

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**  
**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE ESTIERCOL  
EQUINO EN REACTORES: UNA OPORTUNIDAD DE INNOVACIÓN  
TECNOLOGICA PARA EL DESARROLLO DE UN PRODUCTO DE ALTO  
INTERES AGRICOLA**

**FELIPE ANDRES ABRIGO AHUMADA**

MEMORIA DE TÍTULO PRESENTADA A  
LA FACULTAD DE INGENIERIA  
AGRICOLA DE LA UNIVERSIDAD DE  
CONCEPCION, PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
AGRICOLA

**CHILLAN – CHILE**

**2023**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE ESTIERCOL  
EQUINO EN REACTORES: UNA OPORTUNIDAD DE INNOVACIÓN  
TECNOLOGICA PARA EL DESARROLLO DE UN PRODUCTO DE ALTO  
INTERES AGRICOLA**

Aprobado por:

Mónica Montory González  
Bioquímica, Ph. D.  
Profesor Asistente

---

Profesor Guía

Javier Ferrer Valenzuela  
Ingeniero Civil Químico  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

Wilson Esquivel  
Ingeniero Civil Mecánico  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

Fernando Reyes  
Ingeniero Civil Mecánico  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Asistente

---

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## **Agradecimientos**

**A mis padres:** Por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y confiar en mis capacidades.

**A mis hermanos:** Por el apoyo incondicional que me dieron y me dan en los momentos difíciles.

**A mis amigos:** Por ser las personas a las que pude recurrir en momentos en los que estar fuera de casa se siente complejo y alegrar mis días de estudio.

**A mi tío:** Rodrigo Muñoz Por abrirme las puertas de su casa durante todo mi periodo universitario, donde no solo me brindo un techo donde vivir, sino que también fue un gran guía en el desarrollo de mi vida profesional.

**A los caballos y la agricultura:** Por ser la inspiración que permitió el desarrollo de esta investigación, en donde gracias a momentos vividos con ellos pude avanzar.

**A la Universidad de Concepción:** Por permitir mi formación como profesional.

**A las encargadas del laboratorio:** Leonor Morales por su paciencia y apoyo entregado en los análisis de laboratorio.

**A mis profesores guía:** Mónica Montory y Javier Ferrer, que me aconsejaron en momentos difíciles para el proceso investigativo.

**INDICE DE MATERIAS**

	Pagina
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. HIPOTESIS.....	11
3. OBJETIVOS.....	11
4. ANTECEDENTES GENERALES.....	12
5. METODOLOGIA.....	14
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
6.1. Análisis de parámetros bibliográficos.....	17
6.2. Análisis en laboratorio.....	30
6.2.1. Estiércol puro al 70% de humedad.....	30
6.2.2. Estiércol puro con diferentes contenidos de humedad	36
6.2.3. Mezcla de estiércol equino con cerezas.....	41
6.2.3.1. 60% estiércol – 40% cerezas.....	41
6.2.3.2. 50% estiércol – 50% cerezas.....	45
6. CONCLUSIONES.....	49
7. LITERATURA CITADA.....	50

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Evolución de las importaciones de fertilizantes de origen animal y vegetal desde el año 2015 hasta el 2019. Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile.....	7
Tabla 2.	Fortalezas y debilidades de los diferentes tratamientos orgánicos para el suelo conocidos actualmente, elaboración propia.....	10
Tabla 3.	Características de las materias primas utilizadas en las diferentes publicaciones analizadas.....	
Tabla 4.	Parámetros operacionales de los reactores de los diferentes estudios.....	23
Tabla 5.	Rangos obtenidos a partir de los promedios y desviación estándar de las características de las materias primas de diferentes estudios, comparándolos con los parámetros que debe cumplir el compost.....	24
Tabla 6.	Rangos de operación promedio obtenidos de los parámetros de trabajo reactores de diferentes estudios.....	25
Tabla 7.	Caracterización fisicoquímica de estiércol equino, obtenido de un criadero en la comuna de Curicó.....	26
Tabla 8.	Rango de las características fisicoquímica de estiércol equino obtenido de un criadero en la comuna de Curicó, versus lo analizado y las características exigidas por norma.....	26
Tabla 9.	Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de estiércol equino con 70% de humedad, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.....	33
Tabla 10.	Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de estiércol equino con 70, 65 y 60% de humedad, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.....	39
Tabla 11.	Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de una mezcla de 60% estiércol con 40% de cerezas, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.....	43

Tabla 12. Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de una mezcla de 50% estiércol con 50% de cerezas, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.....	47
Tabla 13. pH del compostaje en triplicado de la mezcla 50% estiércol / 50% cerezas.....	48

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de los niveles de degradación presentes en el territorio nacional. Fuente: Conaf.....	4
Figura 2. Variación en los costos de principales materias primas utilizadas para la producción de fertilizantes sintéticos. Fuente: Banco mundial (2021).....	5
Figura 3. Variaciones en el valor (\$ por unidad de nitrógeno) de diferentes fertilizantes desde enero del 2019 hasta agosto del 2021. Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile.....	5
Figura 4. Montón acumulador de estiércol acumulado en un criadero de caballos de raza chilena en la comuna de Curicó.....	11
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.....	14
Figura 6. Cantidad de publicaciones encontradas por año dependiendo de la palabra clave utilizada. Fuente, Web of Science, elaboración propia.....	19
Figura 7. Extracción de materia prima a partir de un punto de acumulación de estiércol equino en un criadero ubicado en la comuna de Curicó.....	27
Figura 8. Termobalanza utilizada para la medición de humedad de las muestras de estiércol equino.....	28
Figura 9. Reactores a escala laboratorio utilizados para el proceso de compostaje (A) y medición de temperatura mediante la utilización de termocupla de laboratorio (B).....	30
Figura 10. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de dos muestras de estiércol equino puro, comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.).....	31
Figura 11. Placas compact dry de coliformes fecales hechas a un compost de estiércol equino puro con 70% de humedad, a partir del reactor A (A) y el reactor B (B).....	32
Figura 12. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de 3 muestras de estiércol equino puro, comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.).....	36

- Figura 13. Placas compact dry de coliformes fecales hechas a tres reactores de estiércol puro, con humedades iniciales de 70% (A), 65% (B) y 60% (C)..... 38
- Figura 14. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de tres muestras de estiércol equino y cerezas (3:2), comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)..... 41
- Figura 15. Placas compact dry de coliformes fecales realizadas a un compost hecho de 60% estiércol equino y un 40% de cerezas, correspondientes a los reactores 1.1 (A), 1.2 (B) y 1.3 (C)..... 42
- Figura 16. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de tres muestras de estiércol equino y cerezas (1:1), comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)..... 45
- Figura 17. Placas compact dry de coliformes fecales de un compost hecho de 50% estiércol equino y 50% de cerezas, correspondiente a los reactores 2.1 (A), 2.2 (B) y 2.3 (C)..... 46

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE ESTIERCOL  
EQUINO EN REACTORES: UNA OPORTUNIDAD DE INNOVACIÓN  
TECNOLOGICA PARA EL DESARROLLO DE UN PRODUCTO DE ALTO  
INTERES AGRICOLA**

**EVALUATION OF THE COMPOSTING PROCESS OF EQUINE MANURE IN  
REACTORS: AN OPPORTUNITY OF TECHNOLOGYCAL INNOVATION  
FOR THE DEVELOPMENT OF A PRODUCT WITH HIGH AGRICULTURAL  
INTERESTING.**

**Palabras clave:** Compostaje en reactores, estiércol equino, compostaje in-vessel

**RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la posibilidad de obtener un compost que cumpla con los indicadores de calidad que la norma chilena exige para este tipo de productos, a partir de estiércol equino obtenido desde un criadero ubicado en la comuna de Curicó. El proceso de compostaje será acelerado mediante la utilización de reactores, los cuales para efectos de esta investigación serán de escala laboratorio. Previa a la etapa experimental se realizó un análisis bibliográfico, con el objetivo de determinar rango de operación de los reactores y diferencias en las características de las diferentes materias primas. Con el análisis se pondrán en marcha diferentes ensayos, los cuales serán evaluados posterior al proceso, determinando cual de ellos obtuvo mejores resultados y concluir mejorías para el desarrollo del proceso y la calidad del producto.

**EVALUATION OF THE COMPOSTING PROCESS OF EQUINE MANURE IN  
REACTORS: AN OPPORTUNITY OF TECHNOLOGICAL INNOVATION  
FOR THE DEVELOPMENT OF A PRODUCT WITH HIGH AGRICULTURAL  
INTERESTING.**

**Keywords:** Reactor composting, equine manure, in-vessel composting

**SUMMARY**

The objective of this work was to evaluate the possibility of obtaining a compost that meets the quality indicators that the Chilean standard requires for this type of product, from equine manure obtained from a farm located in Curicó. The composting process will be accelerated using reactors, which for the purposes of this research will be laboratory scale. Prior to the experimental stage, a bibliographic analysis was carried out, with the objective of determining the operating range of the reactors and differences in the characteristics of the different raw materials. With the analysis, different tests will be launched, which will be evaluated after the process, determining which of them obtained the best results and concluding improvements for the development of the process and the quality of the product.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dadas las condiciones geográficas, el posicionamiento del país como uno de los grandes productores agrícolas del continente y la contra estación existente con los grandes mercados mundiales han hecho que la agricultura nacional sea potenciada y explotada de forma tal que mantenga su posición como uno de los pilares de la economía nacional (Molina Sevilla, 2018). Por otra parte debido al aumento de población a nivel mundial se generará un aumento en la demanda de alimentos, por lo que se prevé que Chile mantenga su posición como exportador (Molina Sevilla, 2018). Esta situación genera de igual forma un aumento en la demanda de fertilizantes utilizados comúnmente en las labores productivas, la cual se ve desde hace ya unos años y se espera que continúe en aumento con el pasar de los años.

Según estudios realizados por la Conaf en el año 2016, se determinó que aproximadamente 59.9 millones de hectáreas del terreno nacional se han visto afectadas por la degradación del suelo a partir de labores agrícolas, lo cual corresponde a un 79% del territorio explotable de Chile (Figura 1). Además, según cifras entregadas por el Centro de Información de Recursos Naturales (Ciren, 2021), el norte del país concentra un 90% de los suelos degradados, pero en la región del Maule se alcanzan niveles preocupantes de deterioro los cuales alcanzan un 60% de los terrenos de la región (Figuroa, 2021). Así mismo, una de las regiones de mayor producción agrícola en el país es la de Ñuble, la cual hoy en día se encuentra en una

posición intermedia respecto a su vecina mencionada anteriormente, teniendo niveles de desgaste inferiores en la mayor parte de su territorio y siendo estos a su vez recuperables mediante métodos de trabajo adecuados que busque el mejoramiento de los suelos y sus propiedades cita (Ciren, 2017).



Figura 1. Mapa de los niveles de degradación presentes en el territorio nacional. Fuente: Conaf.

La degradación de los suelos, además, ha generado un aumento en la demanda de fertilizantes, buscando el aumento en la productividad, que debido a la mala salud de estos resulta poco efectiva. Mientras que, la escasas de fuentes minerales para la producción de fertilizante (Zapata et al., 2005) han generado un aumento considerable en los valores de estos insumos en la agricultura (Figura 2), lo cual se ha vuelto una problemática tremenda debido a que los costos han ido en un constante aumento durante los últimos años, mientras que las ganancias han estado estancadas o intermitentes (años muy buenos y otros muy malos). Además, cabe destacar que durante los últimos años producto de la pandemia, los valores de este insumo han continuado en constante aumento (Figura 3) generando una preocupación alarmante en el sector agrícola nacional (Molina Sevilla, 2018).

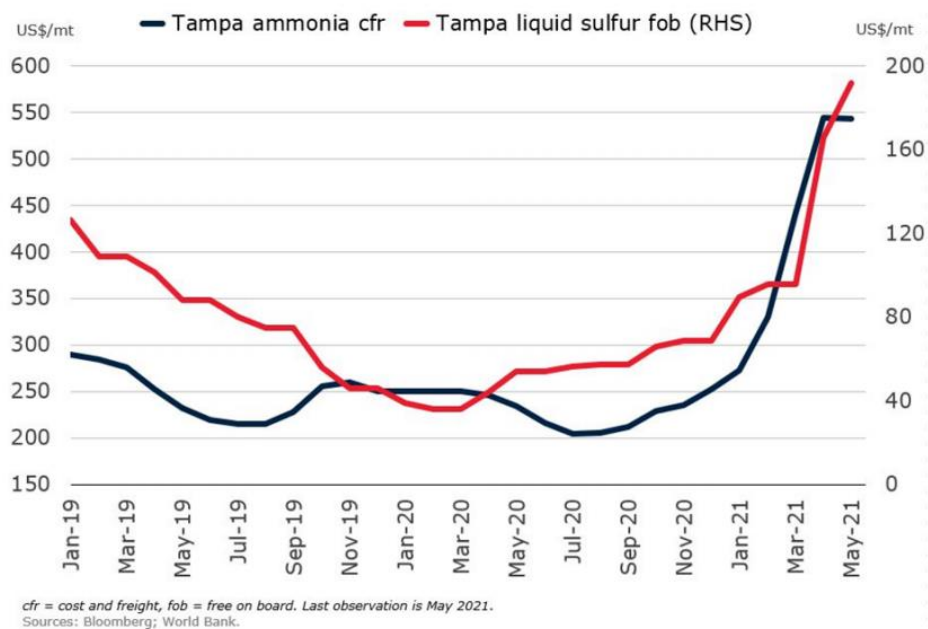


Figura 2. Variación en los costos de principales materias primas utilizadas para la producción de fertilizantes sintéticos. Fuente: Banco mundial (2021).

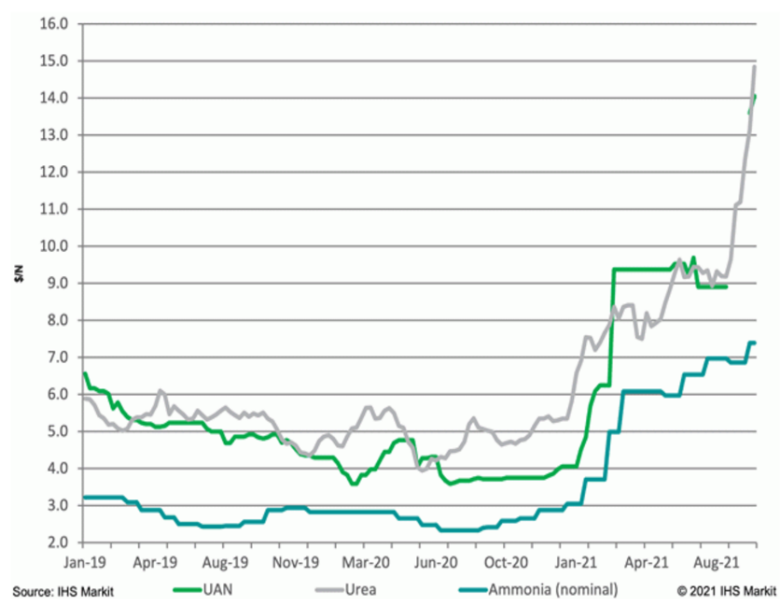


Figura 3. Variaciones en el valor (\$ por unidad de nitrógeno) de diferentes fertilizantes desde enero del 2019 hasta agosto del 2021. Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile.

Estudios indican que el uso de productos sintéticos para las fertilizaciones de predios agrícolas, genera cambios en la acidez del suelo (disminución de pH), lo que a su vez afecta la capacidad de intercambio de cationes (capacidad del suelo para retener nutrientes) y cargas eléctricas del suelo, demostrando que las constantes y prolongadas fertilizaciones con productos inorgánicos genera un gran desgaste de los suelos y su capacidad de retención de nutrientes, además del incremento de macronutrientes presentes en el suelo (Figuroa, 2021). Por otra parte, la diversidad de bacterias presentes en el suelo se ve disminuida debido a la acidificación de los suelos, principalmente la baja presencia de Firmicutes es preocupante, ya que demuestra un bajo contenido de materia orgánica en el medio, además se observó abundancia de Acidobacterias y Chloroflexy, lo que confirma el estado ácido del suelo y bajo contenido de materia orgánica (Salamat et al., 2021).

Esta disminución de las propiedades fisicoquímicas del suelo resulta en una problemática para la agricultura en todos los niveles de producción (Desde la agricultura familiar, hasta las grandes agrícolas nacionales), ya que la rentabilidad en los cultivos comienza a disminuir debido a la falta de nutrientes y de materia orgánica, que permite la mantención del “suelo vivo”, en el cual están presentes diversos microorganismos beneficiosos para el desarrollo radicular y la absorción de nutrientes que estas realizan.

Hoy en día el compostaje de desechos orgánicos se presenta como una alternativa para la reducción de costos en todos los niveles, ya sea productivos o domésticos. Los productos obtenidos de este proceso, además de generar una economía circular y generar una reducción de costos, resultan beneficiosos a nivel de suelos, dado que aumentan el contenido de materia orgánica presente en este y a su vez estimulan la biodiversidad de microbios que actúan en este medio y colaboran con las plantas en la absorción de nutrientes y crecimiento (Chen et al., 2021). En este mismo contexto, según archivos de la Biblioteca del Congreso nacional desde el año 2015 al 2019 el consumo de fertilizantes de origen animal o vegetal aumentó en más del doble (Tabla 1), por lo que se espera que esta tendencia de cambio en las fertilizaciones se mantenga en beneficio del territorio, el sector agrícola y la economía nacional.

Tabla 1. Evolución de las importaciones de fertilizantes de origen animal y vegetal desde el año 2015 hasta el 2019. Fuente: Biblioteca del congreso nacional de Chile.

	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Valor CIF (miles de USD)</b>	6210,4	8234,6	9534,1	10407,9	12533,3
<b>Volumen (miles de kg)</b>	3559,3	4655,6	5675,3	5718,1	7647
<b>Precio medio (USD/kg)</b>	1,74	1,77	1,68	1,82	1,64

El método tradicional para obtener un compost es mediante pilas aireadas, la cual consta de una pila o montón donde se van depositando desechos orgánicos, los cuales deben ser volteados cada cierto tiempo durante un periodo aproximado de 2 a 3 meses (Eddy, 2014) para finalmente obtener como producto final compost orgánico, con valores variables dependiendo de las materias primas utilizadas y siendo esta poco homogénea (Tabla 2).

A su vez existen métodos más sofisticados mediante los cuales se obtiene el compostaje a partir de un reactor (Tabla 2) el cual permite al usuario programar las condiciones deseadas, para así obtener un producto homogéneo y en tiempos bastante reducidos en comparación al método ortodoxo (Eddy, 2014). A su vez, este método permite el aprovechamiento máximo de las materias primas utilizadas para la producción del biofertilizante y se pueden establecer los parámetros que resulten más beneficiosos en la obtención de nutrientes en el compost (Al Mussa Ugak et al., 2022).

Por otra parte, actualmente existe la producción de BioCarbon (Tabla 2), el cual es un carbón de origen vegetal fabricado a partir de residuos vegetales, principalmente de la industria forestal y maderera, los cuales son introducidos en grandes hornos a temperaturas entre los 300 y 900°C, dependiendo de la materia prima que se utilizara (Shaaban et al., 2018). Este actúa como mejorador de suelos agrícolas, obteniendo grandes resultados, pero a su vez teniendo costos de producción muy elevados, siendo

inaplicable a la agricultura debido a los montos que esta maneja actualmente (Dickinson et al., 2015).

Por último, y de forma más sencilla las enmiendas orgánicas (Tabla 2) son practicas comúnmente utilizadas en la agricultura orgánica, las cuales consisten en la aplicación de materiales de origen animal o vegetal al suelo, con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas y/o químicas (Monsalve-C et al., 2017). Para mejoras de fertilidad comúnmente se utilizan estiércoles de diferentes animales y residuos vegetales como rastrojos de maíz o trigo.

Tabla 2. Fortalezas y debilidades de los diferentes tratamientos orgánicos para el suelo conocidos actualmente, elaboración propia.

Método	Definición	Fortalezas	Debilidades	Referencia
<b>Compostajes tradicionales</b>	Reutilización de desechos orgánicos mediante y obtener un producto rico en materia orgánica aplicable al suelo. Ej.- Vermicompostaje, compostaje en pilas aireadas, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baja inversión</li> <li>No requiere de monitoreos constantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procesos muy lento</li> <li>Utilización de grandes espacios</li> <li>Emite olores al ambiente</li> <li>Resultado poco homogéneo</li> <li>Depende de condiciones climáticas</li> </ul>	(Eddy, 2014)
<b>Compostaje en reactores</b>	Reutilización de desechos orgánicos mediante el compostaje en un reactor con parámetros de trabajo establecidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtención de un producto homogéneo</li> <li>Parámetros establecidos para la obtención de nutrientes esenciales</li> <li>Requiere de espacios reducidos</li> <li>Disminución en tiempos de producción</li> <li>Se aprovechan al máximo todo el proceso de compostaje</li> <li>No emite olores en su producción</li> <li>No se cierra a una sola materia prima</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inversión inicial alta para la adquisición e instalación de reactores que permitan el flujo de materia orgánica esperada</li> </ul>	(Al Mussa Ugak et al., 2022) (Eddy, 2014)
<b>Enmiendas orgánicas</b>	Aplicación de materias primas orgánicas directamente al suelo para mejorar las condiciones de este. Ej.- Guano de pollo crudo, mulch de paja de trigo, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fácil aplicación</li> <li>Utilización de materias primas sin procesado previo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baja disponibilidad de producto</li> <li>No entrega uniformidad de aplicación</li> <li>Dosis muy altas</li> </ul>	(Monsalve-C et al., 2017)
<b>BioCarbon</b>	Carbón vegetal obtenido de la quema de restos vegetales o biomasa, que es aplicado al suelo para mejorar sus propiedades	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reutiliza desechos de la industria forestal y maderera</li> <li>Ha tenido muy buenos resultados en la mejoría de las propiedades del suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Costos muy elevados para el funcionamiento de un horno a temperaturas muy altas</li> <li>Costos de producción muy altos</li> <li>Emisión de gases por quema de materia vegetal</li> </ul>	(Shaaban et al., 2018) (Dickinson et al., 2015)

## **2. HIPÓTESIS**

La utilización principalmente de estiércol equino como materia prima para la fabricación de compost en reactores, permite obtener un producto que cumple con los estándares de calidad que exige la norma chilena.

## **3. OBJETIVOS**

**3.1. Objetivo general:** Evaluar la operación de reactores de laboratorio para la obtención de compost a partir de estiércol equino con sustratos agrícolas.

**3.2. Objetivos específicos:**

- Analizar parámetros operacionales basados en revisión bibliográfica.
- Evaluar rangos operacionales de reactores basados en análisis bibliográficos.
- Análisis de diferentes porcentajes de mezcla de sustratos agrícolas para la obtención de compost que cumpla la normativa chilena.

#### 4. ANTECEDENTES GENERALES

En el contexto del compostaje y las materias primas, y considerando factores culturales y económicos de nuestro país, se detectó la oportunidad de explotar y reutilizar desechos generados en estos dos entornos. Culturalmente Chile posee una cantidad considerable de caballos de establo, específicamente de pura Raza Chilena (Cardenas, 2010), los cuales diariamente generan desechos (estiércol), siendo retirados y acumulados por los propietarios durante varios meses en un mismo lugar dentro del predio (Figura 4). Por otra parte, desde el punto de vista económico, el país cuenta con un desarrollo importante de la agroindustria, ya sea de fruta fresca, o bien de derivados de estos. Este sector económico genera una alta cantidad de residuos orgánicos durante todo el año, ya sea desechos de productos procesados, o bien la merma de frutas/verduras preservadas en cámaras de atmosfera controlada.



Figura 4. Montón acumulador de estiércol acumulado en un criadero de caballos de raza chilena en la comuna de Curicó.

A partir de lo ya mencionado, se observa una como una opción viable en la generación de una economía circular, el aprovechamiento de los residuos generados por los criadores de caballos de pura raza Chilena, y la agroindustria, utilizando los residuos generados por ambos sectores y revalorizarlos mediante un compostaje en conjunto en un biorreactor, bajo condiciones controladas, las cuales permitan la obtención de un biofertilizante competitivo y efectivo en la recuperación de materia orgánica del suelo y biodiversidad de bacterias presentes en este.

Generación de un biofertilizante en base al estiércol equino, específicamente de caballos de raza chilena, los cuales generan la materia prima y es de más fácil acceso en cuanto a su recolección, en conjunto a desechos generados por la agroindustria nacional, dentro de los cuales destaca la manzana, debido a sus largos periodos de conservación en cámaras de frío, generando mermas las cuales serán revalorizadas mediante un compostaje conjunto en reactores.

## 5. METODOLOGÍA

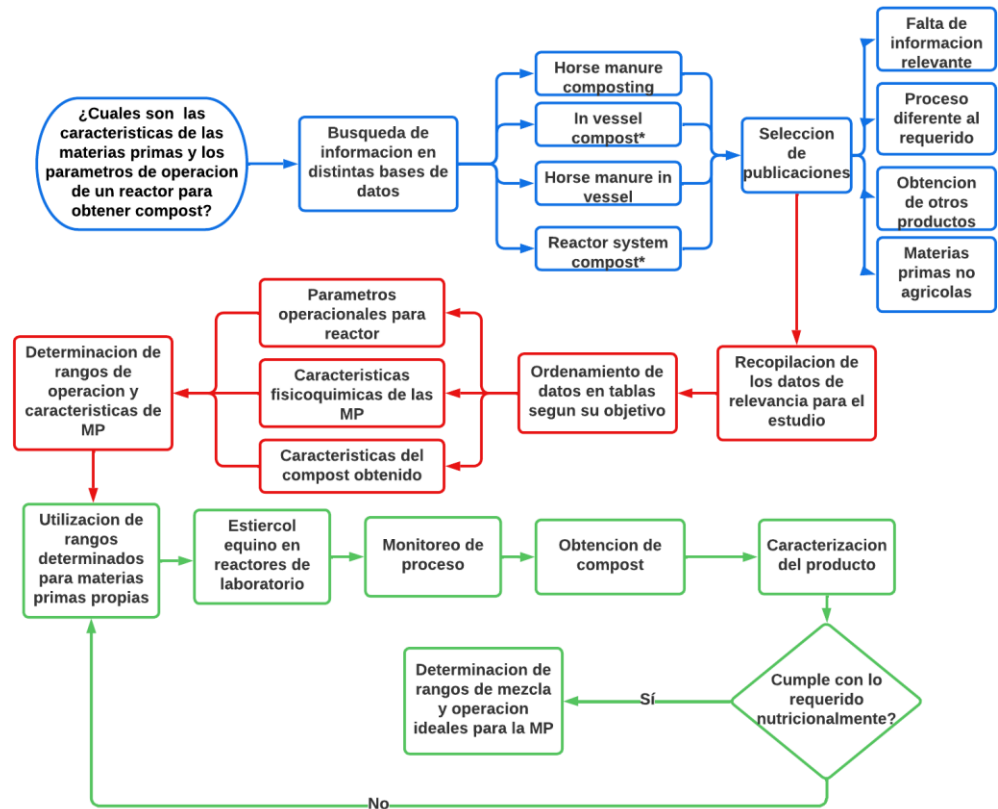


Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

Según se observa en la Figura 5, en primera instancia la investigación requiere de un levantamiento de información en el cual se seleccionarán archivos a partir de dos bases de datos principalmente, con el objetivo de recopilar documentos que contengan información relevante a los métodos que se utilizarán durante la etapa experimental, y como comparación para los resultados que se obtengan.

A partir de esta selección se organizarán los datos en tres tablas: caracterización de materias primas, parámetros de funcionamiento del reactor y caracterización de los compost obtenidos.

Estas tablas unirán los resultados de diferentes materias primas de origen agropecuario y las condiciones a las que fueron expuestas. Posteriormente serán analizadas, para determinar los rangos en los cuales se trabajará con la materia prima propia de este estudio y las condiciones a utilizar.

Los rangos que se determinaron bibliográficamente serán utilizados para las pruebas de laboratorio, buscando la obtención de compost que cumpla con los requerimientos nutricionales y características que la norma chilena exige:

- **Conductividad eléctrica**

Las distintas clases de compost deben cumplir con los requisitos de conductividad eléctrica siguientes:

Para el compost Clase A, la conductividad eléctrica debe ser menor o igual a 3 dS/m.

Para el compost Clase B, la conductividad eléctrica debe ser entre 3 dS/m y 8 dS/m.

- **Relación C/N**

Las distintas clases de compost deben cumplir con los requisitos de relación C/N siguientes:

Para el compost Clase A, la relación C/N debe ser entre 10 y 25.

Para el compost Clase B, la relación C/N debe ser entre 10 y 40.

- **pH**

El pH del compost debe estar comprendido entre 5,0 y 8,5.

- **Materia orgánica**

El compost debe tener un contenido de materia orgánica mayor o igual a 20%.

**Requisitos físicos:**

- **Olores**

El compost debe presentar olores característicos de este producto sin olores desagradables como, por ejemplo, compuestos sulfurosos, amoniacales, mercaptanos y/o de azufre reducido, entre otros.

- **Humedad**

El compost debe presentar un contenido de humedad entre 30 y 45% de la masa del producto, en base húmeda.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Análisis de parámetros bibliográficos

A partir de los recursos disponibles, entre los cuales se destacan las bases de datos que proporciona la universidad, se procedió con la búsqueda de información relacionada con el tema central de interés para esta investigación. Se utilizaron dos bases de datos principalmente, Web of Science y ScienceDirect, las cuales contienen contenido orientado a la ciencia y la innovación. Una vez seleccionadas las bases de datos con las cuales se trabajó se determinaron las palabras claves con las cuales se realizaría la búsqueda. La primera palabra clave que se decidió utilizar fue *Horse manure composting*, con la cual se obtuvieron 17 resultados de búsqueda para todos los años existentes, posteriormente se filtraron las publicaciones desde el año 2013 hasta el día de hoy, quedando 11 resultados, de los cuales solo 1 apuntaba directamente a la obtención de compost, pero por métodos tradicionales en pilas aireadas.

Por otra parte, al relacionar directamente el compostaje en reactores con el estiércol de caballo no se encontraron resultados disponibles. Se utilizaron las palabras *In vessel horse manure* y *Horse manure composting reactor*.

Debido a esto, es que para establecer o determinar rangos operacionales de los reactores se optó por revisar documentos en los cuales se trabajen materias primas de origen agrícola (residuos animales y/o vegetales) y de esa forma poner en contraste sus resultados en base al funcionamiento del

equipo. Para esto se utilizó la palabra clave *In vessel compost*, con la cual se obtuvieron 130 resultados. Se realizó una filtración de publicaciones, quedando solo las publicadas desde el año 2018 en adelante, quedando únicamente 28 resultados (Figura 6), de los cuales solo uno cumplía con los requisitos para su posterior análisis.

Posteriormente se utilizó como palabra de búsqueda *Reactor system compost\**, con la cual se obtuvieron 27 resultados (Figura 6), se encontraron dos artículos que fueron utilizados para este estudio, los cuales llevan por título *The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: benefits and limitations* y *Influence of aeration rate and reactor shape on the composting of poultry manure and sawdust*.

Los otros tres textos utilizados fueron obtenidos desde ScienceDirect utilizando las mismas palabras clave que en la otra base de datos, resultando un poco más extensa la búsqueda debido a que no es tan específico el filtro de búsqueda.

Finalmente, a partir de todas las búsquedas realizadas, utilizando los sistemas de filtrajes que permiten las bases de datos, se seleccionaron 7 publicaciones, las cuales cumplían con lo requerido para realizar un análisis de la información más completo. Estas publicaciones inicialmente debían trabajar el compostaje en reactores, utilizando materias primas de origen agropecuario (vegetal o animal), y entregando información referente a los parámetros operacionales de los equipos, caracterización de las materias

primas y los resultados obtenidos del proceso de descomposición de la materia orgánica.

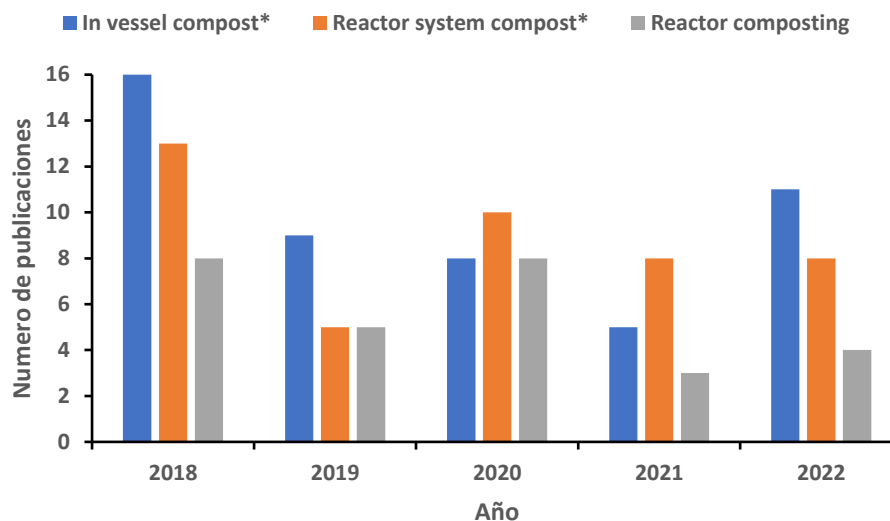


Figura 6. Cantidad de publicaciones encontradas por año dependiendo de la palabra clave utilizada. Fuente, Web of Science, elaboración propia.

La información obtenida desde las publicaciones revisadas fue ingresada en tablas en las cuales la información fue analizada y comparada, y si bien no todos los estudios contenían las mismas mediciones ni trabajaron de la misma manera, se buscó que estas fueran lo más completas posibles, para que el análisis fuera representativo y sirviera en la toma de decisiones para la parte experimental.

Esta información fue separada inicialmente en dos tablas, una que contiene los parámetros de funcionamiento que se utilizaron en los reactores (Tabla 4)

y otra que contiene la caracterización de las materias primas (Tabla 3) utilizadas en los diferentes estudios.

A partir de la información resumida en las tablas se calcularon promedios y desviación estándar, tanto para las caracterizaciones, como para los parámetros de operación de reactores. Dicha información se dispondrá en la Tabla 5 y la Tabla 6.

Tabla 3. Características de las materias primas utilizadas en las diferentes publicaciones analizadas.

Sustratos	Formato	Humedad %	pH -	Nitrógeno %	C:N	Materia orgánica %	Conductividad dS m <sup>-1</sup>	Referencia
<b>Pig manure ; Sawdust ; Ricehusk</b>	1000 PM : 25 SD : 15 RH	60,4	8	2,32	18,79	84,83	N/E	(Liu, 2019)
<b>Cattle manure (CM) ; Wheat straw(W.S) ; Broccoli wastes(BW)</b>	70 (CM) : 20 (WS) : 10 (BW)		7,468	1,351		74	4,73	
	60 (CM) :20 (WS) : 20 (BW)		7,16	1,55		68	5,418	
	50 (CM) : 20 (WS) : 30 (BW)	65	6,852	1,749	N/E	74,5	6,106	(Sonmez, 2012)
	40 (CM) : 20 (WS) : 40 (BW)		6,544	1,948		66	6,794	
	30 (CM) : 20 (WS) : 50 (BW)		6,236	2,147		63	7,482	
<b>Poultry manure (PM) ; Sawdust (S)</b>	R1 (Cilíndrico)		7,81				2,12	
	R2 (Cilíndrico)		7,8				2,13	
	R3 (Cilíndrico)	65	7,81	2,723	25	85	2,12	(Qasim, 2019)
	R4 (Rectangular)		7,79				2,11	
	R5 (Rectangular)		7,8				2,12	
	R6 (Rectangular)		7,79				2,13	
<b>Chicken waste (CW) : Paddy husk (PH) : Tea waste (TW) : Cow dung (CD)</b>	0,34 (CW) : 0,26 (PH) : 0,26 (TW) : 0,14 (CD)	70	6,8	N/E	25	87,62	N/E	(Kokilan, 2022)
<b>Maize (M) : Slaughter waste (W) : Fodder yeast (Y) : Post cellulose lime (L)</b>	1 (M) : 0.15 (W) 1 (M) : 0.15 (W) : 0,1 (Y) 1 (M) : 0.15 (W) : 0,3 (Y) 1 (M) : 0.15 (W) : 1 (L)	60	N/E	1,187 1,806 3,045 1,896	N/E	N/E	N/E	(Kopec, 2016)
<b>Chicken manure (CM) : Sawdust y wood shaving (SW)</b>	1 (CM) : 1 (SW)	65	7,8	N/E	25	85,1	2,12	(Qasim, 2018)
<b>Hanwoo manure (HM) : Sawdust (SD)</b>	2 (HM) : 1 (SD)	65	8,59 7,35	1,31 1,39	31,15 33,7	N/E	0,249 0,205	(Jeong, 2017)

\*N/E: no especificado

Toda la información dispuesta en la Tabla 3 fue estandarizada a la unidad de medida correspondiente al parámetro medido, algunos de estos fueron calculados a partir de información disponible dentro de los documentos, como por ejemplo el contenido de materia orgánica, que entregaban la información respecto a la pérdida que sufría la materia prima y el contenido del compost, o la relación carbono nitrógeno que en algunos casos se entregaban sus valores por separado.

A partir de los datos agrupados se obtuvo el promedio de cada uno de estos parámetros y la desviación estándar para cada uno de ellos, resultando en un rango aproximado para los datos que se deberían obtener para las materias primas propias.

Tabla 4. Parámetros operacionales de los reactores de los diferentes estudios.

Sustratos	Formato	Tiempo días	Volumen L	Temperatura inicial C	Flujo de aire L/min*kg	Agitación	Referencia	
<b>Pig manure ; Sawdust ; Ricehusk</b>	8000:200:120	10	40000	59	75	Sistema de volteo horizontal automático cada 2 horas	(Liu, 2019)	
<b>Cattle manure (CM) ; Wheat straw(WS) ; Broccoli wastes(BW)</b>	70 (CM) : 20 (WS) : 10 (BW)	21	127	40	0,296	N/E	(Sonmez, 2012)	
	60 (CM) : 20 (WS) : 20 (BW)				0,272			
	50 (CM) : 20 (WS) : 30 (BW)				0,298			
	40 (CM) : 20 (WS) : 40 (BW)				0,264			
	30 (CM) : 20 (WS) : 50 (BW)				0,252			
<b>Poultry manure (PM) ; Sawdust (S) (Mezcla homogénea hecha previamente)</b>	R1 (Cilíndrico)	21	60	25	0,105	Agitación cte. con eje rotatorio central con espadas	(Qasim, 2019)	
	R2 (Cilíndrico)				0,21			
	R3 (Cilíndrico)				0,315			
	R4 (Rectangular)				0,105			
	R5 (Rectangular)				0,21			
	R6 (Rectangular)				0,315			
<b>Chicken waste (CW) ; Paddy husk (PH) ; Tea waste (TW) ; Cow dung (CD)</b>	0,34 (CW) : 0,26 (PH) : 0,26 (TW) : 0,14 (CD)	40	15,88	N/E	N/E	N/E	(Kokilan, 2022)	
	<b>AEROBICO</b>							0,34 (CW) : 0,26 (PH) : 0,26 (TW) : 0,14 (CD)
	<b>ANAEROBICO</b>							0,34 (CW) : 0,26 (PH) : 0,26 (TW) : 0,14 (CD)
								9
<b>Maize (M) ; Slaughter waste (W) ; Fodder yeast (Y) ; Post cellulose lime (L)</b>	1 (M) : 0,15 (W)	110	N/E	N/E	0,25	Rotada manualmente una vez a la semana	(Kopec, 2016)	
	1 (M) : 0,15 (W) : 0,1 (Y)							
	1 (M) : 0,15 (W) : 0,3 (Y)							
	1 (M) : 0,15 (W) : 1 (L)							
<b>Chicken manure (CM) ; Sawdust y wood shaving (SW)</b>	1 (CM) : 1 (SW)	30	60	25	0,21	Agitación cte. con eje rotatorio central con espadas	(Qasim, 2018)	
					0,43			
					0,64			
<b>Hanwoo manure (HM) ; Sawdust (SD)</b>	2 (HM) : 1 (SD)	42	100	30	0,1	Volteo semanal no especificado	(Jeong, 2017)	
								42

N/E: no especificado

En la Tabla 4 se dispusieron algunos parámetros referentes al reactor, y el tiempo que le tomo a estos completar el proceso de compostaje. Para el caso particular de los flujos de aire, estos fueron estandarizados a una cantidad de litros por minuto dependiendo de la masa que contenga el equipo.

Tabla 5. Rangos obtenidos a partir de los promedios y desviación estándar de las características de las materias primas de diferentes estudios, comparándolos con los parámetros que debe cumplir el compost.

	Humedad	pH	Nitrógeno	C:N	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m <sup>-1</sup>
<b>Promedio</b>	64,33±3,37	7,56±0,61	1,94±0,56	26,45±5,28	76,45±9,45	3,32±2,36
<b>Norma chilena</b>	30-45	5-8.5	≥0,5	≤25	≥20	≤3

A partir de lo que se observa en la Tabla 5 se determinaron rangos de operación para los reactores de laboratorio que se utilizaran para la obtención de compost a partir de estiércol equino. Algunos de estos afectan directamente la forma en la cual se realizará el proceso, como lo es el caso de la humedad de la materia prima, la cual permite la activación de las bacterias degradadoras de materia orgánica, y que en ambientes con escasas de humedad no pueden desarrollarse, o lo hacen con más dificultades. Como se observa la humedad debe fluctuar entre valores superiores al 60%, y no debe superar el 70% (inicialmente). Por otra parte, se observa que la relación carbono nitrógeno debe ser cercana al 25%, y se

debe considerar que debido al proceso este valor disminuya para así cumplir con lo exigido por la norma chilena.

Por otra parte, en la misma Tabla 5 se observa como el contenido de nitrógeno promedio de las materias primas y el contenido de materia orgánica inicial supera enormemente lo exigido por la norma chilena, el cual se ve disminuido debido al proceso de descomposición y el consumo de este por parte de los microorganismos.

Tabla 6. Rangos de operación promedio obtenidos de los parámetros de trabajo reactores de diferentes estudios.

	Tiempo días	Temperatura inicial C	Flujo de aire L/min*kg	Agitación
<b>Rango</b>	29,4±12,6	34,8±19,5	0,27±0,14	Agitación manual cada dos días en la etapa de laboratorio

En cuanto a los rangos de operación que se estiman en la Tabla 6 se observa que el flujo de aire promedio que se estima es de 0.27 L min<sup>-1</sup> por unidad de masa (kg). La temperatura en la mayoría de los casos comenzó con un valor fluctuante entre los 25 y 55° Celsius aproximadamente, lo que indica que las materias primas estaban expuestas a las temperaturas de un ambiente de verano.

Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de estiércol equino, obtenido de un criadero en la comuna de Curicó.

Humedad	Contenido materia orgánica	pH	Conductividad eléctrica
%	%	-	dS m-1
44,7	81,0	7,91	4,9
42,4	86,6	7,98	4,8
42,3	86,3	8,18	5,9
63,5	85,3	8,28	2,9
54,7	84,5	8,58	3,5
54,7	84,6	8,12	3,5

Tabla 8. Rango de las características fisicoquímica de estiércol equino obtenido de un criadero en la comuna de Curicó, versus lo analizado y las características exigidas por norma.

	Nitrógeno	C:N	Humedad	pH	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m-1
<b>Promedio experimental</b>	1,9±0,56	26,4±5,28	50,4±8,62	8,2±0,24	84,7±2,01	4,2±1,13
<b>Promedio bibliográfico</b>	0,62±0,01	14,48±1,35	64,3±3,37	7,5±0,61	76,45±9,45	3,3±2,36
<b>Norma chilena</b>	≥0,5	≤25	30-45	5-8.5	≥20	≤3

En la Tabla 7 se observan los valores obtenidos de la medición de humedad (Figura 8), pH, materia orgánica y conductividad eléctrica de diferentes muestras de estiércol equino, extraídas de un criadero de la comuna de Curicó (Figura 7), mientras que en la Tabla 8 se observan los rangos que se obtuvieron a partir de tales resultados, poniéndolos en comparativa con los rangos obtenidos desde la bibliografía (Tabla 5) y los valores establecidos

por la norma chilena 2880 a los cuales se espera llegar una vez finalizado el proceso de compostaje.



Figura 7. Extracción de materia prima a partir de un punto de acumulación de estiércol equino en un criadero ubicado en la comuna de Curicó.

Al observar la humedad (Tabla 8) de la caracterización realizada se aprecia que esta es inferior al promedio bibliográfico, por otra parte, la norma establece que los compost deben encontrarse entre un 30 y un 45% de humedad para cumplir con la normativa, dicho valor es claramente inferior a ambas caracterizaciones, y esto se debe a que las bacterias requieren de humedad para realizar su proceso, en el cual van consumiendo el agua disponible en las materias primas, y por lo tanto disminuyendo este valor

para el final del proceso. Debido a esto es que se añadió agua a la materia prima, buscando igualar el valor promedio obtenido desde la bibliografía (70%) y de esta manera tener un medio óptimo para el desarrollo de las labores de las bacterias.



Figura 8. Termobalanza utilizada para la medición de humedad de las muestras de estiércol equino.

El pH de las muestras de estiércol equino es superior al rango que se obtuvo bibliográficamente, sin embargo, se encuentra dentro de los valores que exige la norma, y se debe considerar que el proceso de descomposición tiende a reducir el valor de pH de estos.

En cuanto al contenido de materia orgánica del estiércol equino se puede observar que este es superior al rango que se obtuvo a partir del análisis bibliográfico, lo cual es beneficioso, ya que los microorganismos que actúan

en el proceso de compostaje utilizan este como alimento para el desarrollo de sus labores. Debido a esto es que el contenido de materia orgánica resultante posterior al proceso será un claro indicador de si las bacterias actuaron correctamente o no. Además, cabe destacar que el contenido de materia orgánica no deberá ser inferior a un 20% para poder cumplir con los estándares exigidos por la norma.

Por último, la conductividad eléctrica obtenida experimentalmente es superior al rango bibliográfico, y se encuentra por sobre lo exigido en la norma chilena de compostajes. Sin embargo, el proceso tiende a disminuir este valor mediante la acción de los microorganismos. Este parámetro será un factor de observación importante para el compost terminado, y un determinante de calidad de este.

Posterior a la caracterización de las materias primas se comenzó la preparación del proceso de compostaje, en donde se utilizaron reactores de laboratorio hechos de vidrio (Figura 9A) para la realización del proceso. En estos se introdujo la materia prima bajo diferentes condiciones, se expusieron a la temperatura ambiente y se agitaron por 30 segundos en el sentido horario cada dos días. Además, la temperatura interna de estos reactores fue medida diariamente (Figura 9B), buscando observar el cambio de etapa en el proceso de compostaje y obtener un perfil de temperatura de cada una de las pruebas. Los procesos tuvieron un máximo de duración de

22 días, pensando en tener un proceso acelerado y posteriormente se caracterizaron los resultados obtenidos para concluir en base a ellos.

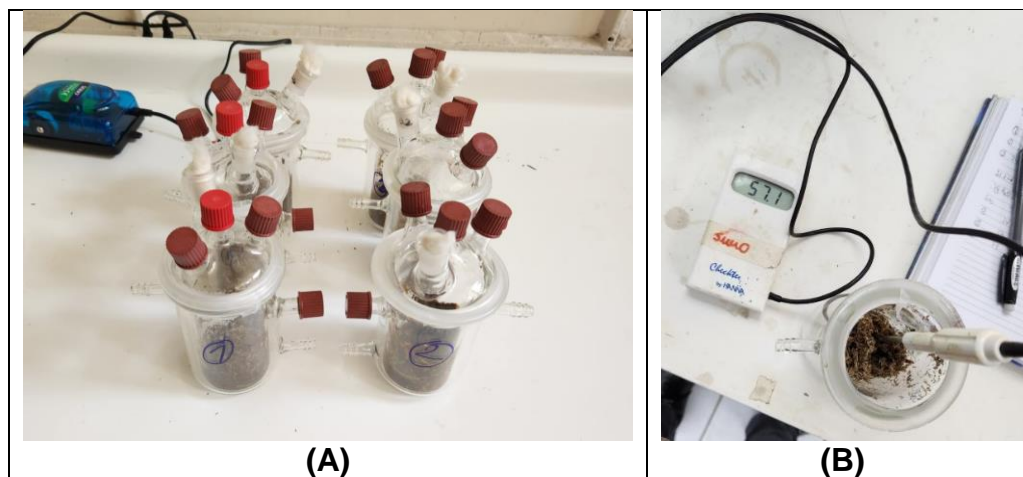


Figura 9. Reactores a escala laboratorio utilizados para el proceso de compostaje (A) y medición de temperatura mediante la utilización de termocupla de laboratorio (B).

## 6.2. Análisis en laboratorio

### 6.2.1. Estiércol puro al 70% de humedad

Este experimento se realizó en duplicado, utilizando dos reactores de vidrio tamaño laboratorio, los cuales fueron rellenos con aproximadamente 30 gramos de estiércol de caballo previamente “molido” con la ayuda de las pinzas de laboratorio. A esta se le incorporaron 20 mL de agua destilada, para alcanzar una humedad del 70%. Los reactores fueron sellados con Parafilm y se dejó una salida de aire a la cual se le incorporo un filtro de algodón. Los reactores fueron expuestos al ambiente y monitoreados diariamente, en donde se media la temperatura interna de la materia prima utilizada y se revolvía la mezcla.

## Evolución de las temperaturas

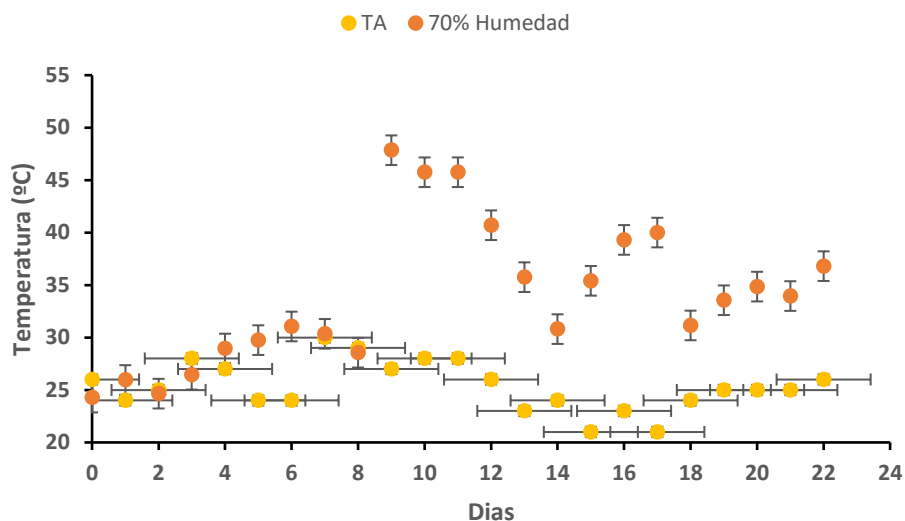


Figura 10. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de dos muestras de estiércol equino puro, comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)

A partir de la Figura 10 se puede observar un aumento considerable de la temperatura en el 10 día de compostaje, alcanzando un valor cercano a los 50°C, sin embargo se hubiera esperado que esta se mantuviera dentro de estos valores por un tiempo más prolongado, o continuar su aumento, para posteriormente estabilizarse, ya que se requiere de entre dos y tres días a una temperatura sobre los 55°C para eliminar los patógenos existentes en las materias primas (Qasim, 2018). Además del corto periodo de sanitización, se sufrió una brusca caída en la temperatura en el décimo cuarto día, continuando con valores fluctuantes, y por lo tanto no aportando al proceso de compostaje.

## Presencia de coliformes fecales

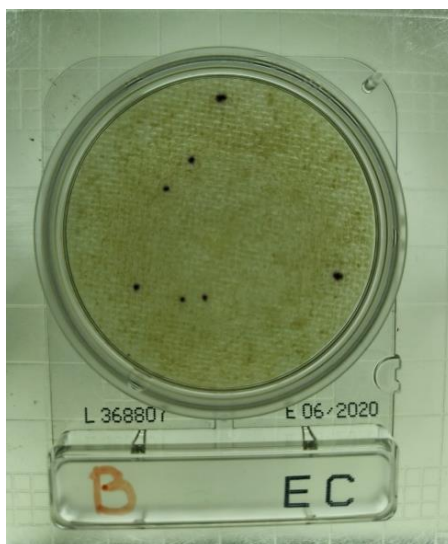


Figura 11. Placa compact dry de coliformes fecales hecha a un compost de estiércol equino puro con 70% de humedad

Se realizaron dos mediciones de coliformes fecales a los dos experimentos con un 70% de humedad expuestos a la temperatura ambiente, mediante la utilización de placas compact dry de forma directa, es decir no existió una dilución de las muestras medidas.

En el compact dry mostrada en la Figura 11 se presentaron únicamente 7 colonias de *Escherichia coli*, visualizando que existió una eliminación de patógenos durante el proceso de compostaje. Sin embargo, dicho experimento no alcanzó temperaturas superiores a los 55°C, como se observa en la Figura 10, por lo que su etapa termofílica no fue completada y explicando de esa forma el por qué no se eliminaron completamente los patógenos del compost (Qasim, 2019).

## Características y nutrientes

Tabla 9. Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de estiércol equino con 70% de humedad, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.

	Nitrógeno	C:N	Humedad	pH	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m <sup>-1</sup>
<b>PT</b>	1,88±0,56	26,44±5,28	64,38±3,37	7,54±0,61	76,45±9,45	3,33±2,36
<b>PE</b>	0,62±0,01	14,48±1,35	50,42±8,62	8,23±0,24	84,79±2,01	4,24±1,13
<b>RCT</b>	2,68±1,24	17,53±5,76	56,78±13,92	7,57±0,76	63,99±12,13	4,57±4,87
<b>RCE</b>	0,65±0,04	12,45±0,65	59,67±7,52	7,96±0,27	84,72±1,64	3,63±1,57
<b>Norma chilena</b>	≥0,5	≤25	30-45	5-8.5	≥20	≤3

\***PT**: promedio teórico; **PE**: promedio experimental; **RCT**: resultados compostajes teóricos; **RCE**: resultados compostajes experimentales

Al poner en contraste tanto los rangos obtenidos teóricamente (de caracterización de la materia prima y el compost) desde diferentes estudios, se observa que la tendencia que se tenía bibliográficamente en el caso del nitrógeno es a aumentar, en donde el valor promedio que se poseían las materias primas con las que se trabajó aumento posterior al compostaje en aproximadamente un 0.8%. Esta situación se repite en menor dimensión en el caso experimental, en el cual se aumentó el contenido de nitrógeno posterior al compostaje en un 0.03%, que a pesar de ser bastante inferior que el aumento que se tuvo teóricamente, corrobora que posterior al proceso de compostaje se logra incrementar el contenido de este nutriente, además del carbono (Jeong, 2017), el cual manifiesta tal disminución con la baja de 14.48 a 12.45 en la relación carbono-nitrógeno. Por otra parte, los resultados

obtenidos en cuanto al contenido de nitrógeno y la C:N cumplen con los requerimientos de la norma chilena de compostaje (Tabla 9).

Si bien en la Tabla 9 se observa que el contenido de humedad experimental aumento, se debe tener en cuenta que la humedad inicial se homogenizo al 70% para efectos de este experimento y que la mezcla iba siendo humectada cada cierto tiempo, buscando mantener activas las bacterias que actúan en el proceso. Este parámetro en particular puede ser manejado una vez ya finalizado el proceso de compostaje y ajustarlo para cumplir con la norma, ya que dentro del proceso mismo no se le puede privar de humedad a la mezcla a compostar, buscando tener una actividad microbiana optima (Qasim, 2019).

Teóricamente los valores del pH debieron mantenerse estables, o con valores cercanos al que poseía la materia prima en un comienzo, sin embargo, en la prueba experimental se observó una disminución de pH desde 8.23 a 7.96, que para este parámetro en particular es significativo, más aun teniendo en cuenta el rango que la norma chilena exige para este.

Por último, para el caso de la CE se observa que todos los valores, tanto teóricos, como experimentales están por sobre la norma chilena de compostajes, por lo que se deberá corregir este para poder cumplir con lo exigido. Sin embargo, el valor resultante del compostaje de este estudio es ligeramente más alto que lo que se exige, y se observa una reducción desde la caracterización inicial a este punto, por lo cual podría ser ajustado

mediante algún manejo del proceso, disminuyendo los excesos de salinidad en este y evitando problemas de fitotoxicidad por la aplicación del compost al suelo (Qasim, 2018).

### 6.2.2. Estiércol puro con diferentes contenidos de humedad

Se extrajeron tres muestras de estiércol equino, a las cuales se les aumento su humedad a un 60, 65 y 70%, para observar si este parámetro afectaba en algo al proceso de compostaje en alguna de sus condiciones. La materia prima fue molida y disminuida a partes más pequeñas, dado que el estiércol de caballo entero o fresco son de forma ovalada o esféricas, por lo que se destruyeron previo al ingreso al reactor. Por otra parte, a partir de la caracterización que se le hizo a la materia prima se calculó la cantidad de agua destilada que se debió agregar a cada uno de los ensayos. La temperatura fue medida diariamente y se agito cada dos días manualmente.

Evolución de las temperaturas

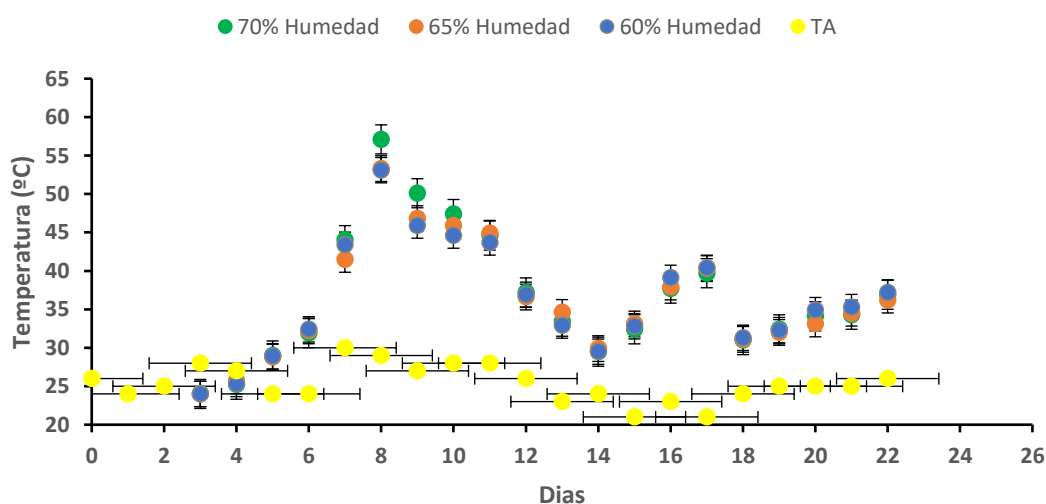


Figura 12. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de 3 muestras de estiércol equino puro, comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)

Como se puede observar en la Figura 12 los tres ensayos inician en exactamente la misma temperatura, en donde al cuarto día cada uno de ellos alcanza su peak, quedando a la vista claras diferencias entre cada una de ellas, siendo el reactor que posee un 70% de humedad el que alcanza la temperatura, seguido por el que contiene un 65% de humedad y por último el de 60%, lo cual indica que el contenido de humedad en la mezcla a compostar es importante para el aumento y mantención de las temperaturas, las cuales a su vez son de suma importancia para la eliminación de microorganismos patógenos del compost (Qasim, 2018) y a su vez para el desarrollo de la actividad microbiana (Qasim, 2019).

### Presencia de coliformes fecales

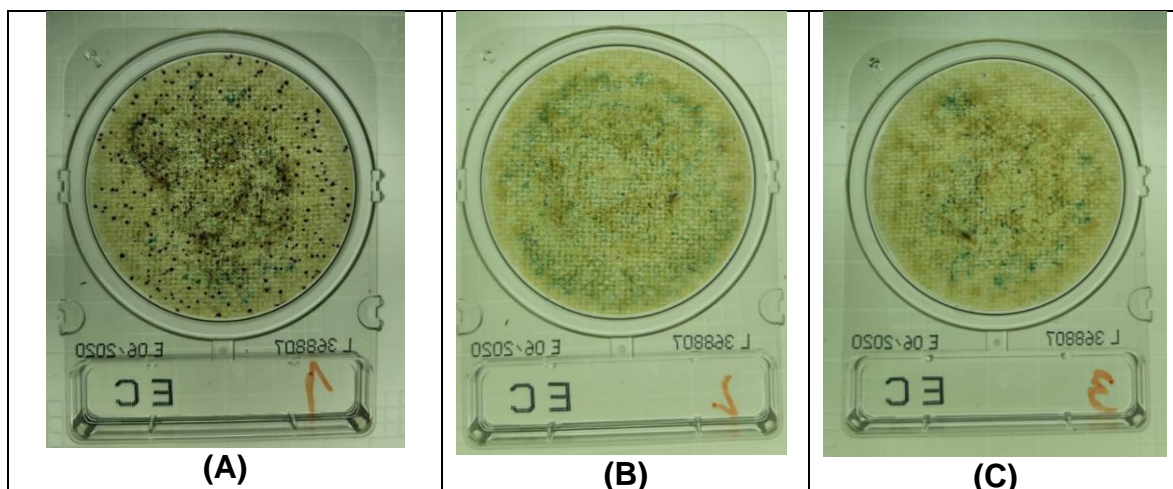


Figura 13. Placas compact dry de coliformes fecales hechas a tres reactores de estiércol puro, con humedades iniciales de 70% (A), 65% (B) y 60% (C).

En la Figura 13, se puede observar como en las 3 placas se presenta una alfombra microbiana, la cual indica una alta presencia de patógenos en el compost, siendo la placa de la Figura 13A, la que presenta estos de forma más clara, con una alta apreciación de *Escherichia coli* (puntos o manchas purpura). La gran cantidad de microorganismos que se observan en la placa indica una baja eliminación de patógenos, los cuales en su gran mayoría son eliminados en la etapa termofílica (Qasim, 2019), donde las temperaturas son superiores a los 55°C y se mantienen durante un periodo de dos o tres días en procesos acelerados en reactores.

## Características y nutrientes

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de estiércol equino con 70, 65 y 60% de humedad, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.

	Nitrógeno	C:N	Humedad	pH	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m <sup>-1</sup>
<b>PT</b>	1,88±0,56	26,44±5,28	64,38±3,37	7,54±0,61	76,45±9,45	3,33±2,36
<b>PE</b>	0,62±0,01	14,48±1,35	50,42±8,62	8,23±0,24	84,79±2,01	4,24±1,13
<b>RCT</b>	2,68±1,24	17,53±5,76	56,78±13,92	7,57±0,76	63,99±12,13	4,57±4,87
<b>RCE</b>	0,30±0,03	33,96±2,25	49,35±0,66	9,24±0,08	82,69±1,99	2,24±0,016
<b>Norma chilena</b>	≥0,5	≤25	30-45	5-8.5	≥20	≤3

\***PT**: promedio teórico; **PE**: promedio experimental; **RCT**: resultados compostajes teóricos; **RCE**: resultados compostajes experimentales

Para este ensayo y según la caracterización realizada al compost se encontraron bastantes deficiencias, partiendo por el contenido de nitrógeno, que además de haberse reducido en más de un 50% en comparación a la caracterización inicial de la materia prima, tampoco cumple con lo establecido por la norma, que exige un contenido de nitrógeno superior al 0.5%. En esta misma línea se presenta un aumento considerable de la relación carbono nitrógeno a más del doble de lo que se presenta inicialmente, y superando los límites establecidos por la norma chilena. Estos resultados no muestran ninguna concordancia con los análisis teóricos realizados previamente, en donde los contenidos de nitrógeno tienden a aumentar y en esa misma línea disminuir la relación carbono nitrógeno del compost.

El pH final del compost se encuentra por sobre los márgenes establecidos y además aumento en 1.7 su valor en comparación a lo contenido inicialmente. Este aumento de pH se debe a la disminución de nitrógeno que se sufrió, en donde los residuos orgánicos que contenían este nutriente se descompusieron, provocando una reacción en los aminoácidos presentes, formando amonio y por lo tanto elevando los valores del pH del compost (Kokilan, 2022).

Por último, la conductividad eléctrica sufrió una disminución en comparación al valor inicial que poseía la materia prima. De esta manera la conductividad del compost cumple de forma satisfactoria la norma chilena al tener un valor inferior a  $3 \text{ dS m}^{-1}$ .

### 6.2.3. Mezcla de estiércol equino con cerezas

Se realizó una mezcla de estiércol equino con cerezas desechadas por la planta piloto de la Universidad de Concepción, campus Chillan. Estos desechos fueron trasladados desde la planta piloto al laboratorio utilizado bolsas con cierre hermético, posteriormente se les quito el carozo y fueron molidas con una trituradora (mini pimper). Esta “pasta de cereza” se mezcló con el estiércol equino ya molido en dos proporciones diferentes, realizándose una prueba en triplicado para cada una de ellas.

#### 6.2.3.1. 60% estiércol – 40% cerezas

Evolución de las temperaturas

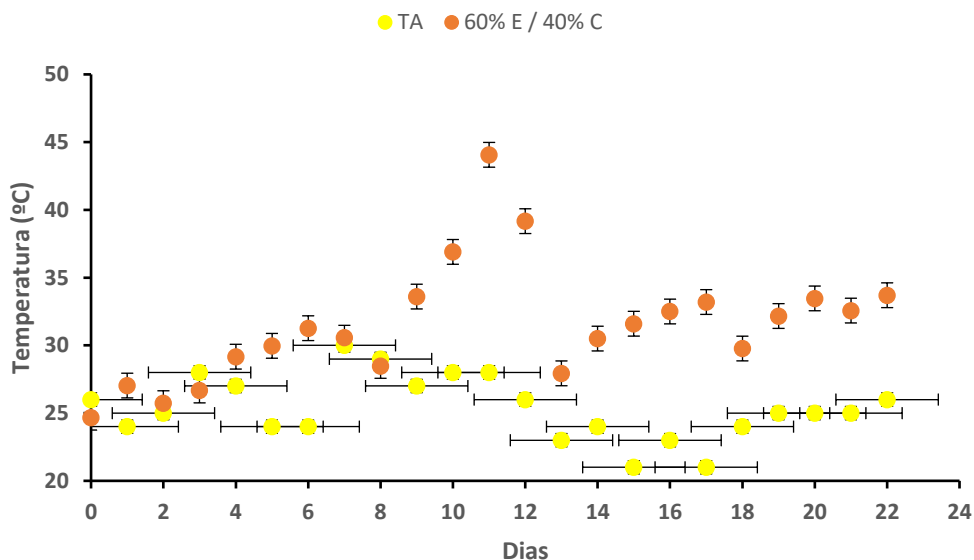


Figura 14. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de tres muestras de estiércol equino y cerezas (3:2), comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)

En la Figura 14 se observa un perfil de temperatura el cual no logra superar los 45°C, ni mantenerse en valores elevados por un periodo de tiempo considerable, lo cual indicaría una falta de eliminación de patógenos y la no finalización de etapas de compostaje. Además, posterior a llegar al punto más elevado, se sufre una baja abrupta de esta, lo cual indica una baja actividad microbiana en la degradación de materia orgánica y carbono contenido por las materias primas (Qasim, 2019) .

#### Presencia de coliformes fecales

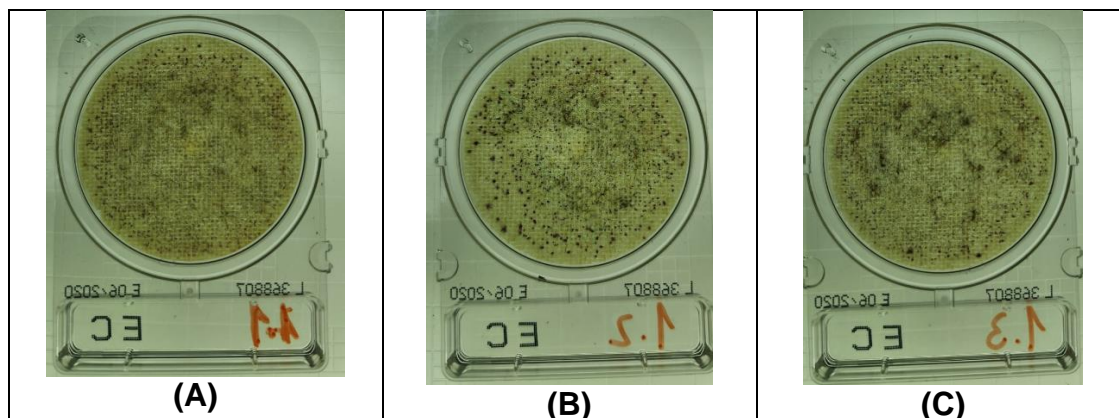


Figura 15. Placas compact dry de coliformes fecales realizadas a un compost hecho de 60% estiércol equino y un 40% de cerezas, correspondientes a los reactores 1.1 (A), 1.2 (B) y 1.3 (C).

En las Figura 15, se observa una clara presencia de patógenos, las cuales alcanzan a formar una alfombra microbiana y siendo casi incontables la cantidad de colonias existentes en la muestra. De esta forma se corrobora lo observado en la Figura 14, en donde las temperaturas alcanzadas por las muestras no son las óptimas para lograr destruir microorganismos patógenos.

## Características y nutrientes

Tabla 11. Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de una mezcla de 60% estiércol con 40% de cerezas, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.

	Nitrógeno	C:N	Humedad	pH	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m <sup>-1</sup>
<b>PT</b>	1,88±0,56	26,44±5,28	64,38±3,37	7,54±0,61	76,45±9,45	3,33±2,36
<b>PE</b>	0,71±0,01	20,84±3,44	58,24±5,14	7,23±0,68	87,62±1,37	3,42±0,75
<b>RCT</b>	2,68±1,24	17,53±5,76	56,78±13,92	7,57±0,76	63,99±12,13	4,57±4,87
<b>RCE</b>	0,21±0,01	47,17±5,86	58,25±4,39	10,39±0,09	82,80±1,83	2,33±0,40
<b>Norma chilena</b>	≥0,5	≤25	30-45	5-8.5	≥20	≤3

\***PT**: promedio teórico; **PE**: promedio experimental; **RCT**: resultados compostajes teóricos; **RCE**: resultados compostajes experimentales

La caracterización realizada para esta mezcla solo cumple con un parámetro de los establecidos, como se puede observar en la Tabla 11, el cual corresponde a la conductividad eléctrica de esta, estando 0.67 dS m<sup>-1</sup> por debajo del límite establecido. Además para este mismo parámetro se observa una disminución considerable desde el valor inicial de la mezcla en su conductividad al final, por lo cual se considera como una evolución positiva de este.

El aumento excesivo del pH (de 7.23 a 10.39) en la caracterización del compost se puede atribuir principalmente a la mineralización de nitrógeno ocurrida, la cual disminuyó en un 0.5%, y quedando fuera del límite que establece la norma chilena.

Por otra parte, si bien se mostró una disminución de materia orgánica, la cual es consumida por los microorganismos encargados del proceso de compostaje, esta fue bastante baja para lo que se esperaría en este tipo de procesos. Además, si se observa la evolución de los rangos teóricos para este parámetro se ve que disminuyó en más de un 10%, mientras que el experimental no alcanzó a disminuir un 5% el contenido de materia orgánica, lo cual nos indica que la degradación y respiración microbiana no fueron las más efectivas y/o eficientes (Qasim, 2019).

### 6.2.3.2. 50% estiércol – 50% cerezas

Evolución de las temperaturas

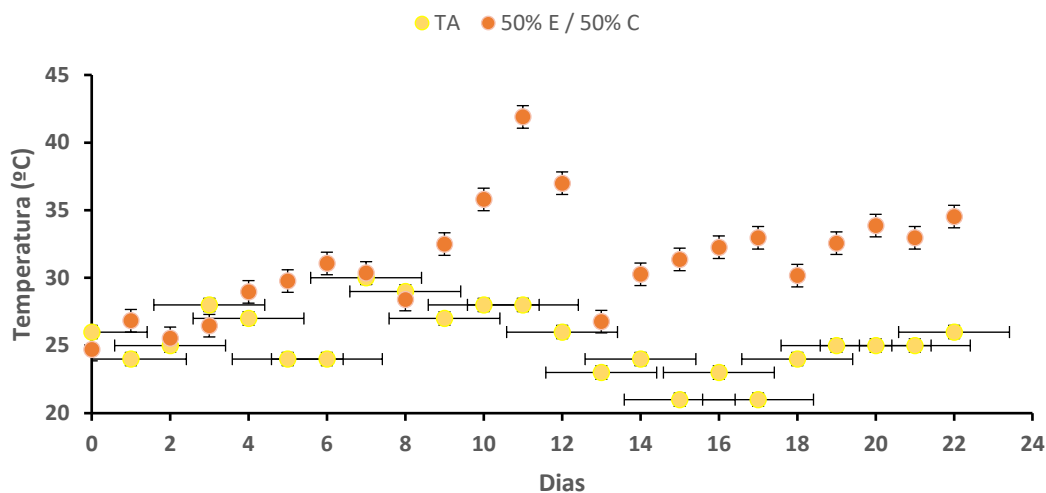


Figura 16. Evolución de temperatura del proceso de compostaje en reactores, de tres muestras de estiércol equino y cerezas (1:1), comparada con la temperatura promedio diaria en la ciudad de Chillan (MeteoRed, n.d.)

Al comparar el perfil de temperatura de la mezcla 60/40 de la Figura 14 y la de la Figura 16 con una mezcla 50% estiércol equino y 50% cerezas se observa que el comportamiento de estas es bastante similar, teniendo su peak de temperatura en el mismo día y sufriendo cambios casi iguales, por no decir idénticos dentro del periodo de compostaje.

### Presencia de coliformes fecales

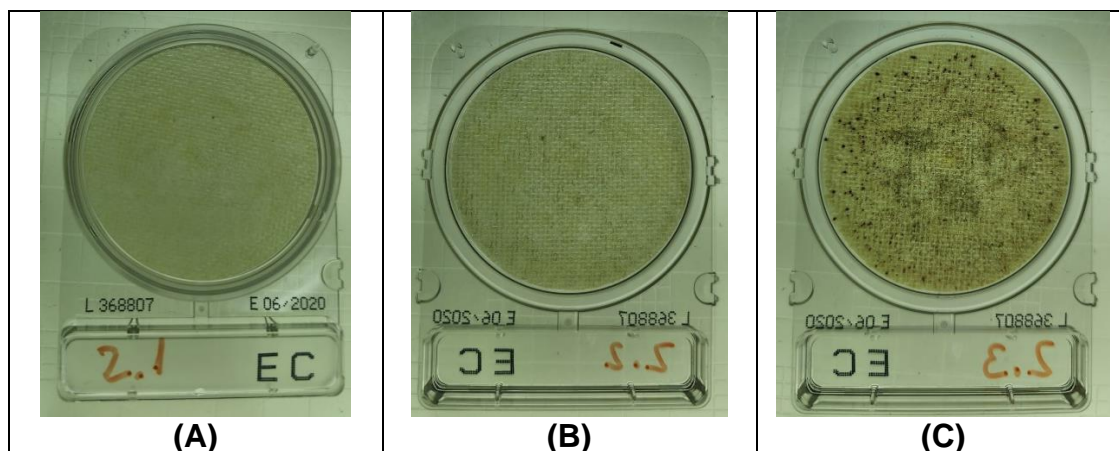


Figura 17. Placas compact dry de coliformes fecales de un compost hecho de 50% estiércol equino y 50% de cerezas, correspondiente a los reactores 2.1 (A), 2.2 (B) y 2.3 (C).

Sin embargo, a pesar de que el comportamiento de las temperaturas de ambas mezclas fue prácticamente igual se obtuvieron diferencias bastante marcadas entre ellas, las cuales están relacionadas principalmente con la presencia de coliformes en estas, además del pH.

Si observamos la Figura 17A y la Figura 17B no presentaron ninguna colonia de coliformes fecales en las placas compact dry realizadas para estas, siendo un resultado totalmente positivo para la presente investigación, ya que todos los otros ensayos dieron positivo en este parámetro. Sin embargo, la Figura 17C, la cual debería ser de la misma mezcla que las figuras ya antes mencionadas, no presentó la misma condición, observándose la formación de una alfombra microbiana en la placa y con una cantidad de colonias incontables. Esta placa en particular tiende a parecerse a los resultados que se obtuvieron para la mezcla de 60% estiércol y 40% cerezas,

por lo que en caso de que la mezcla 50/50 beneficie la eliminación de patógenos, se puede atribuir la presencia de estos en la placa de la Figura 17C por un error en la mixtura de ambas materias primas.

### Características y nutrientes

Tabla 12. Caracterización fisicoquímica del compost obtenido de una mezcla de 50% estiércol con 50% de cerezas, en comparativa con la caracterización de la materia prima, rangos experimentales y la norma chilena 2880.

	Nitrógeno	C:N	Humedad	pH	Materia orgánica	Conductividad
	%	-	%	-	%	dS m-1
<b>PT</b>	1,88±0,56	26,44±5,28	64,38±3,37	7,54±0,61	76,45±9,45	3,33±2,36
<b>PE</b>	0,73±0,06	21,03±1,35	61,38±8,62	7,59±0,27	86,91±1,49	3,73±1,42
<b>RCT</b>	2,68±1,24	17,53±5,76	56,78±13,92	7,57±0,76	63,99±12,13	4,57±4,87
<b>RCE</b>	0,29±0,01	33,91±2,49	50,02±4,59	7,27±2,57	83,96±0,95	2,64±0,40
<b>Norma chilena</b>	≥0,5	≤25	30-45	5-8.5	≥20	≤3

\***PT**: promedio teórico; **PE**: promedio experimental; **RCT**: resultados compostajes teóricos; **RCE**: resultados compostajes experimentales

Como se observa en la Tabla 12, el compostaje de la mezcla de cerezas y estiércol no cumple con ni con el contenido de nitrógeno exigido por la norma, ni con la relación carbono nitrógeno. El aumento de la C:N se relaciona principalmente con la disminución del contenido de nitrógeno el cual se produce por la mineralización de este elemento principalmente.

Tabla 13. pH del compostaje en triplicado de la mezcla 50% estiércol / 50% cerezas.

Muestra	pH
2.1	5,8
2.2	5,7
2.3	10,2
<b>Promedio</b>	7,27
<b>Desviación Estándar</b>	2,57

Por otra parte, el pH promedio resultante del triplicado resulta dentro del rango exigido por norma, manteniéndose bastante similar a la caracterización realizada a la mezcla previo al proceso de compostaje. Sin embargo, ocurrió una particularidad en este parámetro el cual se observa en la Tabla 13, donde el valor del pH de dos de los tres reactores es bastante más bajo que el otro. Esta diferencia notable de pH observada en la tabla recién nombrada se puede relacionar con el mayor contenido de cerezas en la mezcla, principalmente porque este fruto en particular posee altos contenidos de ácidos orgánicos, como salicílico, málico, cítrico y succínico (Garcia, n.d.), lo cual acidificó la mezcla, obteniéndose un compost con pH más ácido.

Esta misma disminución en el pH beneficio la eliminación de patógenos como se observa en la Figura 17A y la Figura 17B, dado que la *Escherichia coli* le es más factible desarrollarse en medios en donde el pH es de 7.2 o cercano a este, por lo que al encontrarse con una disminución notable de este parámetro se vio perjudicado su desarrollo (Blanco, 2019).

## 7. CONCLUSIONES

Se pudieron obtener rangos tanto de operación de los reactores, como de características fisicoquímicas de las materias primas, sin embargo, existirán grandes diferencias entre lo determinado teóricamente y lo experimental, ya que los contenidos de estas dependerán de factores externos, que para el caso de materiales de origen animal (en este caso estiércol) se centran en la alimentación y cuidados de estos, y la forma y lugar en donde se acumulen los desechos, ya que normalmente se encuentran expuestos a las condiciones climáticas.

Los rangos de operación de los reactores que se determinaron dentro del objetivo dos poseen lógica y es un buen referente para la implementación de sistemas de compostaje mediante reactores, sin embargo, se deberán considerar rangos cualitativos del reactor, como lo es el material del que está hecho, su tamaño, capacidad de aislación y método de filtraje para el intercambio de gases.

De los ensayos realizados se considera que la mezcla 50% estiércol y 50% cerezas es la de mejores resultados, en la mayoría de los resultados, sobre todo en el rango de pH obtenido y la eliminación de patógenos. Aunque se deberá buscar la forma de aumentar el contenido de nitrógeno, para cumplir con lo exigido por norma y a la vez disminuir la relación carbono-nitrógeno de este.

Por último, se recomienda la integración de un sistema de control y mantenimiento de temperaturas, o bien la utilización de materiales aislantes que sean capaces de conservar el calor, ya que si se espera disminuir los tiempos de producción de compost este es un factor fundamental para concretarlo.

## 8. LITERATURA CITADA

1. Al Mussa Ugak, M., Zahrim Yaser, A., Lamaming, J., Kelly Subin, E., Rajin, M., Saalah, S., Wong Hock Tze, F., & Abang, S. (2022). Comparative study on passive aerated in-vessel composting of food wastes with the addition of Sabah ragi. *Carbon Resources Conversion*, 5(3), 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.05.004>
2. Cardenas, M. B. B. P. T. (2010). *Analisis economico-Financiero de los criaderos de caballos criollos Chilenos ¿Pasión o negocio?* Universidad Austral de Chile]. Valdivia.
3. Ciren. (2017). *Degradacion de los suelos avanza en las comunas de Ñuble*. <https://www.ciren.cl/noticias/degradacion-de-los-suelos-avanza-en-las-comunas-de-nuble/>
4. Ciren. (2021). *Presentan actualización de resultados de Inventario de Erosión Nacional para tres regiones del centro sur de Chile*. <https://www.ciren.cl/noticias/presentan-actualizacion-de-resultados-de-inventario-de-erosion-nacional-para-tres-regiones-del-centro-sur-de-chile/>
5. Dickinson, D., Balduccio, L., Buysse, J., Ronsse, F., van Huylenbroeck, G., & Prins, W. (2015). Cost-benefit analysis of using biochar to improve cereals agriculture [Article]. *Global Change Biology Bioenergy*, 7(4), 850-864. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12180>

6. Eddy, M. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (fifth edition ed.). McGraw-Hill Education.
7. Figueroa, C. (2021). CodexVerde. Retrieved noviembre 17, from <https://codexverde.cl/suelos-degradados-por-la-agricultura-causas-reparacion-y-agroecologia/>
8. Molina Sevilla, P. (2018). *El mercado de fertilizantes en Chile*.
9. Monsalve-C, Ó. I., GutiÉRrez-D, J. S., & Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión [Factors involved in the process of nitrogen mineralization when organic amendments are added to a soil. A review] [review-article]. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
10. Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Nunez-Delgado, A., Chhajro, M. A., Kubar, K. A., Ali, U., Rana, M. S., Mehmood, M. A., & Hu, R. (2018). A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *J Environ Manage*, 228, 429-440. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006>

11. Blanco, C. A. (2019). *PARÁMETROS CINÉTICOS DE ESCHERICHIA COLI EN ZUMO COMERCIAL DE FRUTOS DEL BSOQUE*. Valladolid.
12. Figueroa, C. (17 de noviembre de 2021). *CodexVerde*. Obtenido de <https://codexverde.cl/suelos-degradados-por-la-agricultura-causas-reparacion-y-agroecologia/>
13. Garcia, A. H. (s.f.). *PULEVA*. Obtenido de <https://www.lechepuleva.es/aprende-a-cuidarte/tu-alimentacion-de-la-a-z/c./cerezas#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20la%20cereza%20contiene%20peque%C3%B1as,proporci%C3%B3n%2C%20y%20flavonoide s%2C%20como%20los>
14. Jeong, K.-H. (2017). Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for Hanwoo manure management. *Bioresource technology*, 6.
15. Kokilan, R. (2022). A sustainable approach for processing organic waste in India. *Materials Today: Proceedings*, 6.
16. Kopec, M. (2016). Factors influencing chemical quality of composted poultry waste. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 9.
17. Liu, Z. (2019). The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations. *Journal of cleaner production*, 10.

18. Meteored. (s.f.). *Meteored*. Obtenido de [https://www.meteored.cl/tiempo-en\\_Chillan-America+Sur-Chile-Biobio-sactual-18264.html](https://www.meteored.cl/tiempo-en_Chillan-America+Sur-Chile-Biobio-sactual-18264.html)
19. Molina Sevilla, P. (2018). *El mercado de fertilizantes en Chile*. Oficina económica comercial de la embajada de España en Santiago de Chile. Santiago de Chile: ICEX España exportación e inversiones.
20. Qasim, W. (2018). Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7.
21. Qasim, W. (2019). Influence of aeration rate and reactor shape on the composting of poultry manure and sawdust. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 14.
22. Sonmez, I. (2012). Determination of the optimum mixture ratio and nutrient contents of broccoli wastes, wheat straw and manure for composting. *Journal of food agriculture and environment*, 6.
23. Zelong Liu, X. W. (2019). The progress of composting technologies from static heap to. *Journal of cleaner production*, 10.

