajo se obtuvieron mediante revisión bibliográfica 9 técnicas de compostaje a nivel municipal, de las cuales, únicamente dos cumplían con los requerimientos para la implementación de estas en el centro de compostaje de la municipalidad de Viña del Mar. Dentro de estos requerimientos se destaca la capacidad de tonelaje anual igual o superior a 19.560 ton/año, dicho valor se obtuvo de la proyección de generación de residuos orgánicos al año 2030, contemplando el 20% de los residuos orgánicos totales generados a ese año para cumplir con las estrategias elaboradas por el MMA; y el requerimiento de ser una técnica apta para el tratamiento de RSD, entre otros.

Las dos técnicas seleccionadas fueron la técnica de pilas con volteo mecánico por medio de volteador de compost (opción A) y de pilas estáticas con cubierta semipermeable y aireación forzada (Opción B).

La opción A tiene una capacidad de compostaje de 195.60 ton/año de residuos, con un costo de implementación de 2.012 UF y una necesidad de mano de obra de 8 funcionarios para la operación completa de la planta. Dentro de los beneficios que trae consigo esta opción se encuentra el ahorro cercano de 54.000.000 que permite hacer al municipio de Viña del Mar por disminución en la disposición final de residuos al relleno sanitario, reduce las emisiones de GEI en cerca de 82.000 toneladas de -eq al año, además, tiene un tiempo reducido de

recuperación de la inversión de 1.3 años, lo que reduce los riesgos de pérdidas y favorece la implementación de proyectos paralelos (Moncayo, 2015).

Esta técnica es ampliamente utilizada para el compostaje puesto que los costos asociados a su implementación no son elevados, en comparación a otras técnicas, y la maquinaria principal a utilizar, el volteador de compost se encuentra disponible en una amplia gama de modelos en el mercado nacional. Municipalidades como la de Villa alemana han elaborados proyectos de compostaje municipal con el uso de esta técnica para su futura implementación ya que se considera una técnica altamente utilizada, relativamente simple y que cuenta con escasas complicaciones las cuales, en caso de existir, son rápidas y fáciles de solucionar (Bnamericas, 2022).

Por otro lado, la opción b tiene una capacidad de compostaje mayor, cercana a 26.000 toneladas de residuos anuales, posee una menor cantidad de mano de obra, menos requerimientos de espacio, reduce las emisiones de GEI en cerca de 110.000 toneladas de - eq al y propone un ahorro económico anual del doble que la opción, sin embargo, tiene un costo de inversión prácticamente 8 veces mayor que la opción A, con un periodo de recuperación de la inversión de 4.8 años. Cabe destacar que la opción B utiliza una cubierta semipermeable de tipo GORETEX® la cual presenta un mercado escaso con limitados proveedores y no se encuentra en el mercado nacional, del mismo modo, necesita de infraestructura específica con una red de tuberías diseñadas a medida para la implementación de esta técnica.

La ciudad de Talca, se encuentra en el proceso de construcción de una planta de compostaje con la tecnología GORETEX® para obtener una capacidad de compostaje de aproximadamente 6000 ton/año de residuos orgánicos, con un coste de inversión mayor a \$1.000.000.000 (Ilustre Municipalidad de Talca, 2020) La municipalidad de Talca no cuenta con un sistema previo de compostaje, lo que radica en el elevado costo de inversión inicial para la implementación de este proyecto, en ese sentido la Municipalidad de Viña del Mar

posee recursos y experiencias previas en el compostaje municipal lo que favorece la implementación de alguna de las alternativas descritas en este trabajo.

Si bien ambas opciones tienen métodos de compostaje distintos, mediante la información obtenida en este trabajo se determina que cualquier método de compostaje para su realización eficiente debe presentar indicadores y cumplir con ellos en el procesamiento de los residuos.

El registro y control de ingreso hace fundamental mantener trazabilidades en el proceso de compostaje, de este modo se evita contaminación de los residuos y se potencia la generación de un compost de alta calidad, además, se establecen parámetros de seguimiento y testeos para la verificación de un compost de alta calidad. Si bien existe una normativa (NCh 2880) de requisitos y calidad del compost resultante, esta es de carácter voluntaria (INN, 2015).

De este modo, los indicadores propuestos para la elaboración del compost no son de carácter obligatorio, sin embargo, se establecen para garantizar un proceso eficiente, con el cumplimiento de estándares orientados a la higienización del material. Un proceso de compostaje que no se realiza de forma adecuada, da como resultado una materia orgánica no estabilizada o un compost inmaduro, que puede perjudicar al medio ambiente y al suelo, afectando al crecimiento de las plantas y causar daños a los cultivos por fitotoxicidad, entre otros (Goyal et al., 2005).

El contenido de metales pesados del compost es un factor limitante que debe analizarse para su aplicación segura como enmienda orgánica en el suelo (Moral et al., 2009). España cuenta con una legislación de carácter obligatoria que indica valores límites establecidos para contaminantes, bacterias y metales pesados, contrariamente, en la Oficina de Economía Circular perteneciente al Área de Gestión de Residuos del Ministerio del Medio Ambiente de Chile no cuenta con instrumentos de políticas públicas respecto a la gestión de residuos orgánicos municipales (MMA, 2018)

7- CONCLUSIÓN

De este trabajo se obtuvo como resultado un listado de técnicas de compostaje con sus principales características y requerimiento para su implementación a nivel municipal, de las cuales se extrajeron dos alternativas que cumplían mayoritariamente con los requerimientos específicos para su implementación en el centro de compostaje de la comuna de Viña del Mar.

Ambas alternativas fueron analizadas desde un enfoque técnico y referente a los costos asociados a su implementación, con el fin de evaluar la alternativa más rentable para el municipio en cuanto a los recursos disponibles. Las técnicas escogidas fueron la técnica de compostaje en pilas dinámicas con volteo mecánico y la técnica de compostaje en pilas estáticas con cubierta semipermeable.

La técnica de compostaje de pilas dinámicas con volteo mecánico con el uso de un volteador de compost tiene una capacidad de compostaje cercana a las 19.600 toneladas, tiene un costo de implementación bajo y un funcionamiento relativamente sencillo, sin embargo, posee necesidades de terreno mayores y una mayor cantidad de mano de obra para su funcionamiento. Por otro lado, la técnica de compostaje de pilas estáticas con cubierta semipermeable tiene una capacidad aún mayor de compostaje, necesidades de terreno menores y también un menor requerimiento de mano de obra para su funcionamiento, en comparación con que la técnica antes descrita, sin embargo, tiene un costo de inversión muy elevado.

Se establecieron parámetros de seguimiento e indicadores de calidad para un sistema de compostaje eficiente y con resultado de compost de alta calidad, para de este modo evitar las pérdidas de residuos y/o compost por contaminación producto de un procesamiento deficiente de los residuos, favoreciendo la economía circular, la protección del medio ambiente y la restauración de suelos.

La implementación de alguna de estas dos técnicas favorecerá el aumento de la capacidad de compostaje de la comuna de Viña del Mar, pudiendo así, asegurar el cumplimiento de las

estrategias de valorización de residuos orgánicos en el marco de la declaración de emergencia climática de la comuna, tener impactos positivos en la crisis climática actual, con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el aumento de la vida útil de rellenos sanitarios y el ahorro económico para el municipio de Viña del Mar que conlleva la disposición final de residuos en el relleno sanitario y de la compra de sustrato para la mantención de parques y jardines.

8-BIBLIOGRAFÍA

- Al-Alawi, M., Szegi, T., El Fels, L. et al. (2019). *Green waste composting under GORE(R) cover membrane at industrial scale: physico-chemical properties and spectroscopic assessment*. *Int J Recycl Org Waste Agricult* 8 (Suppl 1), 385–397 [en línea] <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00311-w> > [Consulta: septiembre, 2022].
- Amigos de la Tierra & INCLAMCO2. (2013). *El Compostaje: Receta para Reducir la Huella de Carbono en España*. Amigos de la Tierra España. [en línea] España. <https://www.tierra.org/wpcontent/uploads/2016/01/compostaje_reducir_huella_carbono_estatal.pdf> [Consulta: mayo, 2022].
- Arcadis & Ilustre Municipalidad de Talca. (s. f.). *Planta de compostaje municipal* [Diapositivas]. Acuerdo Chile-Canadá. [en línea] < https://acuerdochilecanada.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/08/Planta-de-Compostaje-Municipal_Talca_Gian-Carlo-Rivano.pdf> [Consulta: diciembre, 2022].
- Avendaño, D. (2003). *El proceso de compostaje*. Tesis Ing. Agrónomo. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal [Consulta: mayo, 2022].
- Brock, T, y M. Madigan. (1993). *Microbiología*. p. 848-850. En T. Aloisi y Brecewell, C. México. [Consulta: abril, 2022].
- Burgos, C. (2021). *Evaluación económica y socioambiental de una planta de tratamiento de residuos orgánicos en la comuna de Ancud* [Tesis]. Universidad de Chile. [Consulta: septiembre, 2022].
- Chaparro, J. (2013). *Evaluación de la biodegradación de residuos sólidos ganaderos tratados mediante pilas de compostaje*. Proyecto de título para optar al título de Ingeniero civil. Concepción, Chile. Universidad del Bío-bío, [Consulta: abril, 2022].

- Contreras, A. (1996). *Efecto de la adición de nitrógeno y cenizas de combustión dendroenergética en el proceso de compostización de una mezcla de cortezas de especies nativas*. Tesis Ing. Forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. [Consulta: abril, 2022].
- COSMA Toledo (2019). *Memoria técnica para la construcción de una planta de compostaje para el tratamiento separado de los biorresiduos recogidos de forma selectiva en el ámbito del consorcio de servicios públicos medioambientales de la provincia de Toledo*. [en línea] < <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/59862ee8-9e4d-4b04-bc48ba427c5d4fdd/DOC20191014134826ANEXO+I+PLIEGO+DE+PRESCRIPCIONES+TECNICAS.pdf?MOD=AJPERES> > [Consulta: septiembre, 2022].
- El Martutino. (2019). Viña del Mar posee la planta de compostaje más grande de Chile. El Martutino. [en línea] < <https://www.elmartutino.cl/noticia/deporte/vina-del-mar-posee-la-planta-de-compostaje-mas-grande-de-chile> > [Consulta: abril, 2022].
- Elvira, C. San Pedro, L. E, Nogales, R. (1998). *Vermicomposting of sluges from paper mil and dairy industries with Eisenia Andrei; Apilot scale study*. Bioresource Technology, 63: 205-2011. [Consulta: abril, 2022].
- Environment Canada. (2013). *Technical Document on Municipal SolidWaste Organics Processing*. [En línea] < https://publications.gc.ca/collections/collection_2013/ec/En14-83-2013-eng.pdf > [Consulta: Octubre, 2022].
- FAO, Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Santiago, Chile. [Consulta: abril, 2022].
- FAO. (2018). *EL TRABAJO DE LA FAO SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO: Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático 2018*: Santiago, Chile. FAO [Consulta: abril, 2022].

- Farrell M., Jones D.L. *Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets*. *Bioresource Technology*, volumen 100 (número 19), 2009: 4301-4310. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.029> [Consulta: en abril, 2022].
- GeoCiclos. (2015). *Declaración de Impacto Ambiental “Planta de Compostaje GEO3R”*. [en línea] < https://seia.sea.gob.cl/archivos/2015/12/28/DIA_Parte_1_.pdf > [Consulta: septiembre, 2022].
- GeoCiclos. (2020). *Declaración de Impacto Ambiental “Centro de compostaje de Villa Alemana”*. [en línea] < https://seia.sea.gob.cl/archivos/2020/11/17/DIA_Completa.pdf > [Consulta: septiembre, 2022].
- Global Methane Initiative (GMI). (2011). *Metano de Vertederos: Reducción de las Emisiones, Avance de las Oportunidades de Recuperación y Utilización*. Global Methane. https://www.globalmethane.org/documents/landfill_fs_spa.pdf [Consulta: en mayo, 2022]
- Goyal, S., Dhull, S.K., Kapoor, K. K., 2005. *Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity*. *Bioresource Technology* 96, 1584-1591. [en línea] < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.012>> [Consulta: diciembre, 2022].
- Gressmann. J. (2022). *Sistema de recubrimiento con membranas para compostaje & secado biológico*. *Eggersmann Recycling Technology*. [en línea] < <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com/es/plantas-de-reciclaje/tratamiento-biologico/sistema-de-recubrimiento-con-membranas-para-compostaje-secado-biologico/> > [Consulta: septiembre, 2022].
- Haug, T.R., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. [Consulta: en mayo, 2022].
- Ilustre Municipalidad de Viña del Mar. (2019). *CUENTA PÚBLICA 2019: Dirección de operaciones y servicios*. [Consulta: marzo, 2022].

- Ilustre Municipalidad de Viña del Mar. (2020). *CUENTA PÚBLICA 2020: Dirección de operaciones y servicios*. [Consulta: marzo, 2022].
- ImplementaSur. (2019). *Asesoría sobre el manejo de residuos orgánicos generados a nivel municipal en Chile* (N.o 01). <https://rechile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Informe-1-Diagnostico-nacional-e-internacional.pdf> [Consulta: abril, 2022].
- Instituto Nacional de Estadísticas. 2018. *Resumen de censos de población y vivienda*. . [En línea] < <https://regiones.ine.cl/biobio/estadisticas-regionales/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda> > [Consulta: Noviembre, 2022].
- Instituto Nacional de Normalización. 2003. *NCh. 2880: Compost - clasificación y requisitos*. [En línea] < <http://www.ingeachile.cl/descargas/normativa/agricola/NCH2880.pdf> > [Consulta: septiembre, 2022].
- Instituto Nacional de Normalización. 2015. *Introducción*. [En línea] < <https://www.inn.cl/introduccion> > [Consulta: diciembre, 2022].
- INTEC. (1999). *Manual de compostaje*. Corporación de Investigación Tecnológica de Chile. Santiago, Chile. [Consulta: abril, 2022].
- IPCC. (2019). *Global Warming of 1.5 °C*. Geraadpleegd op 9 mei 2022, van <https://www.ipcc.ch/sr15/#fn:2> [Consulta: abril, 2022].
- Jarre, E. (2015). *Planta de Compostaje de RSU y Residuos Cítricos Industriales*. Tesis de Magíster en Ingeniería Ambiental. Sevilla, España. Universidad de Sevilla, [En línea] <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70677/>> [Consulta: septiembre, 2022].
- Liebeneiner, R. (2022). Compostaje en túneles. *Eggersmann Recycling Technology*. [en línea] < <https://www.eggersmann-recyclingtechnology.com/es/plantas-de-reciclaje/tratamiento-biologico/compostaje-en-tuneles/> > [Consulta: septiembre, 2022].

- Mendoza, D. (2010). *Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal*. Tesis Doctoral. Valencia. Universidad politécnica de Valencia, España. [Consulta: septiembre, 2022].
- Ministerio del Interior y Seguridad pública. (2018). *Ley 21.074. Fortalecimiento de la regionalización del país. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. <http://bcn.cl/2mnsy> [Consultado en mayo, 2022].
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040*. [en línea] <<https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Nacional-de-Residuos-Organicos-Chile-2040.pdf>>[Consulta: marzo 2022].
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1994) *Ley 19.300. Aprueba ley sobre bases generales del Medio ambiente*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. [en línea] <<http://bcn.cl/32mxg>> [Consulta: mayo, 2022].
- Misra, R.V; Roy, R.N e Hiraoka, H. *On- farm composting methods*. [en línea]. Roma: FAO, 2003. ISSN 1729-0554 Disponible en: http://www.fao.org/organicag/doc/on_farm_comp_methods.pdf [Consulta: septiembre, 2022].
- Moral, R., Paredes, C., Bustamante, M. A., Marhuenda-Egea, F., Bernal, M. P., (2009). *Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges*. *Bioresource Technology* 100, 5454-5460. [en línea] < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.007>> [Consulta: diciembre, 2022].
- Moncayo, C. (2015). *Cálculo del periodo de recuperación de la inversión o payback*. Instituto Nacional de Contadores Públicos de Colombia. [En línea] < <https://incp.org.co/calculo-del-periodo-de-recuperacion-de-la-inversion-o-payback>>[Consulta: diciembre, 2022].

- Nájera, Hugo Alejandro, & Mejía, Gaspar M., & Sauri, María Rosa, & Ramírez, José G. (2002). *Aplicación del composteo como método de tratamiento de los residuos de frutas producidos en zonas de alta generación*. Ingeniería, 6(1),13-20. [Consulta: mayo, 2022].
- Natural Resource, Agricultura, and Engineering Service (NRAES). (1992). *On-Farm composting handbook*. [en línea] [Https://campus.extension.org/pluginfile.php/48384/course/section/7167/NRAES%20Farm Compost%20manual%201992.pdf], 187p. [Consulta: mayo, 2022].
- Nogales, R., Domínguez, J. y MATO, S. (2008). *Vermicompostaje*. En: Moreno, J. y Moral, R. (Eds.). *Compostaje*. p. 187-207. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- O’Ryan, H y Riffo, M. (2006). *Programa de capacitación y entrenamiento para la introducción de la tecnología de compostaje y uso de compost*. Universidad de las Américas, Chile. 10,43. [en línea] < https://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/145834/FIA-FP-V-2004-1-P-021_MA1.pdf?sequence=3&isAllowed=y > [Consulta: abril, 2022].
- Odlare M., Arthurson V., Pell M., Svensson K., Nehrenheim E., Abubaker J. (2011). *Land application of organic waste - Effects on the soil ecosystem*. *Applied Energy*, volumen 88 (número 6), 2210-2218. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.043>>[Consulta: abril, 2022].
- Pérez, C. (2008). *Evaluación de los efectos de la aireación en pilas de compostaje de biosólidos*. Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío. [Consulta: septiembre, 2022].
- Ramírez, M. (2013). *Evaluación del efecto diferencial del mezclado mecánico en biodegradación de materia orgánica en compostaje aeróbico en pilas de aireación por difusores*. Tesis Ing. Civil. Concepción, Universidad de Concepción. [Consulta: Octubre, 2022].
- Reciclo Orgánicos (2021). *COMPOSTAJE*, MMA. [en línea] <<https://reciclorganicos.com/proyectos/compostaje/>> [Consulta: abril, 2022].

- Reciclo Orgánicos (2022). *Programa*. [En línea] <<http://reciclorganicos.com/programa/>> [Consulta: octubre, 2022].
- Saña, J.; Soliva, M. (1987). El compostaje: *Proceso, sistemas y aplicaciones*. *Quaderns d'ecologia aplicada*, nº 11. Diputació de Barcelona. Servei de Medi Ambient. Barcelona. [Consulta: septiembre, 2022].
- Schuldt M., Chistiansen R., Scatturice L.A., Mayo J.P. (2007). *Lombricultura. Desarrollo y adaptacion a diferentes condiciones de temperatura*. *RedVet VIII* (8):1-10 [Consulta: mayo, 2022].
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2019). *Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables*. [en línea] <<https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/Catastro%20de%20sitios%20septiembre%202019.pdf>> [Consulta: mayo, 2022].
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2021) *Implementación ley 21.074 fortalecimiento de la regionalización. cámara de diputadas y diputados*. [en línea] <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=221036&prmTipo=DOCUMENTO_COMISI ON> [Consulta: mayo, 2022].
- Tortosa, G. (2015). *Sistemas de compostaje*. *Compostando Ciencia*. [en línea] <<http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>> [Consulta: septiembre, 2022].
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2022). *El Acuerdo de París*. [en línea] . <<https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%20habla,orientaci%C3%B3n%20general%20al%20Mecanismo%20Tecnol%C3%B3gico>> [Consulta: mayo, 2022].
- United Nations. (2022). *Datos y cifras*. [en línea] | Naciones Unidas. <<https://www.un.org/es/actnow/facts-and>

[figures#: %7E:text=Cada%20a%C3%B1o%20se%20recolecta%20en,de%20gases%20de%20efecto%20invernadero>\]. \[Consulta: junio, 2022\].](#)

United Nations. (2022). *Cambio climático*. [en línea] <<https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>>[Consulta: mayo, 2022].

Valverde, V. (2018). *Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya*. Trabajo Fin de Máster. Universidad Miguel Hernández, España. [en línea] <<http://dspace.umh.es/bitstream/11000/5931/1/TFM%20Valverde%20Orozco%2C%20V%203%ADctor%20Hugo.pdf>> [Consulta: septiembre, 2022].

Virginia Tech. 1997. *On Farm Composting. A Guide to Principles, Planning & Opoerations*. 452-232 [en línea] < https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/48077/452-232_pdf.pdf?sequence=1> [Consulta: mayo, 2022].

World Bank Group. (2018). *Informe del Banco Mundial: Los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes*. [en línea] <<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>>[Consulta: mayo, 2022].

World Bank. (2018). *El futuro de la gestión de los desechos sólidos*. [en línea] <<https://www.bancomundial.org/es/news/immersive-story/2018/09/20/what-a-waste-an-updated-look-into-the-future-of-solid-waste-management>> [Consulta: mayo, 2022].

9-ANEXOS





Anexo 1: Información técnica de la maquinaria y equipos propuestos para la Opción A




Equipo: Plataforma de pesaje de camiones COV-6020	
	<p>Modelo: COV-6020</p> <p>Dimensiones: 5 x 3 metros.</p> <p>Capacidad máxima: 30.000 kilogramos</p> <p>Indicador de peso: TI-500E</p>
Equipo: Brazo Extensible Recogedor Plegable Pinza	
	<p>Modelo: Ai75</p> <p>Material: Aleación de aluminio , ABS de alta resistencia y TPR.</p> <p>Longitud total: 80 cm.</p>
Equipo: Volteador de Compost	
	<p>Modelo: Backhus A36</p> <p>Alto: 3.5 metros</p> <p>Ancho: 3 metros</p> <p>Velocidad: 50/min</p> <p>Cilindros: 4</p> <p>Depósito de combustible: 200 litros</p> <p>Anchura de la pila: hasta 3.6 metros.</p> <p>Altura de la pila: hasta 1.9 metros.</p> <p>Capacidad de desplazamiento: hasta 1.500 m³/h</p>
Equipo: termómetro Checktemp® 1 Termómetro Digital de Bolsillo	




	<p>Modelo: Checktemp® HI98509</p> <p>Material: sonda de acero inoxidable.</p> <p>Rango de temperatura: -50.0°C – 150.0°C</p> <p>Resolución de temperatura: 0.1 °C (-50.0 a 150.0 °C)</p> <p>Precisión de temperatura: ±0.2 °C (-30.0 a 120.0 °C); ±0.3 °C (exterior)</p> <p>Dimensiones: 107 x 59 x 17 mm</p> <p>Peso: 130 gramos.</p> <p>batería: 3 pilas alcalinas AAA de 1.5 V.</p>
<p>Equipo: Sensor de Humedad suelo.</p>	
	<p>Modelo: H4704120</p> <p>Rango humedad / exactitud: 0 - 100%, exactitud +3%</p> <p>Rango temperatura / exactitud: -30 + 70 °C; exactitud +0,3 °C</p> <p>Temperatura de trabajo: -40°C – 80°C</p> <p>Material sensor: acero inoxidable</p> <p>Dimensiones: 70 mm</p>
<p>Equipo: electrodo de pH</p>	
	<p>Modelo: HALO con Cuerpo de Vidrio Rellenable y Bluetooth® - HI11312</p> <p>Material cuerpo: Vidrio</p> <p>Electrolito 3.5 MCl</p> <p>Rango pH: 0.00 a 13.00</p> <p>Diámetro: 12 mm</p> <p>Longitud: 190 mm</p> <p>Temperatura de operación: -5°C – 80°C</p> <p>Sensor de temperatura: si</p> <p>Conexión: Bluetooth Smart (Bluetooth 4.0), rango 10 m (33')</p>
<p>Equipo: harnero ROTARY SIEVE CT0611</p>	

	<p>Modelo: ROTARY SIEVE CT0611</p> <p>Motor: 230V/ 50 HZ</p> <p>Potencia nominal: 360 W.</p> <p>Potencia nominal bajo carga: 180 W.</p> <p>Rotación del tambor: 45 rpm.</p> <p>Dimensión expandida: 1080*652*1350 mm.</p> <p>Diámetro del tambor: 375 mm.</p> <p>Longitud del tambor: 785 mm.</p> <p>Ruido: 89 db.</p> <p>Tamizado: 12 mm</p>
<p>Equipo: contenedores 1.100 litros CB-1100L</p>	
	<p>Modelo: CB-1100L</p> <p>Material: HDPE</p> <p>Peso: 53 kg</p> <p>Alto: 137 cm.</p> <p>Ancho: 136 cm.</p> <p>Fondo: 106 cm.</p>
<p>Equipo: contenedores 660 litros</p>	
	<p>Modelo: CB-660L</p> <p>Material: HDPE</p> <p>Capacidad: 660 litros</p> <p>Peso: 43 kg.</p> <p>Alto: 123 cm.</p> <p>Ancho: 122 cm.</p> <p>Fondo: 76 cm.</p>

Anexo 2: Información técnica de la maquinaria y equipos propuestos para la Opción B

Equipo: Plataforma de pesaje de camiones COV-6020	
	<p>Modelo: COV-6020</p> <p>Dimensiones: 5 x 3 metros.</p> <p>Capacidad máxima: 30.000 kilogramos</p> <p>Indicador de peso: TI-500E</p>
Equipo: Brazo Extensible Recogedor Plegable Pinza	
	<p>Modelo: Ai75</p> <p>Material: Aleación de aluminio , ABS de alta resistencia y TPR.</p> <p>Longitud total: 80 cm.</p>
Equipo: Cargador frontal	
	<p>Modelo: SW405K</p> <p>Potencia motor: 195 KW</p> <p>Capacidad del cucharón: 3.0 m³</p> <p>Peso de operacion: 18.500 kg</p>
Equipo: Membrana GoreTEX ®	
	<p>Modelo: GORE cover</p> <p>Tamaño poro: 0,2 μ</p> <p>Material: PTFE y poliester</p> <p>Vida útil: 7-8 años.</p>
Equipo: termómetro Checktemp® 1 Termómetro Digital de Bolsillo	

	<p>Modelo: Checktemp® HI98509</p> <p>Material: sonda de acero inoxidable.</p> <p>Rango de temperatura: -50.0°C – 150.0°C</p> <p>Resolución de temperatura: 0.1 °C (-50.0 a 150.0 °C)</p> <p>Precisión de temperatura: ±0.2 °C (-30.0 a 120.0 °C); ±0.3 °C (exterior)</p> <p>Dimensiones: 107 x 59 x 17 mm</p> <p>Peso: 130 gramos.</p> <p>batería: 3 pilas alcalinas AAA de 1.5 V.</p>
Equipo: Sensor de Humedad suelo.	
	<p>Modelo: H4704120</p> <p>Rango humedad / exactitud: 0 - 100%, exactitud +3%</p> <p>Rango temperatura / exactitud: -30 + 70 °C; exactitud +0,3 °C</p> <p>Temperatura de trabajo: -40°C – 80°C</p> <p>Material sensor: acero inoxidable</p> <p>Dimensiones: 70 mm</p>
Equipo: electrodo de pH	
	<p>Modelo: HALO con Cuerpo de Vidrio Rellenable y Bluetooth® - HI11312</p> <p>Material cuerpo: Vidrio</p> <p>Electrolito 3.5 MCl</p> <p>Rango pH: 0.00 a 13.00</p> <p>Diámetro: 12 mm</p> <p>Longitud: 190 mm</p> <p>Temperatura de operación: -5°C – 80°C</p> <p>Sensor de temperatura: si</p> <p>Conexión: Bluetooth Smart (Bluetooth 4.0), rango 10 m (33')</p>
Equipo: hamero ROTARY SIEVE CT0611	

	<p>Modelo: ROTARY SIEVE CT0611</p> <p>Motor: 230V/ 50 HZ</p> <p>Potencia nominal: 360 W.</p> <p>Potencia nominal bajo carga: 180 W.</p> <p>Rotación del tambor: 45 rpm.</p> <p>Dimensión expandida: 1080*652*1350 mm.</p> <p>Diámetro del tambor: 375 mm.</p> <p>Longitud del tambor: 785 mm.</p> <p>Ruido: 89 db.</p> <p>Tamizado: 12 mm</p>
<p>Equipo: contenedores 660 litros</p>	
	<p>Modelo: CB-660L</p> <p>Material: HDPE</p> <p>Capacidad: 660 litros</p> <p>Peso: 43 kg.</p> <p>Alto: 123 cm.</p> <p>Ancho: 122 cm.</p> <p>Fondo: 76 cm.</p>
<p>Equipo: Estanque Lixiviados</p>	
<p>4</p> 	<p>Modelo: ESTANQUE VERTICAL 10.000L EVS10000</p> <p>Capacidad: 10.000 litros</p> <p>Material: Polietileno MDPE</p> <p>Altura: 2.100 mm.</p> <p>Diámetro: 2.500 mm</p> <p>Temperatura máxima: 50°C</p>
<p>Equipo: Bomba Líquidos</p>	
	<p>Modelo: BOMBA COMEX 1.0HP</p> <p>Material: Hierro fundido.</p> <p>Temperatura máxima: 50°C</p> <p>Potencia: 1 HP</p>

	<p>Voltaje: 260 V.</p>
<p>Equipo: ventiladores</p>	
	<p>Modelo: CPV-1325-2T IE3 Velocidad 2.910 rpm Intensidad máxima admisible: 7.32 Voltaje: 230V Potencia instalada: 2.20 kW Caudal máximo: 3.250 m³/h Peso: 32 kg.</p>
<p>Tuberías de aireación</p>	
	<p>Modelo: Tubo PVC hidráulico 20 mm x 6 metros c 16 Hoffens. Presión de trabajo: 16 kg/cm²</p>

Anexo 3: Cotización construcción de estructura Opción B

3



VACAL
Construcciones

www.hormigonesvacal.cl




Radier Simple

METROS CUADRADOS

472

ESPESOR	TIPO DE TRABAJO
Espesor 15 cms	Cancha de Compostaje
FONO	COMUNA
0	Talagante

EL VALOR DE TU RADIER ES

A \$20.372.000

SOLO \$ 43.161 m2 NETO

AGENDEMOS SU VISITA TECNICA! PARA INCIAR LA OBRA

TRABAJO TERMINADO TODOS LOS MATERIALES INCLUYE:

Hormigón HN25, Mano de Obra, demolición, preparación, compactación, base estabilizada, hormigonado, malla acma o fibra según interés, retiro de escombros, etc.



hablemos!

+56 9 7988 5136

+56 2 3347 7803

ventas@hormigonesvacal.cl



Ejemplo:

