

# Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya



**VICTOR HUGO VALVERDE**  
**2018**



ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

Máster Universitario de Investigación en  
Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos



## Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya



Vº Bº DIRECTOR

VºBº CODIRECTOR

Concepción Paredes Gil

Irene del Carmen Gavilanes Terán

ALUMNO

Víctor Hugo Valverde Orozco



## UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza al alumno **D. Víctor Hugo Valverde Orozco**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya”, bajo la dirección de D<sup>a</sup>. Concepción Paredes Gil y de D<sup>a</sup>. Irene del Carmen Gavilanes Terán (Escuela Politécnica Superior de Chimborazo (Ecuador)), debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 6 de septiembre de 2018

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos

  
 Fdo.: Concepción Paredes Gil  


TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

## REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

### IDENTIFICACIONES

**Autor:** Víctor Hugo Valverde Orozco

**Título:** Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya

**Title:** Comparative environmental and economic study of aeration systems for composting of vegetable waste with guinea pig manure.

**Director/es del TFM:** Concepción Paredes Gil, Irene del Carmen Gavilanes Terán

**Año:** 2018

**Titulación:** Ingeniero Químico (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo- Ecuador)

**Tipo de proyecto:** Experimental

**Palabras claves:** Compostaje, Residuos vegetales, estiércol de cobaya, aireación forzada, aireación por volteos

**Keywords:** Composting, Vegetable wastes, guinea pig manure, forced aeration, aeration by turnings

**Nº citas bibliográficas:** 174

**Nº de tablas:** 13

**Nº de figuras:** 10

**Nº de anexos:** 2



### RESUMEN

La superficie destinada a la actividad agrícola en Ecuador se ha duplicado con relación a años anteriores, con un consecuente incremento en la cantidad de los residuos generados en dicha actividad, que por sus características causan problemas de contaminación ambiental. Además, en Ecuador, otra actividad productiva que ha registrado un crecimiento acelerado es la cunicultura, actividad enfocada a la crianza, reproducción y comercialización de cobayas, con la consecuente generación de estiércol y deyecciones líquidas, que en su mayoría son vertidas directamente sobre el suelo, causando contaminación por su elevada carga bacteriana en el suelo y recursos hídricos. La gestión sostenible de estos residuos supone una actividad imprescindible para reducir los efectos de la contaminación. Entre los distintos sistemas de gestión de residuos agrícolas conocidos en la actualidad, el compostaje se usa como una opción para reducir la cantidad de residuos producidos, disminuir las sustancias contaminantes en el suelo, y transformar los residuos en compost con características diferentes a las iniciales. El objetivo de este estudio fue examinar los efectos de dos sistemas de aireación (aireación por volteos (PW) y aireación forzada+ volteos (PR)) en la evolución del proceso de compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya, evaluar la calidad de los compost obtenidos e identificar la técnica más adecuada en términos de consumo de energía y emisiones de carbono asociadas, así como el valor económico de los nutrientes contenidos en los compost. Se realizó un seguimiento de los parámetros indicativos del proceso, como la conductividad eléctrica (CE), pérdida de materia orgánica (MO), relación Corg/Nt, índice de germinación (IG), carbono de ácidos húmicos y fúlvicos y polifenoles solubles entre otros. En todas las pilas las pérdidas de

MO se ajustaron a una ecuación cinética de primer orden. Los compost obtenidos presentaron al final del proceso características agronómicas y de estabilización y humificación de la materia orgánica adecuadas, en general, para su empleo agrícola. El principal efecto que produjeron los sistemas de ventilación empleados fue en la degradación de la materia orgánica, la cual fue mayor y más rápida en la pila PW. También, el compost PR presentó un mayor contenido de macronutrientes y con ello un mayor valor económico adicional del compost final derivado de su contenido de nutrientes. Sin embargo, las emisiones asociadas fueron mayores en el sistema que utilizó aireación forzada+ volteos, debido al consumo eléctrico del soplador que contribuyó a que el uso energético en este sistema fuese mayor.

### **ABSTRACT**

The allocated surface to agricultural activity in Ecuador has doubled, in relation to previous years, with a consequent increase in the amount of waste generated in the activity, which due to its characteristics causes environmental pollution problems. In addition, another productive activity that has registered an increase in the country is guinea pig breeding, focused in the reproduction and marketing of the animal, with the consequent generation of manure and liquid droppings, which are mostly poured directly on the ground causing pollution due to its high bacterial load in the soil and water sources. The sustainable management of this waste is an essential activity to reduce the effects of pollution. Among the different systems of agricultural waste management at present, composting is used as an option to reduce the amount of waste, reduce polluting substances in the soil, and transform waste into compost with different characteristics to the initial ones. The objective of this study was to examine the effects of two aeration systems (aeration by pile turnings (PW) and forced aeration + pile turnings (PR)) in the evolution of the composting process of vegetable waste with guinea pig manure, to evaluate the quality of produced composts, to identify the most appropriate technique in terms of energy consumption, associated carbon emissions, as well as the economic value of the nutrients contained in the compost. The indicative parameters of the process were monitored, such as electrical conductivity (EC), loss of organic matter (OM), Corg / Nt ratio, germination index (GI), carbon of humic and fulvic acids and soluble polyphenols, among others. In all the piles the losses of OM were adjusted to a first order kinetic equation. The obtained composts presented at the end of the process suit agronomic characteristics, as well as stabilization and humification of organic matter characteristics and, in general, for its agricultural use. The main effect produced by the ventilation systems was the degradation of organic matter, which was greater and faster in the PW pile. Also, the PR compost presented a higher content of macronutrients and with it a greater additional economic value of the final compost derived from its nutrient content. However, the associated emissions were higher in the system that used forced aeration + pile turnings, due to the electric consumption of the blower that contributed to higher energy use in this system.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al cuerpo Docente del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos, por los conocimientos impartidos.*

*A todos los miembros del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, por su invaluable contribución científica y tecnológica, en especial a la Dra. Concepción Paredes Gil que además de ser mi guía y mentora durante el Máster, ha sido para mí ejemplo de organización y trabajo, además de una excelente persona.*

*Al equipo de trabajo del laboratorio de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela, a la técnico de laboratorio Marisol, a los doctorandos Jose, Alberto, Encarni, por la ayuda y guía en el trabajo durante mi corta estancia.*

*A mi familia. A mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.*

*A mis tíos Julio e Irene, por animarme a continuar con los estudios del Máster, por su ayuda y guía, sin ellos esta investigación no habría sido posible.*

*A Josselyn, mi compañera, por su compañía, apoyo, ayuda y motivación.*

*Este trabajo comenzó con una motivación propia de superación, de incrementar conocimientos y adquirir capacidades investigativas.*

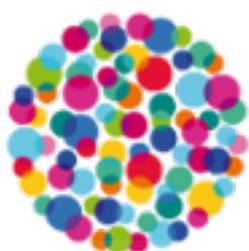
**DEDICATORIA**

*Este trabajo está dedicado a una persona muy importante en mi vida, que estaría orgullosa de este logro. En tu memoria, Ode.*





GENERALITAT  
VALENCIANA



Cooperació  
i Solidaritat



UNIVERSITAT

Miguel Hernández

*Esta publicación ha sido realizada con el apoyo financiero de la Generalitat Valenciana. El contenido de dicha publicación es responsabilidad exclusiva de la Universidad Miguel Hernández de Elche y no refleja necesariamente la opinión de la Generalitat Valenciana.*

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. RESIDUOS VEGETALES.....	1
1.1.1. Situación del sector agrícola en Ecuador .....	1
1.1.2. Residuos vegetales de origen agrícola .....	2
1.1.3. Gestión y aprovechamiento de los residuos vegetales.....	3
1.2. RESIDUOS GANADEROS.....	5
1.2.1. Situación del sector ganadero en Ecuador.....	5
1.2.2. Residuos de origen ganadero.....	6
1.2.3. Gestión y aprovechamiento de los residuos ganaderos .....	7
1.3. COMPOSTAJE.....	8
1.3.1. Definición y etapas del proceso .....	8
1.3.2. Condiciones del proceso de compostaje.....	11
1.3.3. Sistemas de compostaje.....	17
1.3.4. Evaluación de la calidad del compost .....	22
1.3.5. Marco Legislativo para establecer la calidad de los compost.....	23
1.3.6. Compostaje de residuos orgánicos de origen agrícola y ganadero.....	26
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	31
3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL .....	34
3.2.1. Características de los residuos utilizados.....	34
3.2.2. Dispositivos de compostaje utilizado .....	35
3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	37
3.4. PARAMETROS ANALIZADOS Y MÉTODOS UTILIZADOS .....	40
3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS .....	41
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	43
4.1. EVOLUCIÓN DE LOS FACTORES RELATIVOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE..	43
4.1.1. Temperatura.....	43
4.1.2. Humedad .....	44
4.2. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA.....	46
4.2.1. Pérdida de materia orgánica .....	46
4.2.2. Carbono orgánico total .....	49
4.2.3. Nitrógeno total.....	50
4.2.4. Relación Corg/Nt .....	51

4.3.	EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE .....	52
4.3.1.	pH .....	52
4.3.2.	Conductividad eléctrica.....	54
4.3.3.	Carbono hidrosoluble.....	54
4.3.4.	Polifenoles hidrosolubles .....	55
4.4.	EVOLUCIÓN DE LA FITOTOXICIDAD.....	55
4.5.	EVOLUCIÓN DE LA HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA .....	56
4.5.1.	Carbono de ácidos húmicos y fúlvicos .....	56
4.6.	CONTENIDO DE MACRO Y MICRONUTRIENTES Y ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN COMPOST .....	58
4.7.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS NUTRIENTES DE LOS COMPOST .....	59
4.8.	EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS PROCESOS DE COMPOSTAJE.....	60
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>65</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXO I: MÉTODOS ANALÍTICOS .....</b>	<b>76</b>



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Conductividad eléctrica de diferentes residuos .....	7
Tabla 2 Requisitos para diversas aplicaciones de compost municipales y condiciones medias de campo, según el Consejo de Compostaje de EE.UU. ....	25
Tabla 3 Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto como compost según el informe final sobre criterios europeos para compost y digeridos.....	26
Tabla 4 Características físicas y físico-químicas de los materiales iniciales .....	35
Tabla 5 Proporción de cada componente de las pilas de compostaje .....	38
Tabla 6 Fechas de los muestreos realizados durante el experimento .....	40
Tabla 7 Valores estadísticos para la degradación de materia orgánica de las pilas .....	47
Tabla 8 Parámetros relativos a la evolución de la materia orgánica y su fracción sólida durante el proceso de compostaje .....	49
Tabla 9 Parámetros relativos a la evolución de la fracción hidrosoluble.....	53
Tabla 10 Parámetros relativos a la evolución de la humificación de la materia orgánica .....	56
Tabla 11 Concentraciones de macro, micronutrientes y metales pesados de los compost maduros .....	59
Tabla 12 Valor económico de los composts obtenidos.....	60
Tabla 13 Resumen de los resultados de consumo energético y las emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas para el compost producido en cada uno de los sistemas de compostaje estudiados.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema básico del proceso de compostaje .....	9
Figura 2 Gráfica temperatura en función del tiempo de compostaje.....	11
Figura 3 Evolución de la temperatura y el pH a lo largo del proceso de compostaje.....	15
Figura 4 Clasificación de los sistemas de compostaje.....	18
Figura 5 Imagen de hileras de compostaje .....	19
Figura 6 Sistema de pilas estáticas con aireación forzada .....	20
Figura 7 Georreferenciación del lugar de investigación .....	31
Figura 8 Estructura de protección de las pilas de compostaje de factores climáticos .....	35
Figura 9 Evolución de la temperatura en las mezclas de compostaje y temperatura ambiental en función del tiempo .....	44
Figura 10 Evolución de la humedad en las mezclas de compostaje y humedad ambiental en función del tiempo .....	45
Figura 11 Pérdida de materia orgánica durante el proceso de compostaje de las pilas .....	48



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. RESIDUOS VEGETALES

#### 1.1.1. Situación del sector agrícola en Ecuador

La agricultura desempeña un papel crucial en la economía Ecuatoriana, representa el 25% de la población económicamente activa (INEC, 2016b). Constituye una fuente de materias primas para las industrias de procesamiento de cultivos de cereales, maíz, azúcar, aceites, entre otros. A partir del periodo 2012 - 2013 el sector agrícola ecuatoriano presentó un crecimiento en el índice nacional de productividad agrícola (11,7%), con el cacao y maíz como principales productos en crecimiento, siendo el crecimiento esperado de este índice del 6,7 % para el año 2015 con respecto al 2014, así como también se espera que incremente en años posteriores (Monteros y Sumba, 2014).

Según la encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (INEC, 2017), la superficie total cultivable nacional en el Ecuador para el año 2017 ascendió a 12.355,146 hectáreas, de éstas, los cultivos permanentes representaron el 11,58%, los cultivos transitorios y el barbecho el 7,32%, los cultivos de descanso el 1,05%, los pastos cultivados el 19,81%, pastos naturales un 5,49%, los páramos el 2,69%, montes y bosques 45,94% y el 6,13% estuvieron destinados a otros usos.

La superficie destinada a cultivos permanentes para el periodo 2017 ocupó 1,43 millones de hectáreas, a nivel regional la región costa tuvo un 72,04% de participación, seguido de la sierra con 17,11% y finalmente la región oriental y las zonas no delimitadas con 10,18% y 0,67%, respectivamente. Sin embargo, estas superficies presentaron un decrecimiento del 0,60% con relación a la superficie destinada a cultivos permanentes para el periodo 2016. En lo concerniente a cultivos transitorios, la superficie nacional en 2017 presentó una tasa de crecimiento de 6,42% con relación al año anterior, registrando 0,90 millones de hectáreas, de este total la región costa contó con el 65,72% de superficie, la región sierra contó con el 30,42%, y la región oriental contó con el 3,85% (INEC, 2017).

La región sierra situada en la zona central del pasillo interandino posee suelos ricos y climas idóneos para el cultivo de cereales, tubérculos, legumbres, hortalizas y flores. Dentro de ella, la provincia de Chimborazo cuenta con el 30,48% de la superficie total destinada al cultivo en la región, aquí los cultivos transitorios de mayor producción con valores de producción anual son la patata y cebada, con 113.588Tm y 9.010Tm respectivamente. De esta manera, la producción anual de patata en Chimborazo representa el 26,88% respecto a la producción nacional. De la superficie total destinada al cultivo en esta región, el 17,11% (equivalente a 224.789 ha) están dedicadas a cultivos permanentes, y el 30,42% (equivalente a 275.089 ha) a cultivos transitorios. (INEC, 2016a).

Un 49,7% de la población económicamente activa de Chimborazo se concentra en las zonas rurales, su actividad principal es la producción agropecuaria. Según datos de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, la totalidad de la superficie cultivada en la provincia de Chimborazo para el año 2017 fue de 150.121 ha (INEC, 2017),

evidenciándose un incremento de la superficie destinada a cultivos con relación a años anteriores. Este hecho ha causado que en las últimas tres décadas la generación de residuos sólidos en la región haya sido duplicada, produciéndose también cambios en la composición del suelo (disminución de la fracción orgánica), y se incrementen los residuos tóxicos y de mayor durabilidad en el ambiente (Gavilanes-Terán, 2014).

En los diferentes cantones de Chimborazo se cultivan además otros productos representativos como la quinoa, haba, tomate riñón, fréjol, arveja, maíz, cebolla blanca, lechuga, col, coliflor, altramuz, cebolla, avena, rábano, ajo, fresas, entre otros (Cevallos & Zaldivar Puig, 2017), siendo los principales productos el tomate de árbol, con una producción anual que representa el 5,26% respecto a la producción nacional de este cultivo; mientras que, la producción anual de patata representa el 12,54%. (INEC, 2017). Uno de los cantones de Chimborazo es Guano, el cual representa el 7,1% del territorio de la provincia de Chimborazo, con un 82% de población rural. Su población obtiene sus ingresos de actividades como la agricultura, ganadería y silvicultura (GADP Chimborazo, 2015), prácticas que han registrado un incremento significativo en los últimos años.

Es importante notar que el aumento en la producción agrícola causa incremento en las tasas de generación de residuos procedentes de esta actividad, y en muchos de los casos la velocidad de generación de los residuos supera en gran medida a la velocidad con la que son integrados en los ciclos naturales de cultivo, provocando una acumulación de los mismos con sus consecuentes impactos ambientales si no se gestionan correctamente (Sarandón y Flores, 2014).

Estos hechos evidencian el potencial agrícola de Ecuador y la necesidad de desarrollar e implementar prácticas agropecuarias ecológicas y amigables con el medio ambiente, para minimizar los impactos ambientales originados gracias a tratamientos que reincorporen parte de estos recursos a la naturaleza, que son la base de una gestión sostenible.

#### 1.1.2. Residuos vegetales de origen agrícola

Como consecuencia de la actividad agrícola, se genera una gran cantidad de residuos. Se consideran residuos a los vegetales procedentes de la actividad agrícola, la parte que no constituye la cosecha o que no satisface índices mínimos de calidad para su comercialización (Kiely y col., 1999). Son los materiales inutilizables resultado de las prácticas agrícolas y ganaderas o transformación de productos agrarios (producción de conservas, aceites, entre otros), sean estos líquidos o sólidos (Moreno y Moral, 2008).

La tendencia observada en explotaciones agrícolas intensivas es poner a disposición de los consumidores un mayor número de productos cultivados fuera de sus temporadas clásicas, lo que causa un incremento adicional a los residuos agrícolas clásicos. La intensidad de la producción y la aplicación rentable de insumos, en el sistema actual de precios comparativos, excede con frecuencia los límites de la tolerancia ecológica (FAO, 2016).

Estos residuos muchas veces se descomponen parcialmente y se integran en el suelo mejorando las propiedades agronómicas (Cuadros, 2008). Son generados por

necesidades forestales, más no energéticas, por tanto no poseen la calidad suficiente para otras aplicaciones que no sean las energéticas o de aporte de nutrientes según la agricultura tradicional (Keener y col., 2005). Desde el punto de vista económico y ambiental, desecharlos de esta manera constituye un uso ineficaz de materia que podría reaprovecharse dándole un valor agregado, pudiendo considerarlos como un recurso (Valderrama, 2013).

Las características y constitución de los desechos vegetales varían dependiendo del estado de crecimiento de las plantas cultivadas, la época de cosecha, la naturaleza del residuo, muestran generalmente un elevado contenido de materia orgánica, contenido hídrico variable, una relación Corg/NT generalmente alta (aunque con notables diferencias según su naturaleza y composición) y una fracción mineral variable (Martínez Farré, 2006).

El contenido de biomoléculas de fácil degradación (celulosas, hemicelulosas, etc.) y de componentes de degradación lenta (ceras, ligninas y otros poli fenoles) condiciona la biodegradabilidad de estos materiales (Keener y col., 2005).

Los cereales ocupan la mayor parte de la producción de residuos agrícolas seguido por los cultivos de hortalizas. Los residuos de cereales contienen relativamente poca humedad (10-15%), un elevado porcentaje de celulosa (30-50%), aproximadamente el 10% de lignina, y valores de relación Corg/NT muy altos (80-100) (Moreno y Moral, 2008). En los residuos de frutas y verduras, generalmente la fracción orgánica supone en torno a un 75% de azúcares y hemicelulosa, 10% de celulosa y 5% de lignina (Arhoun, 2017). En el caso de las hortalizas, las mismas muestran un contenido elevado de humedad y por lo general son fácilmente biodegradables, presentan baja relación Corg/NT (15-30), por contener cantidades altas de nitrógeno, y sus contenidos de hemicelulosa fluctúan entre el 5 y 15%, mientras que la celulosa varía entre el 10 y 40%, presentando el contenido más reducido de lignina en comparación con el resto de los residuos agrícolas (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008).

En general, los residuos vegetales, se caracterizan por un contenido total de sólidos (ST) entre el 8 y el 18% en peso, siendo los sólidos volátiles (SV) casi un 90% de los mismos. El elevado contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable en estos residuos, junto con su elevada humedad, aumenta su biodegradabilidad (Bouallagui y col., 2005). Este hecho contribuye a los de lixiviados y gases de efecto invernadero en los lugares donde se depositan (Arhoun, 2017).

### 1.1.3. Gestión y aprovechamiento de los residuos vegetales

Como consecuencia de la alta generación y acumulación de residuos vegetales, se originan problemas ambientales en los alrededores de las áreas de producción agrícola como generación de gases contaminantes y de efecto invernadero, como el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), amoníaco (NH<sub>3</sub>), y lixiviados, convirtiéndose en una fuente de olores desagradables (Possey col., 2014). En las zonas de producción agrícola intensiva, muchas veces los residuos se usan como alimento para ganado, pero una de las prácticas más habituales es amontonar los residuos sobre los cultivos (para facilitar su secado y

reducción de volumen) y posteriormente descomponer la fracción orgánica de los mismos mediante su incineración (Castells, 2012; Jara, 2016). Esta incineración de los residuos vegetales se realiza en muchas ocasiones junto a productos de síntesis como plásticos de invernadero, envases de productos químicos, entre otros, aumentando la cantidad de compuestos altamente contaminantes liberados a la atmósfera, contaminando el suelo, las fuentes de agua superficial y subterránea, y afectando la flora y la fauna circundantes. Por otro lado, en Chimborazo existen antecedentes que indican un alto uso de aguas residuales en actividades agrícolas y una tendencia cada vez más orientada a la práctica de la agricultura intensiva utilizando agroquímicos con carácter altamente contaminante (Valverde, 2016; Zumba, 2016).

El desconocimiento de estos fenómenos, la ausencia de una adecuada gestión de los residuos y las malas prácticas medioambientales contaminan progresivamente los suelos, provocando una disminución de la materia orgánica disponible, amplificando su nivel de compactación y fenómenos erosivos. Es evidente la necesidad de buscar alternativas o soluciones que mitiguen los impactos ambientales de las prácticas agrícolas tradicionales y dar un adecuado tratamiento a los residuos disponibles. En la agricultura actual se está dejando de lado la recuperación de suelos, se prioriza el cultivo de producciones económicamente rentables a corto plazo, mientras que la recuperación de suelos presenta una connotación social más relevante (aunque los beneficios económicos y sociales pueden ser importantes a largo plazo) (Pedreño y col., 1995).

Una adecuada gestión de residuos logra reducir en gran medida los impactos ambientales generados en la actividad agrícola y los conflictos que de ella se generan, es una práctica imprescindible en toda actividad agroindustrial responsable con el medio ambiente (FAO, 2017a), requiere de planificación sobre la gestión de los residuos y busca reducir los residuos generados en la fuente, conferirles un valor agregado acorde con el destino final y uso de los mismos, la utilización eficiente de los residuos contribuye también a la protección del medio ambiente reduciendo los efectos de la contaminación (López y col., 2015). Para esto, se aplican tratamientos que cambian las características físicas, químicas o biológicas de los residuos, con el fin de disminuir o erradicar las sustancias peligrosas que contienen y en ciertos casos obtener productos con características diferentes a las de los materiales de partida (Epstein, 2017).

La tendencia mundial actual es la de considerar a los residuos agroindustriales como subproductos y no como desechos. El destino principal de estos subproductos son la alimentación animal o el compostaje (Macías, 2009).

Los tratamientos aplicados en el medio a residuos agroindustriales más comunes son la incorporación de aditivos, separación física, combustión, compostaje, entre otros, pudiendo realizarse combinaciones de éstos, dependiendo del producto final que se desea obtener (López y col., 2015).

Entre los distintos sistemas de gestión de residuos agrícolas conocidos en la actualidad, el compostaje se usa como una opción para reducir la cantidad de residuos producidos, disminuir las sustancias contaminantes en el suelo, y transformar los residuos en

materia con características diferentes a las iniciales, sin la adición de ninguna sustancia química, constituyendo así un proceso limpio, que busca reducir la contaminación desde su inicio (Castells, 2012). Entre los residuos agropecuarios compostables se pueden distinguir los materiales vegetales o sus derivados, y los provenientes de la ganadería intensiva, principalmente las deyecciones (purines, estiércoles), aunque bajo algunas condiciones, también pueden compostarse restos animales (Chica Pérez y col., 2014, p. 24).

## 1.2. RESIDUOS GANADEROS

### 1.2.1. Situación del sector ganadero en Ecuador

La ganadería ha sido tradicionalmente un sector clave para la economía ecuatoriana. Constituye una importante fuente de empleo e ingresos, según datos del Banco Central del Ecuador, la contribución nacional del sector agropecuario al Producto Interno Bruto (PIB) para el 2015 fue del 8,3%; y la contribución específica del sector pecuario para el mismo año corresponde a 1,5% del PIB (FAO, 2017b). En el año 2017 este sector aportó alrededor del 11,09% del PIB del país (BANCO CENTRAL DEL ECUADOR, 2018). Por lo tanto, es preciso que se constituya en una industria sostenible compatible con el cuidado del ambiente y su conservación.

El ganado vacuno en Ecuador lidera el sector pecuario con 4,19 millones de cabezas, seguido del ganado porcino y ovino con 1,115 millones y 390 mil cabezas respectivamente (INEC, 2017). En la provincia de Chimborazo, la actividad pecuaria está encabezada por la crianza de ganado bovino, predominando el ganado criollo, que se ha adaptado a las condiciones agro-ecológicas de la provincia (Gavilanes-Terán, 2014).

Los pequeños productores lideran la actividad ganadera en la provincia, con extensiones de tierra dedicadas la producción pecuaria y al pastoreo (Gavilanes-Terán, 2014). También existe otro producto de la actividad ganadera, la leche, su producción representa el 22% de la producción nacional, llegando a 360 millones de litros diarios de leche, esta actividad muestra un incremento anual del 3% sobre todo en las provincias de la sierra ecuatoriana. (MAGAP, 2017).

Un importante número de fincas de la región tiene ganado vacuno, avicultura y se dedica a la crianza de la cobaya o conejo de Indias en zonas rurales y suburbanas a 4500 metros sobre el nivel del mar, su carne es utilizada como fuente importante de proteínas de origen animal. La producción de cobayas en el Ecuador como una actividad generadora de ingresos económicos empezó en la década de los 60 y 70, y en la actualidad se evidencia un incremento considerable en su producción (Guamangallo, 2018). De las especies animales nativas de los Andes, con excepción del grupo de camélidos, la única especie que se ha sometido a un manejo pecuario comercial y que tiene significación en la seguridad alimentaria de la población altoandina es la cobaya (*Cavia porcellus* y *C. aperea*) (MAG, 2003). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Ecuador, en el año 2000 existía una producción nacional de 5.067,049 cobayas, con proyecciones hasta el año 2016 de al menos 6,6 millones (INEC, 2016a).

El consumo y demanda de productos ganaderos se incrementan cada vez, como consecuencia de que los productores buscan ritmos de producción cada vez mayores, incrementándose las tasas de generación de los residuos procedentes de esta actividad que causan problemas debido a su alta carga orgánica, poniendo en riesgo el medio ambiente, ya que su degradación implica el consumo de oxígeno disuelto en agua, limitando así el crecimiento de los demás organismos presentes en el medio, y su deposición genera grandes cantidades de lixiviados (Arhoun, 2017).

Sin duda, los cambios climáticos ocasionados por el alto índice de pérdidas de suelo y las altas emisiones de gases invernadero, afectan considerablemente la producción agrícola y ganadera. Ante esta situación, el Gobierno Ecuatoriano y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2017b) plantearon un programa de ganadería sostenible cuyo objetivo es reducir el impacto que genera el desarrollo de esta actividad en Ecuador (MAGAP, 2017). En este sentido, el Fondo Verde para el Clima (GCF) realizó una contribución financiera al país de 41,2 millones de dólares destinada a reducir la emisión de gases de efecto invernadero y evitar la deforestación (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2017).

#### 1.2.2. Residuos de origen ganadero

Los residuos generados en la actividad ganadera son heterogéneos, están conformados por excrementos sólidos, semisólidos y líquidos, purines, cadáveres, desechos de faena, restos de leche y suero, entre otros. El estiércol es cualquier mezcla de heces, orines en conjunto con material vegetal como el heno, la paja, o cualquier material que sirve como cama para el ganado, los purines de cerdo contienen un agua residual de elevado poder contaminante (Belen y Saez, 2015). En general, aunque su composición química es variable, dependiendo de múltiples factores como la especie, la edad de los animales y el tipo de granja, alimentación, cría, materiales utilizados, etc. (Arhoun, 2017), se puede decir que las deyecciones ganaderas poseen contenidos elevados de elementos minerales y de materia orgánica, concentraciones poco relevantes de contaminantes como metales pesados, restos de antibióticos y compuestos orgánicos, además presentan una elevada actividad biológica (Sánchez-Básconez y col., 2016).

Durante mucho tiempo los efluentes ganaderos han sido vertidos sin precaución, ya que eran considerados poco contaminantes, debido a su carácter natural (materia orgánica). Sin embargo, su alta carga orgánica produce diferentes riesgos para el medio ambiente, tal y como se ha comentado anteriormente.

Debido a una importación neta de nutrientes (nitrógeno y fósforo), muchas áreas que concentran la producción intensiva de animales están generando más nutrientes que la capacidad que tienen los suelos para asimilarlos por sus cultivos, causando problemas de eutrofización (Moreno y col., 2014). También, la deposición de estos residuos al suelo provoca salinización, una disminución de absorción hídrica del cultivo causada por una excesiva acumulación de sales en el suelo (Meseguer, 2016). En la tabla 1 se muestran los valores de conductividad eléctrica de diferentes residuos.

Tabla 1 Conductividad eléctrica de diferentes residuos

RESIDUO	VALOR (dS/m)
Estiércol de conejo	1,0-2,9
Estiércol de oveja	2,8-7
Estiércol de ternero	4,7
Estiércol de vaca	4
Gallinaza	5,7
Lodo de depuradora	0,8-11
Purín de cerdo	5,0-12

Fuente: (Pedreño y col., 1995)

### 1.2.3. Gestión y aprovechamiento de los residuos ganaderos

La intensificación de la producción ganadera en zonas específicas puede provocar impacto medioambiental, debido a la contaminación de la atmósfera (emisión de amoníaco, óxidos de nitrógeno y metano), del agua (por nitratos, fosfatos y materia orgánica) y del suelo (fosfatos y metales pesados), pues son fuente de nutrientes, metales pesados, antibióticos, microorganismos patógenos y de otros fármacos veterinarios (Morse, 1995; Burton y Turner, 2003; Herrero y col., 2006;).

La gestión convencional de los residuos ganaderos en Ecuador se realiza mediante el almacenamiento de los residuos ganaderos para su secado y posterior incorporación a los suelos de cultivo como abono, dado su contenido en nutrientes necesarios para las plantas (Gavilanes-Terán, 2014). Sin embargo, los impactos ambientales que genera esta práctica son amplios. El principal problema de este tipo de residuos no es la cantidad, sino la extremadamente alta concentración de estos en pequeñas zonas, lo que sobrepasa la capacidad correctora ambiental del sistema. Los riesgos para el medio ambiente incluyen la saturación de los suelos con dichos efluentes, la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por nitratos y fósforo y una alta concentración de metales pesados como el cobre (Cu) y zinc (Zn) en suelos (Vázquez y col., 2015).

La contaminación se incrementa aún más cuando se realiza una utilización masiva de fertilizantes y productos fitosanitarios, así como los residuos ganaderos procedentes de la cría intensiva. Estos vertidos, fuertemente cargados de nitrógeno y fósforo, favorecen la eutrofización de los cursos de agua cuando son transportados por las aguas de lluvia hacia los medios acuáticos circundantes (Arhoun, 2017).

Los procesos de contaminación tales como los olores, los patógenos, la contaminación de las aguas, las emisiones de amoníaco y gases de efecto invernadero, y el exceso de fosforo y metales pesados en el suelo están vinculados con la producción animal intensiva (Jarvis, 1993; Ogiyama y col., 2005; Moreno y col., 2014). Las emisiones de metano y óxidos de N a la atmósfera junto con la lixiviación de nitratos a las aguas, constituyen aspectos de vital importancia, por ello existen límites de emisiones de NH<sub>3</sub>, y de reducciones de emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O (Vázquez y col., 2015).

La acumulación de los estiércoles en los suelos origina fenómenos erosivos como las escorrentías, fuentes potenciales de contaminación de recursos hídricos. El lavado de nutrientes y otras sustancias puede causar contaminación de las aguas subterráneas debido a las aplicaciones agrícolas de los residuos ganaderos sin un tratamiento previo (Blancas Cabello y Hervás Ramírez, 2001).

Los principales contaminantes son el nitrógeno (N), el fósforo (P) y los metales pesados derivados de bovinos, aves y porcinos en confinamiento. La acumulación de cualquiera de ellos puede afectar la calidad del suelo e incidir en la calidad de otros recursos, como el agua y el aire (Asociación Argentina de Ecología, 2008).

Las tecnologías de tratamiento pueden tener un importante papel en el manejo de los residuos ganaderos en este siglo, dando prioridad a programas de aplicación al suelo, especialmente cuando la agricultura intensiva no deja suelo agrícola suficiente, resolviendo también los problemas asociados a las deyecciones ganaderas, como olores, presencia de patógenos, contaminación de las aguas, emisiones de amoníaco y gases de efecto invernadero, y el exceso de fósforo y metales pesados en el suelo (Rufete-Sáez, 2015).

Podíamos decir que la correcta gestión y utilización de los productos residuales de cualquier actividad ganadera y agrícola tiene como fin convertirlos en subproductos de gran utilidad que a su vez no presenten problema ambiental alguno (Moreno y Moral, 2008).

Una opción para tratar este tipo de residuos es el compostaje, proceso en el que se obtiene un producto estabilizado e higienizado, el compost, que puede ser utilizado como enmienda orgánica en el suelo, para de esta manera mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Meseguer, 2016).

### 1.3. COMPOSTAJE

#### 1.3.1. Definición y etapas del proceso

El compostaje se considera un proceso biooxidativo controlado, tiene lugar en mezclas de sustratos orgánicos en estado sólido. Como resultado de la actividad de los microorganismos involucrados, atraviesa una fase termofílica, y genera como productos dióxido de carbono, agua, minerales y una materia orgánica estabilizada e higienizada denominada compost (Baldwin y Greenfield, 1993; Hoitink y Keener, 1993) (Figura 1).

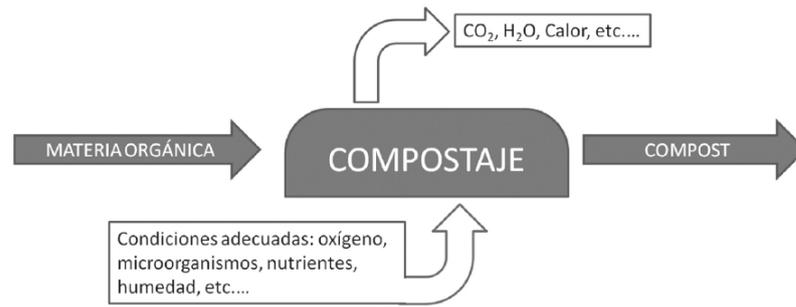


Figura 1 Esquema básico del proceso de compostaje Fuente:(Chica Pérez y col., 2014)

Se puede considerar al compostaje como un proceso de valorización de residuos orgánicos, ya que se aprovecha la materia orgánica, se evita la contaminación generada por otros tratamientos que se le dan a esta clase de residuos, como la incineración o el vertido. El proceso de compostaje cumple varios objetivos: estabiliza la materia orgánica, elimina organismos patógenos, reduce el peso y volumen de los materiales, y la aplicación agrícola del compost, produce efectos beneficiosos para el suelo y los cultivos (Haug, 1993; Moreno y Moral, 2008).

El compost, producto del proceso, se puede usar como fertilizante orgánico y acondicionador del suelo, por su capacidad para fijar nitrógeno y liberarlo progresivamente en el suelo durante las etapas de crecimiento vegetal. Se produce de manera natural y se caracteriza por la participación de microorganismos de metabolismo aerobio que producen incremento en la temperatura de la masa orgánica (Haug, 1993), en el transcurso del proceso se ven beneficiadas las transformaciones (físicoquímicas y/o biológicas) de tipo aeróbico al realizarse operaciones que le permiten al oxígeno ingresar al material en degradación (Moreno y Moral, 2008) .

La aplicación al suelo de la materia orgánica estabilizada e higienizada mediante compostaje, es el uso más adecuado para los residuos agroindustriales, ya que enriquece a los mismos en elementos nutritivos y mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Dick y McCoy, 1993).

El proceso de compostaje se ajusta a un modelo de biotransformación que puede dividirse en dos etapas principales. La primera etapa denominada bio-oxidativa donde se transforman los compuestos orgánicos por la acción oxidativa de los microorganismos con la finalidad de asimilarlos e incorporarlos en sus rutas metabólicas de biosíntesis y generación de energía. La etapa culminará con la oxidación completa de los sustratos carbonados hasta  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  para que la obtención de energía (ATP) sea posible (Chica Pérez y col., 2014). Además, los microorganismos, como resultado de la utilización de los compuestos orgánicos fosforados, azufrados o nitrogenados también generarán compuestos inorgánicos de fósforo, azufre o nitrógeno.

Si el proceso de compostaje se da adecuadamente, al final del proceso el residuo ha perdido su apariencia inicial convirtiéndose en una masa de color oscuro, con un ligero olor a putrefacción o inoloro en el mejor de los casos, el contenido de materia orgánica debido se ha reducido significativamente, por la transformación parcial a material

biodegradable y su posterior degradación hasta producir CO<sub>2</sub>, resultando materia orgánica estabilizada como producto. La evolución típica de la temperatura en un proceso de compostaje se pueden apreciar varias etapas denominadas: mesófila, termófila, de enfriamiento y madurez (Chica Pérez y col., 2014).

#### **I. Etapa mesofílica o de activación**

Al principio del proceso se desarrollan bacterias y hongos mesofílicos, que por su actividad metabólica descomponen hidratos de carbono y proteínas fácilmente degradables (Chica Pérez y col., 2014), a medida que la población mesofílica crece, también se incrementa la actividad metabólica, y la temperatura se incrementa, a valores entre 35 y 40°C (Finstein, 1992; Meseguer, 2016), debido a procesos exotérmicos, también el pH alcanza valores de entre 5,5 – 6,0, esta variación es casuada por la descomposición de lípidos y glúcidos en ácidos pirúvicos y de proteínas en aminoácidos, lo que causa presencia de hongos mesofílicos más tolerantes a las variaciones del pH y humedad (Gavilanes-Terán, 2014). La relación Corg/NT es muy importante, el carbono confiere la energía a los microorganismos y el nitrógeno es esencial para que sintetizen nuevas moléculas (Moreno y Moral, 2008). A temperaturas superiores a 40°C, un cese de la actividad mesofílica tiene lugar y se observa el desarrollo de la fase termofílica.

#### **II. Etapa termofílica o de calentamiento**

La temperatura continúa ascendiendo hasta llegar a valores entre 65 y 75°C, las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado de dormancia, mientras que las bacterias termofílicas, actinomicetos y hongos termofílicos encuentran sus condiciones de desarrollo, generando incluso más calor que las bacterias mesófilas. La actividad de los microorganismos termófilos consume la mayor parte de la materia orgánica del residuo, descomponiendo un amplio espectro de compuestos orgánicos (Chica Pérez y col., 2014), a excepción de la celulosa y lignina, más difíciles de degradar. En esta etapa existe una mayor producción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, y compuestos fitotóxicos, y una eliminación de los microorganismos patógenos (Meseguer, 2016). El pH también se incrementa desde 5,5 hasta 7,5, en esta etapa inicia la esterilización del residuo por las altas temperaturas alcanzadas, la mayoría de las semillas y patógenos como E. Coli mueren al estar sometidos durante días a temperaturas superiores a 55°C (Sánchez y col., 2011).

#### **III. Etapa de enfriamiento**

Cuando los nutrientes y energía comienzan a escasear, los microorganismos termofílicos disminuyen su actividad y la temperatura en la pila desciende desde los 75°C hasta la temperatura ambiente, provocando la muerte de los microorganismos mencionados, disminución de la velocidad de descomposición y se vuelven a observar colonias de microorganismos mesófilos en la masa, los cuales degradarán los azúcares, hemicelulosa y celulosa hasta que toda la energía sea utilizada (Casco y Bernat, 2008). En esta etapa se descomponen los compuestos residuales de etapas anteriores y los moderadamente complejos, se oxidan y mineralizan compuestos inorgánicos reducidos de nitrógeno y

azufre, formándose nitratos y sulfatos, se polimerizan compuestos orgánicos sencillos dando lugar a compuestos húmicos, se fija nitrógeno que da lugar a amonio que es posteriormente oxidado a nitratos por bacterias nitrificantes, se mineraliza hierro, manganeso y fósforo, se forman agregados minerales de sodio, magnesio, cobre, calcio, potasio, etc., se reduce la toxicidad de los metales pesados, etc. (Chica Pérez y col., 2014)

#### IV. Etapa de maduración

Posteriormente, la temperatura y pH se estabilizan, y tiene lugar la mineralización de la materia orgánica, hay formación ácidos húmicos gracias a la acción de los actinomicetos, considerados productores de antibióticos que inhibirán el crecimiento bacteriano y la presencia de patógenos, también los macro organismos como nematodos, rotíferos, escarabajos, lombrices, etc. incrementan su actividad, removiendo, excavando, moliendo, masticando los materiales, y al romperlos incrementan el área superficial, facilitando el acceso de los microorganismos (González, 2017).

En la siguiente grafica se observa las variaciones de temperatura que presenta la pila de compostaje a través del tiempo, lo cual facilita la identificación de las etapas características del proceso.

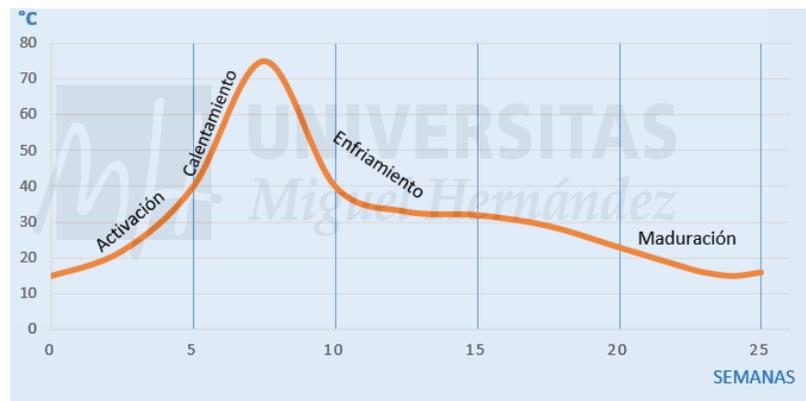


Figura 2 Gráfica temperatura en función del tiempo de compostaje

Fuente: (Valverde, 2016)

#### 1.3.2. Condiciones del proceso de compostaje

El proceso de compostaje es complejo. Involucra variación en las poblaciones microbianas, incrementos y descensos de temperatura, humedad y pH, disponibilidad de sustratos, cantidad de oxígeno disponible, etc. Para que el proceso de desarrolle de manera adecuada, se deben garantizar intervalos óptimos en las condiciones de operación, para de esta manera obtener un compost final de calidad (Chica Pérez y col., 2014).

Se pueden identificar variables físicas, químicas y biológicas que condicionan el desarrollo del proceso de compostaje. Entre las variables físicas se encuentran la temperatura, la humedad y el tamaño de partícula, que influirán principalmente sobre la porosidad y el espacio de aire libre en la mezcla de materiales. Entre las variables

químicas, la relación Corg/NT, el pH y la disponibilidad de oxígeno. Entre las variables biológicas, las más importantes son la presencia de poblaciones microbianas capaces de realizar el proceso de compostaje y la biodegradabilidad de los residuos. Estas variables dependerán de las condiciones ambientales, el tipo de residuo a compostar y el sistema utilizado a lo largo del proceso de compostaje (Chica Pérez y col., 2014).

El compostaje se dará de forma adecuada cuando el ritmo de descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos sea adecuado, por tanto, es necesario que las condiciones determinantes del proceso, las que se deben controlar, sean aquellas relacionadas con el metabolismo microbiano. Estas condiciones se pueden dividir en dos grupos (Meseguer, 2016):

a) Características relativas a la naturaleza del sustrato

El sustrato necesita cumplir varios requisitos para garantizar que el compostaje se desarrolle adecuadamente, como tener un tamaño de partícula adecuado, un adecuado equilibrio de nutrientes y pH, etc. (Meseguer, 2016).

La estructura y el tamaño de las partículas influyen fuertemente en la capacidad de intercambio gaseoso. La porosidad y el tamaño de los poros son también parámetros críticos para una aireación óptima durante el proceso. Ambos parámetros tienen gran impacto en la resistencia al flujo de aire: cuanto mayor es la compactación y menor la porosidad del residuo, mayor será la resistencia. (Anex y Kiely, 1999). La oposición del compost al paso de aire es una de las variables clave a minimizar para el diseño de un sistema de aireación para compostaje (Miyares y Rodríguez, 2007). El tamaño de partícula deberá tener dimensiones entre 1-5 cm. (Biddlestone y Gray, 1991), de esta manera, serán lo suficientemente pequeñas para la acción microbiana, incrementando la velocidad de descomposición, y lo suficientemente grandes para garantizar porosidad del material, facilitando el intercambio gaseoso y una descomposición aerobia. Por estas razones, para compostar materiales con alta porosidad, como por ejemplo residuos vegetales y estiércol de cobaya, es conveniente que la mezcla sea suficientemente porosa para permitir un nivel de aireación óptimo.

Nutrientes. Relación Corg/NT

La presencia de nutrientes en el sustrato en una proporción adecuada permite un desarrollo y reproducción adecuados de los microorganismos. La relación Corg/NT del material de partida debe ser de entre 25-35 para que el compostaje se desarrolle de manera adecuada (Vilaseca y Torrentó, 1987). La presencia de estos nutrientes principales en proporciones adecuadas facilita el proceso biológico y determina el uso agrícola y la capacidad fertilizante del producto final. Entre los nutrientes más importantes para los microorganismos destacan el carbono (C), el nitrógeno (N) y el fósforo (P), que son fundamentales para el crecimiento de los microorganismos y su síntesis celular. El C conforma el 50% de las células microbianas, y el 25% del dióxido de carbono desprendido en la respiración celular. El nitrógeno participa, junto con el C, en la formación del protoplasma y la pared celular microbianos, determina la

calidad fertilizante del compost, y el fósforo es necesario para el metabolismo microbológico. La presencia de K es importante a nivel metabólico durante el proceso de división celular. Además, es necesaria la presencia de micronutrientes que hacen posible la síntesis de las enzimas imprescindibles para la hidrólisis o funciones metabólicas (Nogales y col., 1982). El boro, calcio, cloro, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, selenio, sodio y zinc son los principales, algunos de ellos favorecen la asimilación del resto de nutrientes. La mayoría se encuentra en niveles aceptables en los residuos, pero se debe tener precaución ya que cantidades mayores a las necesarias puede llevar a la toxicidad para los microorganismos (Chica Pérez y col., 2014).

Relaciones Corg/NT muy elevadas causan disminución de la actividad biológica, extendiendo el proceso de compostaje por la escasez de nitrógeno, que reduce la velocidad de estabilización de la materia orgánica, si la relación Corg/NT es muy baja, el nitrógeno será eliminado del medio en forma de amoníaco (Kithome y col., 1999; Sánchez-Monedero y col., 2001).

Los microorganismos que realizan el compostaje consumen mucho más carbono que nitrógeno, siendo la relación óptima Corg/NT en torno a 25-35 (Haug, 1993; Ekinici, 1997) para asegurarse de que los microorganismos tengan una cantidad idónea de carbono y nitrógeno para la síntesis celular y la degradación de los sustratos. Durante el compostaje la relación Corg/NT decrece constantemente debido a la mayor eliminación de carbono en forma de CO<sub>2</sub>, varía en función del sustrato a compostar, ya que no todas las formas de carbono y nitrógeno son biodegradables, especialmente las de carbono (Chica Pérez y col., 2014).

#### pH

Durante el proceso de compostaje se van produciendo variaciones del pH (ver Figura 3). En la primera fase, se produce una disminución del pH debido a la acumulación de ácidos orgánicos producto de la fermentación anaerobia de la materia orgánica. Si el sistema opera en condiciones anaerobias, el descenso del pH puede alcanzar valores de pH inferiores a 4, será necesario airear el sistema para recuperar las condiciones aerobias y que el pH vuelva a situarse en el intervalo óptimo. En las fases sucesivas, tiene lugar un aumento progresivo del pH debido al consumo de los grupos carboxílicos y fenólicos, así como al consumo del resto de intermedios metabólicos, alcanzándose valores entre 7,5 y 8,5 aproximadamente. Finalmente, el pH se estabiliza debido a la disminución de la actividad microbiana en la fase de maduración., donde se da una suave bajada del pH hacia la neutralidad, debido a la formación de compuestos húmicos que actúan como tampón (Chica Pérez y col., 2014). Generalmente, es posible compostar materiales con variados valores de pH (3-11) (Costa y col., 1991), respecto a los valores para una inhibición de la actividad de los microorganismos, el rango más adecuado oscila entre 6 y 8 (Zucconi, 1987).

b) Factores relativos al propio proceso de compostaje

Entre estos factores se encuentran la aireación, la temperatura y la humedad.

Aireación

La aireación es un aspecto importante, situándose el intervalo de 10-18% como el nivel óptimo de oxígeno dentro de las pilas de compostaje (Biddlestone y Gray, 1991; Meseguer, 2016). Una aireación pobre origina metabolitos no deseados y disminuye la velocidad del proceso, ya que se crean condiciones anaerobias en el proceso de degradación de materia orgánica. Además, una excesiva aireación enfriaría la masa, y en consecuencia la actividad metabólica de los microorganismos se reduciría (Biddlestone y Gray, 1991; Meseguer, 2016).

Temperatura

Es el indicador determinante del desarrollo del proceso, es un indicativo de la mayor o menor actividad microbiana, se considera como tal, ya que los microorganismos, como producto de las reacciones que realizan al descomponer la materia orgánica liberan calor.

Cada grupo de microorganismos tiene una temperatura óptima para realizar su actividad (Moreno y Bernat, 2008; Chica Pérez y col., 2014) el grupo de microorganismos favorecido descompondrá la materia orgánica para obtener y emitirá calor.

La temperatura de un proceso de compostaje es el resultado del balance energético entre el calor generado en el proceso aerobio de oxidación de los sustratos y las pérdidas de calor. Esta pérdida de calor se da principalmente por la evaporación del agua contenida en el residuo, pero además se pierde energía debido a los fenómenos de conducción y convección en la masa de compost, en forma de calor sensible y por radiación, aunque esta última es despreciable. (Chica Pérez y col., 2014).

Un proceso de descomposición aeróbica en el que la temperatura no supere los 55°C, presentará una reducida capacidad de eliminación de patógenos, es alrededor de este valor cuando se alcanzan las mayores velocidades de reacción (Stentiford, 1996). Sin embargo, la temperatura es un factor dependiente del resto de parámetros mencionados como humedad, tamaño de partículas, etc. Tanto la temperatura como la respiración microbiana medida por la producción de CO<sub>2</sub>, se utilizan como parámetros de seguimiento del proceso e indicadores de la estabilidad del producto final (Epstein, 1997).

En la publicación de la Red Española de Compostaje se describen las variaciones de temperatura a lo largo del proceso de la siguiente manera (Chica Pérez y col., 2014, pp. 26-27) (Figura 3): Los organismos mesófilos que inician el proceso de compostaje son los hongos, mohos, y bacterias productoras de ácidos, posteriormente se incrementa la temperatura exponencialmente, debido a la actividad microbiana

hasta alcanzar valores entre 65 y 70°C. El aumento de la temperatura se debe a dos motivos principales, el crecimiento exponencial de los microorganismos en el sistema de compostaje, y el aislamiento térmico de la masa de compost con beneficios como la higienización de la materia orgánica debido a la eliminación de patógenos (Moreno y Moral, 2008). Sin embargo, temperaturas superiores a 70°C pueden inactivar a los microorganismos y enzimas encargadas de la degradación de los residuos. Generalmente a partir de 65°C disminuye la actividad microbiana por desactivación térmica aunque puede seguir siendo eficaz a temperaturas de hasta 68 o incluso 70°C (Keener y col., 1997).

Una vez degradados los sustratos más fácilmente biodegradables, almidón, azúcares, etc., el metabolismo microbiano se reduce porque solo quedan los difícilmente biodegradables, reduciéndose de este modo la temperatura del sistema de compostaje por debajo de los 60°C. En esta etapa se descomponen los compuestos residuales de etapas anteriores y los moderadamente complejos, se oxidan y mineralizan compuestos inorgánicos reducidos de nitrógeno y azufre, formándose nitratos y sulfatos, se polimerizan compuestos orgánicos sencillos dando lugar a compuestos húmicos, se fija nitrógeno que da lugar a amonio que es posteriormente oxidado a nitratos por bacterias nitrificantes, se mineraliza hierro, manganeso y fósforo, se forman agregados minerales de sodio, magnesio, cobre, calcio, potasio, etc., se reduce la toxicidad de los metales pesados mediante la formación de sales insolubles, etc., como se ha comentado anteriormente (Chica Pérez y col., 2014).

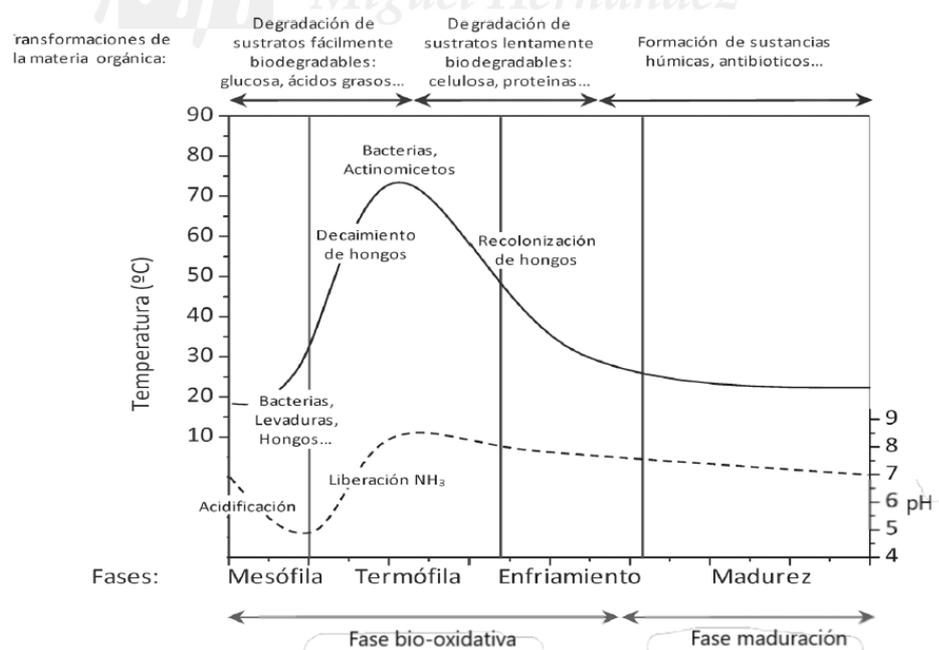


Figura 3 Evolución de la temperatura y el pH a lo largo del proceso de compostaje.

Fuente: (Chica Pérez y col., 2014)

Finalmente, el sistema de compostaje alcanza la temperatura ambiente, o valores ligeramente superiores, lo que indica que los compuestos más inestables han sido degradados y el proceso de compostaje se da por finalizado.

La temperatura óptima para la estabilización biológica se halla entre 35 y 60°C (Vestal y McKinley, 1986; Bach y col., 1987;), aunque para que se pueda asegurar la eliminación de patógenos y, por tanto, la higienización del residuo, la temperatura debe estar entre 55 y 65°C, y permanecer al menos 1 o 2 semanas en ese intervalo. Por todos estos motivos, se considera a la temperatura como una de las variables más adecuadas para realizar el seguimiento del proceso (Chica Pérez y col., 2014).

### Humedad

El agua es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células, y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante el proceso. La presencia de agua es imprescindible para el metabolismo microbiano. La humedad en la masa de compostaje debe permitir la refrigeración de la pila de compostaje, la circulación del oxígeno y otros gases en la pila de compostaje, así como facilitar el movimiento de los nutrientes (Gordillo y Chavez, 2018).

Los compuestos solubles que se pueden encontrar durante el compostaje, son azúcares, aminoácidos, ácidos grasos, etc. que están presentes inicialmente en el residuo o que se generan fruto de la hidrólisis de compuestos más complejos (Chica Pérez y col., 2014).

La humedad no permanece constante a lo largo del proceso, la disminución continua de humedad es indicativa de la descomposición de materia orgánica (Miller y col., 1990). Es uno de los parámetros clave en los sistemas de compostaje, y su control y monitoreo es de suma importancia.

Kulcu y Yaldiz (2004) observaron en investigaciones con reactores aireados tanto por convección natural como mecánicamente, que el contenido de humedad disminuía a lo largo del proceso de compostaje, alcanzando valores mínimos en condiciones óptimas de aireación. Por otra parte, un exceso de sequedad puede provocar la ralentización e incluso el cese de la actividad microbiana debido a la función del agua como medio de transporte de los nutrientes acuosos (Alvarez-Uría y Rodríguez, 2007) . Es necesario, por tanto, mantener la humedad en niveles aceptables, especialmente en la etapa termófila del proceso que es donde se producen las mayores pérdidas de humedad debido a la evaporación por las altas temperaturas alcanzadas (Chica Pérez y col., 2014).

Si el contenido de humedad excede el 60%, el agua desplaza el aire presente en los espacios libres existentes entre las partículas y se crean condiciones anaerobias, este exceso se puede enmendar o corregir con un incremento de la aireación de la mezcla. Por otra parte, si el nivel de humedad es menor a 40%, la actividad biológica y la velocidad de descomposición disminuyen (Golueke, 1989; Haug, 1993; Hamoda

y col., 1998). El valor inicial de humedad ha de estar entre el 55 y el 85%, y el valor final debe estar entre el 30 y el 40% para facilitar el cribado del producto final (Liang y col., 2003), otros autores consideran valores óptimos a los comprendidos entre 40 y 60% ( Vilaseca y Torrentó, 1987; Stentiford, 1996; Meseguer, 2016).

La estrategia común para el control de la humedad en el compostaje es la adición de agua en forma directa. Pero puede presentar inconvenientes como el enfriamiento de la pila debido a la evaporación, la modificación de la estructura del compost, reducción de porosidad, etc., afectando negativamente al desarrollo del proceso de compostaje. Se puede reducir la humedad aireando la mezcla, pero esto además de la humedad modificará la temperatura de la pila (Chica Pérez y col., 2014).

Durante el proceso de compostaje se producen lixiviados, provenientes del agua excedentaria del riego, o bien de agua liberada por el propio material, en los cuales se acumulan sales y otros microorganismos y compuestos no deseados. Por esto, se desaconseja el uso de lixiviados para el riego una vez el material ha superado la fase termófila y está higienizado. La conductividad eléctrica aumenta generalmente durante el proceso de compostaje, por la degradación de la materia orgánica que produce un aumento en la concentración de sales. Una disminución de la conductividad eléctrica se asocia a un riego excesivo de la masa, que supone un lavado de las sales (Chica Pérez y col., 2014).

### 1.3.3. Sistemas de compostaje

El incremento en la producción de los residuos sólidos urbanos, y las dificultades existentes en la gestión de la fracción orgánica de los mismos, han puesto de manifiesto la importancia de los procesos de compostaje como alternativa a la gestión de residuos. A consecuencia de esto, el compostaje ha comenzado evolucionar en tecnología desde las pilas volteadas a la intemperie hasta complejos sistemas de bio-reactores completamente automatizados (Chica Pérez y col., 2014).

Los distintos sistemas de compostaje intentan optimizar cada uno de los factores que intervienen en el compostaje. Las condiciones particulares de cada instalación y método para compostar deben evaluarse para desarrollar un proceso exitoso. La clasificación más común de los sistemas de compostaje se realiza en relación del aislamiento del material a compostar con respecto al exterior, se clasifican en sistemas abiertos y cerrados, la variable sobre la que más se incide es el suministro de oxígeno mediante diferentes métodos de aireación (Figura 4) (Chica Pérez y col., 2014).



Figura 4 Clasificación de los sistemas de compostaje Fuente: (Meseguer, 2016).

### Sistemas abiertos

Suelen ser de costo reducido y poco tecnificados, se aplican principalmente en comunidades medianas o pequeñas con elevada disponibilidad de terreno (Pérez & Morales, 2008). La forma de amontonamiento del material en este tipo de plantas es muy variada (pilas, mesetas, zanjas, etc.), así como los sistemas para su manipulación. Lo más usual es utilizar sistemas dinámicos, ya sea por medio de dispositivos especiales (volteadoras) o con maquinaria inespecífica (normalmente palas mecánicas), siendo menos frecuentes los métodos estáticos, con sistemas con aireación pasiva o forzada (Chica Pérez y col., 2014).

#### Pilas o hileras volteadas

Son la alternativa más económica en tecnología de compostaje y su práctica es relativamente simple. La mezcla de materiales a compostar se coloca en hileras o pilas de sección triangular o trapezoidal, minimizando el espacio requerido para el compostaje. Estas estructuras suelen tener una base de entre 3 y 4 metros como máximo, una altura de unos 2 a 2,5 metros y una longitud desde pocos a varias decenas de metros (Figura 5). La aireación de la mezcla en este sistema se realiza de forma periódica mediante volteos. Al airearse solo de manera periódica, el nivel de oxígeno no se mantiene constante, impidiéndose el aumento de las oxidaciones biológicas y haciendo que el proceso de compostaje sea más lento. Por otro lado, las instalaciones requieren mayor espacio que en otros métodos, porque las pilas se voltean lateralmente (de Bertoldi y col., 1983; Vallini y Pera, 1984; Meseguer, 2016). La duración del proceso es, en general, de unos dos o tres meses, más el periodo de maduración. Los parámetros para el control rutinario del proceso son la temperatura y la humedad. Para el control de temperatura existen tanto sistemas manuales, que permiten obtener una lectura puntual de la temperatura, como sistemas que permiten su seguimiento en continuo. El seguimiento de la temperatura en este tipo de sistemas puede diferir, dependiendo del tipo de material a compostar. (Chica Pérez y col., 2014).



Figura 5 Imagen de hileras de compostaje

Fuente: (Schwarz y Bonhotal, 2011)

Estos sistemas de compostaje logran una mayor homogeneización del material y una mayor garantía de higienización del material, debido a que todo el material ha atravesado fases termofílicas tras los volteos. También presentan desventajas como dificultades en el control de la temperatura, déficit de oxígeno en capas profundas de las mezclas, se dispersan malos olores, existe presencia de insectos y otros organismos indeseables, también los costos de uso de las máquinas volteadoras son elevados. (Chica Pérez y col., 2014).

#### Pilas estáticas aireadas

Son el siguiente nivel de sofisticación en tecnología de compostaje, en este se colocan los materiales sobre un conjunto de tubos perforados, conectados a un sistema que aspira (sistema Beltsville) o insufla (sistema Rutgers) aire a través de la pila. Son económicos, debido a la reducción en mano de obra, mínima tecnología involucrada, y control de una de las variables más importantes del proceso, la temperatura (Haug, 1993).

Este sistema permite la rápida transformación de residuos orgánicos en fertilizantes. La ventilación controlada impulsa la actividad de los microorganismos. El proceso suele durar de 4 a 8 semanas, y luego se apila el producto durante 1 a 2 meses para que acabe de madurar. Puede usarse en combinación con otras tecnologías de compostaje. En la actualidad los sistemas de aireación de la pila se controlan comúnmente por la temperatura o por un temporizador ajustado de acuerdo con los niveles de ésta (Figura 6) (Pérez y Morales, 2008).

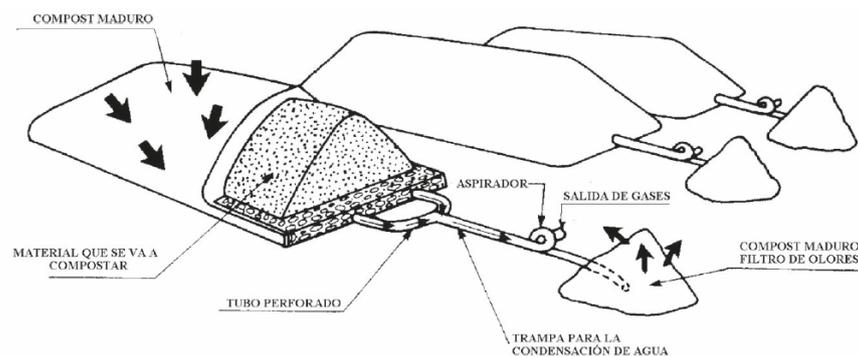


Figura 6 Sistema de pilas estáticas con aireación forzada (Wilson, 1980). Tomado de: (Chica Pérez y col., 2014)

### *Compostaje con aireación forzada por succión*

En este sistema de compostaje, se aspira aire desde la base de la pila (Beltsville). El aire aspirado se pasa por una pila de compost ya madurado que actúa como filtro reduciendo los problemas de olor, la masa a compostar también se cubre con compost maduro (Wilson, 1980). La aireación realizada por aspiración tiene como ventaja adicional la posibilidad de un tratamiento posterior directo de la corriente en un sistema de tratamiento de gases. La velocidad de flujo del aire se sitúa en el rango de 50 a 100 m<sup>3</sup>/h por m<sup>2</sup> de superficie y de 3,5 a 7,0 m<sup>3</sup>/h por tonelada de material (Chiumenti, 2005).

### *Compostaje en pilas estáticas ventiladas (Sistema Rutgers)*

Un incremento excesivo en la temperatura del proceso de compostaje (cerca a 80°C), por la naturaleza de la materia orgánica y sus propiedades de autocalentamiento, causa un ritmo de descomposición lento. El mismo fenómeno ocurriría si hay ausencia de oxígeno. Ambas condiciones se evitan con la existencia de aireación de la mezcla de materiales. Los componentes de este sistema son una fuente de ventilación, provista de un control de la inyección del aire en el sustrato que se inyecta por la parte inferior de la pila de compostaje mediante tuberías que poseen pequeños orificios espaciados a lo largo de las mismas (Finstein y col., 1985).

En este sistema la condición determinante es el control de la temperatura interna de la masa de materiales, que impide que sobrepase los 60°C, con un ventilador actuando como soplador, primero de manera temporizada y cuando la temperatura del material es superior a 60°C, siendo accionado según demanda. El control de la temperatura máxima del proceso es importante ya que el ritmo de descomposición de la materia es afectado negativamente cuando la temperatura excede los 60 °C, debido a la inactivación de la población de microorganismos responsables de la descomposición; puede ser controlado mediante un sistema de remoción de calor bajo demanda, y oxigenación de la

materia, con el control termostático de un ventilador, que en síntesis es la base del sistema Rutgers para compostaje (Finstein y col., 1985).

Este sistema permite la rápida transformación de residuos orgánicos en fertilizantes, pues la ventilación controlada impulsa la actividad de los microorganismos artífices del proceso de compostaje. La aireación forzada suministra O<sub>2</sub>, enfría la pila y elimina el vapor de agua, CO<sub>2</sub> y otros productos de descomposición (Chica Pérez y col., 2014)

#### Sistema asociado de volteos y ventilación forzada

En este sistema la mezcla de materiales se voltea, también se le suministra aireación forzada gracias a una fuente de ventilación. Existen investigaciones que emplean este sistema en el compostaje acelerado de los residuos sólidos urbanos (Costa y col., 1991; Meseguer, 2016)

#### Sistemas cerrados

En estos sistemas de compostaje el proceso se realiza en reactores. Brindan un mayor control sobre las condiciones del proceso, necesita menor espacio y presentan tiempos de compostaje cortos, se pueden controlar las emisiones de malos olores, pero su costo de inversión y mantenimiento es elevado (Stentiford, 1987).

En este tipo de sistemas las distintas variables de proceso, tales como contenido de humedad, composición de nutrientes, temperatura, pH, cantidad de gas, tiempo de retención, etc., podrían ser registradas, controladas, y optimizadas. Esto conllevaría una degradación más rápida y completa con un mínimo impacto ambiental de las instalaciones (Chica Pérez y col., 2014).

#### Reactores verticales

Suelen tener dimensiones generalmente entre cuatro metros de altura, pudiendo ser continuos o discontinuos. En estos reactores resulta complicado el control adecuado del proceso, ya que las condiciones de oxigenación no están garantizadas, de igual manera, la temperatura se ve afectada ya que las partes más cercanas a la fuente de ventilación se enfrían demasiado, en cambio, las más lejanas son aireadas de manera insuficiente (Meseguer, 2016).

#### Reactores horizontales

Estos reactores diferencian los componentes de los residuos, realizándoles tratamientos biológicos y fisicoquímicos. Los tiempos de residencia son cortos, e insuficientes para considerarlos un verdadero compostaje, sólo se inicia la degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos. Presente ventajas como la facilidad para separar los materiales inertes, también se obtiene material homogéneo, pero degradado parcialmente, tampoco las condiciones de higienización se garantizan ( Mustin, 1987; Meseguer, 2016). Un ejemplo de esta tecnología son los túneles estáticos, reactores relativamente grandes sellados totalmente, que poseen un sistema de aireación forzada,

medidores de temperatura, humedad y oxígeno, así como sistemas de riego, de recogida de gases y de lixiviados. (Chica Pérez y col., 2014).

#### 1.3.4. Evaluación de la calidad del compost

El compost es materia orgánica con características similares al humus que ha sido estabilizada, es inocua y no posee sustancias fitotóxicas, por lo que su aplicación al suelo no afectará negativamente a las plantas, presenta múltiples aplicaciones potenciales, entre las que se encuentran su uso como acondicionador de suelos, fertilizante, enmienda orgánica o su empleo como materia prima para otros fines por (Costa y col., 1991; Chica Pérez y col., 2014)

Un compost para ser considerado como tal, debe cumplir los siguientes requisitos:

- ✓ Debe ser un producto estabilizado. De no ser así, su empleo agrícola presentará efectos indeseables.
- ✓ Debe ser resultado de procesos biológicos, siendo diferente de procesos como la desecación o esterilización. La fermentación del producto se reanuda, de darse las condiciones necesarias.
- ✓ Debe tratarse de un producto esterilizado. La destrucción de organismos patógenos se consigue con la permanencia de la mezcla a compostar en la etapa termófila durante un tiempo determinado.
- ✓ Debe haber pasado por una etapa inicial de descomposición, esto es un requisito para que la materia pueda ser estabilizada.
- ✓ Su composición evidenciará la presencia de sustancias húmicas, que se producen durante la fase de estabilización del producto (maduración), junto con procesos de mineralización.

Entre las distintas propiedades y características que definen la calidad del compost, además de las reguladas normativamente, pueden distinguirse (Chica Pérez y col., 2014):

- Calidad física, donde se situarían la densidad aparente, color, humedad, granulometría, temperatura y capacidad de autocalentamiento. Contenidos bajos de humedad favorecen el transporte, pero dificultan el manejo y la aplicación, y es probable que escondan una estabilidad insuficiente. A pesar de ser una medida subjetiva, la presencia de olores desagradables suele indicar un producto que no es lo suficientemente estable o que ha sufrido un proceso anaerobio.
- Calidad química, donde se sitúan el pH, la CE, el contenido en materia orgánica, nitrógeno en forma mineral, nitrógeno orgánico total y resistente, fósforo y potasio, calcio y sodio, porcentaje de sustancias húmicas, metales pesados, contaminantes orgánicos, etc. El pH afecta directamente al crecimiento de las plantas debido a que la disponibilidad de los nutrientes esenciales se puede ver afectada en condiciones de extrema acidez y basicidad. La riqueza en nutrientes confiere un grado de calidad al producto. Los contaminantes inorgánicos

(metales pesados), son fáciles de medir y existe amplia bibliografía acerca de su origen, fitotoxicidad, acumulación, etc.

- Calidad biológica, donde se situarían la estabilidad alcanzada, ausencia de patógenos, índice de germinación, grado de mineralización, ausencia de semillas de malas hierbas o capacidad supresora de enfermedades en plantas.

#### *Métodos de evaluación del grado de madurez*

Es necesario realizar un seguimiento del proceso de compostaje, para de esta forma tener una idea más clara acerca de la madurez del producto, el rendimiento y eficacia del proceso, las características del producto final, etc. (Moreno y Moral, 2008). También se debe tener en cuenta que los parámetros determinantes del grado de madurez en el compost varían enormemente en función de las características de los materiales empleados, los métodos usados en esta investigación se pueden clasificar en:

- Métodos físicos: La determinación de la temperatura es un indicador del desarrollo del proceso, ya que se dan variaciones de la misma a través del proceso (Stickelberger, 1975). El olor es un indicador de la presencia de ciertos compuestos, como ácidos orgánicos, pudiendo interpretarse como indicativo de falta de madurez (Iglesias-Jiménez y Pérez García, 1989). El cambio de color del compost también es indicador de su grado de madurez, generalmente la materia se oscurece a medida que transcurre el proceso, por la descomposición de los materiales frescos y formación de grupos cromóforos, usándose esta determinación como criterio de madurez para determinados materiales (Sugahara y col., 1979).
- Métodos de análisis físico-químicos y químicos: Evalúan cualitativa o cuantitativa las sustancias que surgen o experimentan cambios durante el proceso de compostaje como consecuencia de la fermentación o humificación, como son el contenido de carbono hidrosoluble (García y col., 1992; Hue y Liu, 1995; Bernal y col., 1998); la relación Corg/NT en el extracto acuoso (Hue y Liu, 1995; Bernal y col., 1998); la variación del pH (Jann y col., 1959); contenido de materia orgánica, carbono orgánico total (Walkley y Black, 1934); polifenoles solubles (Beltrán y col., 1999), los índices de humificación (relación de humificación, índice de humificación, porcentaje de ácidos húmicos y la relación de polimerización), a partir de los porcentajes de carbono extraíble (Cex), carbono de ácidos húmicos (Cah) y de ácidos fúlvicos (Caf) (Roletto y col., 1985; Ciavatta, 1988; Ciavatta y col., 1990; Jimenez y García, 1992); la capacidad de cambio catiónico (CCC) (Harada e Inoko, 1980; Iglesias-Jiménez y Pérez García, 1992) y la relación CCC/Cot (Iglesias-Jiménez y Pérez García, 1992; Jimenez y García, 1992).
- Ensayos sobre vegetales: Indican la presencia de productos fitotóxicos no detectados por los métodos anteriores. Por ejemplo el test de germinación (Spohn, 1978; Zucconi, 1981), que calcula un índice de germinación determinando la longitud media de las raíces en un extracto acuoso.

#### 1.3.5. Marco Legislativo para establecer la calidad de los compost

En el Ecuador, el Ministerio del Ambiente (MAE) es el organismo encargado de la regulación ambiental, actúa en la generación de políticas y regulaciones jurídicas, como

en la incorporación actividades de múltiples actores sociales en el aspecto ambiental (Gavilanes-Terán, 2014), existen entidades encargadas de la Gestión Ambiental a nivel nacional e internacional, sin embargo, no existe un control riguroso en el país respecto al cumplimiento de la legislación vigente, por lo que la gestión de los residuos orgánicos en general y en concreto de los agroindustriales no está optimizada (Gavilanes-Terán, 2014). En Ecuador no se dispone de normativas vigentes para la realización de abonos orgánicos, por lo tanto, es necesario tomar en consideración normas y modelos de gestión ambiental internacionales que han marcado pautas trascendentales en el desarrollo sostenible y la mitigación de los impactos ambientales como las siguientes:

El Consejo de Compostaje de EE.UU. indica instrucciones de usos de compost, incluyendo valores límite de determinados parámetros dependiendo del empleo que se quiera dar al compost. En la tabla 2 se indican el intervalo de valores adecuado de diferentes parámetros para diversas aplicaciones de compost municipales y condiciones medias de campo (US Composting Council, 2001).



Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya

Tabla 2 Requisitos para diversas aplicaciones de compost municipales y condiciones medias de campo, según el Consejo de Compostaje de EE.UU.

Parámetro	Directrices del Consejo de Compostaje de EE.UU.
Mat. Orgánica (% sobre m.s.)	50-60
Nitrógeno total (g/kg m.s.)	≥ 10
Fósforo (g/kg m.s.)	≥ 10
<b>Metales pesados (mg/kg m.s.):</b>	
Cadmio	39
Cromo (total)	1200
Cobre	1500
Mercurio	17
Níquel	420
Plomo	300
Zinc	2800
Selenio	100
Arsénico	41

Fuente: (US Composting Council, 2001)

Por otra parte, la Comisión Europea incentiva el uso de tratamientos biológicos a residuos orgánicos, para de esta manera prevenir o reducir cualquier los impactos ambientales negativos al medio ambiente, garantizando un alto nivel de protección del medio ambiente, protección del recurso suelo y el uso de residuos en beneficio de la agricultura, garantizando así la salud animal y vegetal, regulando el uso de residuos biológicos tratados y sin tratar. En el documento: "End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost and digestate): Technical proposal, EC JRC 87124" (European Commission, 2014), propone parámetros indicativos de calidad para composts producidos. En este documento se indican contenidos mínimos de materia orgánica, límites de contaminantes orgánicos, entre otros (ver Tabla 3).

Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya

Tabla 3 Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto como compost según el informe final sobre criterios europeos para compost y digeridos.

<b>Parámetro</b>	<b>Informe Final sobre Criterios Europeos para Compost y Digeridos</b>
<b>Materia Orgánica mínima (% s.m.s.)</b>	15
<b>Estabilidad mínima:</b>	
<b>Índice respirométrico:</b>	< 25mmol O <sub>2</sub> /kg MO/h
<b>Test de autocalentamiento:</b>	Temperatura < 30°C por encima de la temperatura ambiente
<b>Metales Pesados (mg/kg m.s.)</b>	
Cadmio	1,5
Cromo	100
Cobre	200
Mercurio	1
Níquel	50
Plomo	120
Zinc	600
<b>Contaminantes orgánicos:</b>	
HAPs (mg/kg m.s.)	6
<b>Microorganismos:</b>	
Salmonela spp	Ausentes en 25g de compost
E. Coli	<100 UFC/g
Semillas de malas hierbas	<2 semillas/L
Impurezas (%)	<0,5 (>2mm)

HAPs: Hidrocarburos aromáticos policíclicos UFC: Unidades formadores de colonias

Fuente: (European Commission, 2014)

### 1.3.6. Compostaje de residuos orgánicos de origen agrícola y ganadero

Varios estudios se han realizado sobre el compostaje de mezclas de residuos orgánicos y estiércoles. En un estudio realizado por Bustamante y col., (2008) se estudió la viabilidad del reciclaje de los residuos sólidos generados por la industria de la destilería por medio del co-compostaje con estiércol de animales, así como evaluar la calidad de los composts obtenidos. Para la investigación se instauraron dos pilas de compostaje, utilizando orujo desalcoholizado de uvas y estiércol de ganado o estiércol de aves de corral (en proporciones, de 70 % orujo desalcoholizado + 30 % de estiércol, respecto a peso fresco), los residuos fueron compostados mediante el sistema Rutgers. Se controlaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, cantidad de materia orgánica, carbono soluble en agua, polifenoles solubles en agua, diferentes formas de nitrógeno (nitrógeno orgánico, nitrógeno en forma de amonio y nitrato), índices de humificación, capacidad de intercambio catiónico, así como el índice de germinación. La degradación de la materia orgánica siguió una ecuación cinética de primer orden en ambas pilas, en los residuos agotados de uva y estiércol de vaca se evidenció la más alta

tasa de mineralización de la materia orgánica. Se produjo un aumento de la capacidad de cambio catiónico, lo que reveló la humificación de la materia orgánica durante el compostaje. Hubo participación de ventilación bajo demanda, a través del control de temperatura por retroalimentación, que mantuvo una temperatura máxima en la pila de 55 °C. El aire fue soplado desde la parte inferior de la pila por agujeros realizados en tres tubos de PVC de longitud 3m y 12cm de diámetro. Ambas pilas mostraron una tendencia de la temperatura de compostaje típica, lograron temperaturas termófilas (>40°C) durante las primeras dos semanas de compostaje; y el mantenimiento de la fase termofílica estuvo en el intervalo de duración de 76-122 días para las pilas de compostaje.

Otra investigación realizada por Gao y col. (2010) examinó parámetros fisicoquímicos y biológicos con el fin de evaluar la estabilidad y madurez del producto de compostaje de gallinaza mezclada con diferentes cantidades de serrín mediante aireación forzada. Se establecieron relaciones Corg/NT iniciales de 12, 18 y 28. En todas las pilas se empleó el mismo sistema de compostaje, que fue mediante aireación forzada. El proceso de compostaje de cada mezcla fue llevado a cabo en reactores con volumen de 600 L y con dimensiones de 80 cm de largo, 72 cm de ancho y 132 cm de alto, llenados con las mezclas de compostaje estudiadas. Una placa perforada de PVC se utilizó en la parte inferior de cada reactor para distribuir el aire mediante un soplador. También, estos reactores estuvieron provistos de un controlador combinado de tiempo y temperatura, que controló la aireación. Los resultados mostraron que la mezcla de compostaje con relación Corg/NT inicial de 28 mantuvo la temperatura inferior o igual a 55°C durante más de 3 días, a diferencia de las mezclas de compostaje con relaciones iniciales de Corg/NT de 12 y 18 que no alcanzaron esta temperatura durante este periodo. La conductividad eléctrica final en las tres mezclas de compostaje no superó el valor límite de 3 dS m<sup>-1</sup> para compost estables. El índice de germinación final en la mezcla de compostaje con relación Corg/NT inicial de 28 fue del 94%; sin embargo, los índices de germinación en las mezclas con relación inicial Corg/NT de 12 y 18 nunca fueron mayores del 80%. La estabilidad y la madurez en la mezcla de compostaje con relación inicial Corg/NT de 28 fueron superiores a las de las mezclas de compostaje con relación inicial Corg/NT de 12 y 18.

También, la aireación forzada o pasiva se han investigado por varios autores como Cayuela y col., (2006) al compostar residuos de almazara con estiércol de oveja y tallos de uva, empleando dos diferentes sistemas de aireación: aireación forzada y volteo de hileras de compostaje. El objetivo fue determinar la tecnología más adecuada para el compostaje de estos materiales. La eficiencia de cada método de aireación se evaluó mediante el monitoreo de la evolución de parámetros como la temperatura, la biodegradación de fracciones de materia orgánica (carbohidratos, lípidos, fenoles, lignina, celulosa y hemicelulosa) y la pérdida de nitrógeno. Además, la calidad de los composts finales se comparó en términos de sus principales características químicas como pH, conductividad eléctrica, grado de polimerización, grado de humificación e índice de germinación, etc. El estudio reveló que la aireación forzada de la pila estática presenta varios inconvenientes para el compostaje de los residuos de almazara de dos

fases debido a sus propiedades físicas. Se requirieron varios volteos para evitar la formación de flujos de aire preferenciales, la compactación y el secado heterogéneo del material. Las pilas volteadas mostraron una fase termófila más larga, lo que conduce a una mayor degradación de las fibras y una mayor pérdida de nitrógeno. La calidad de los productos finales obtenidos por ambos métodos fue bastante similar, aunque la materia orgánica de los compost preparados por hileras de hileras tuvo un mayor grado de humificación.

Ogunwande y Osunade (2011) realizaron un estudio de compostaje con aireación pasiva para investigar los efectos de la orientación de la tubería de aireación y el tamaño de perforación de los orificios en algunas propiedades físico-químicas de una mezcla estiércol de gallinas + aserrín durante el compostaje. Las propiedades monitoreadas durante el compostaje fueron la temperatura de la pila, el contenido de humedad, el pH, la conductividad eléctrica, el carbono total, el nitrógeno total y el fósforo total. Los resultados mostraron que las condiciones óptimas de compostaje (temperaturas termófilas y requisitos de saneamiento) se lograron en todas las pilas. Durante el compostaje, las distintas configuraciones de las tuberías afectaron significativamente la temperatura de la pila, su nivel de humedad, el pH, y las pérdidas de carbono. Una tubería vertical fue efectiva para la distribución uniforme del aire, por lo tanto, la tasa de compostaje uniforme dentro de la pila de compostaje. En conclusión, los efectos combinados de sistemas de aireación horizontal pasiva tanto verticales como horizontales fueron efectivos para minimizar las pérdidas de nitrógeno.

Otro estudio fue realizado por Hachicha y col., (2009), los cuales compostaron orujo de oliva desengrasado, estiércol de aves de corral y residuos vegetales agrícolas. Los desechos sólidos orgánicos fueron regados con aguas residuales procedentes de la industria de confitería, con un alto contenido de azúcares residuales. Cuatro pilas de compostaje aireadas se montaron para el proceso de compostaje. Diferentes mezclas de los residuos anteriormente citados fueron utilizados. Se evaluaron diversos parámetros físico-químicos. La estabilidad del sistema biológico se observó después de 70 días. Los composts finales presentaron un contenido de materia orgánica relativamente alto y una baja relación Corg/NT (de 14 a 17). La humidificación de las pilas con las aguas residuales aceleró el proceso de compostaje en comparación con la pila humedecida con agua. Además, se evidenció que el porcentaje de degradación de la materia orgánica presentó valores de 55-70%. Las pilas se voltearon mecánicamente para la aireación cuando la temperatura interna superó los 55 °C. Se observaron tres etapas en todas las pilas. En la primera etapa, un aumento de temperatura desde 30 a 45°C dentro de 15 días. Entonces, comenzó la etapa termófila y la temperatura aumentó rápidamente hasta llegar a cerca de 55°C. Por lo tanto, se procedió a voltearlas y la aireación producida por el volteo de las pilas y su humidificación causaron disminución de la temperatura, que luego inmediatamente volvió a aumentar a causa de la actividad bio-oxidativa. Esta etapa se mantuvo alrededor de 30 días. Por último, como la materia más fácilmente biodegradable fue degradada, la actividad microbiana se hizo menos intensa, provocando una disminución de la temperatura. Esto hizo que la temperatura disminuyera hasta valores próximos a la temperatura ambiente. La etapa de maduración

final requirió varias semanas. Todos los compost mostraron un contenido orgánico considerable (> 65%). Además, las cuatro pilas experimentales tuvieron tendencias similares de las variaciones del pH durante el proceso de compostaje. Al principio, el pH oscilaba entre valores de 7,5 y 9,0. Entonces, después de la primera semana, el pH se redujo debido a la biodegradación heterogénea del sustrato y a la formación de compuestos con grupos carboxílicos y fenólicos. A continuación, los valores de pH se incrementaron durante la etapa termófila con la producción de amoníaco, como consecuencia de la degradación de proteínas. La aplicación del compost obtenido al suelo mejoró significativamente su fertilidad.

El proceso de compostaje con pilas estáticas con aireación forzada actúa más rápido que la ventilación natural en la maduración del compost (Stentiford, 1996), también se considera un método para reducir las pérdidas de nitrógeno por volatilización (Sánchez-Monedero y col., 2001), aunque presenta desventajas con respecto a la limitada homogenización de la pila y la formación de estratificaciones térmicas en comparación con el sistema abierto de pilas con volteo manual. Por otro lado, los principales inconvenientes de este sistema de compostaje son controlar la temperatura y la pérdida de nitrógeno durante el proceso (Cayuela y col., 2006; Getahun y col., 2012).

Comparaciones entre estos dos sistemas de compostaje fueron realizadas por Larney y col., (2000), quienes encontraron cambios mayores en las propiedades del estiércol de vaca cuando fue compostado mediante el sistema de aireación forzada. Sin embargo, en otros experimentos con gallinaza, el sistema de ventilación por volteos fue más eficaz en la conservación de nitrógeno y en el mantenimiento de altas temperaturas que el sistema de aireación forzada y una combinación de ambos (Fernandes y Sartaj, 1997; Sartaj y col., 1997). (Lopez-Real, 1990) estudió una combinación de métodos de compostaje que incluyó aeración forzada y volteo de pilas, resultando ser una opción efectiva para alcanzar una elevada reducción de volumen en las mezclas de diferentes residuos. Se han llevado a cabo una amplia variedad de estudios sobre métodos de aireación para el proceso de compostaje, pero pocos se han centrado en uno de dichos métodos.

## 2. OBJETIVOS

En este trabajo se plantea como objetivo fundamental la comparación de diferentes sistemas de aireación (por volteos y aireación forzada combinada con volteos) para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya, realizándose esta comparación desde el punto de vista de la evolución del proceso, del valor agronómico y económico del compost y del impacto medioambiental.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos concretos:

- Caracterizar los materiales iniciales, residuos vegetales y estiércol de cobaya, empleados para la elaboración de los compost.
- Determinar parámetros físico-químicos, químicos y biológicos en las muestras de compost tomadas durante el proceso de compostaje. De esta manera, se podrá estudiar la evolución del proceso.
- Evaluar la calidad de los compost obtenidos para establecer el grado de humificación y estabilización de su materia orgánica y su riqueza en nutrientes para plantas.
- Establecer el valor económico de los nutrientes contenidos en los compost.
- Estimar el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta el sistema de aireación empleado.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El presente TFM tiene carácter experimental y pretende establecer una comparación entre dos sistemas de compostaje, compostando residuos agrícolas y ganaderos provenientes de la Finca La Inmaculada del cantón Guano en la provincia de Chimborazo.

La georeferenciación del cantón se indica en la siguiente figura:

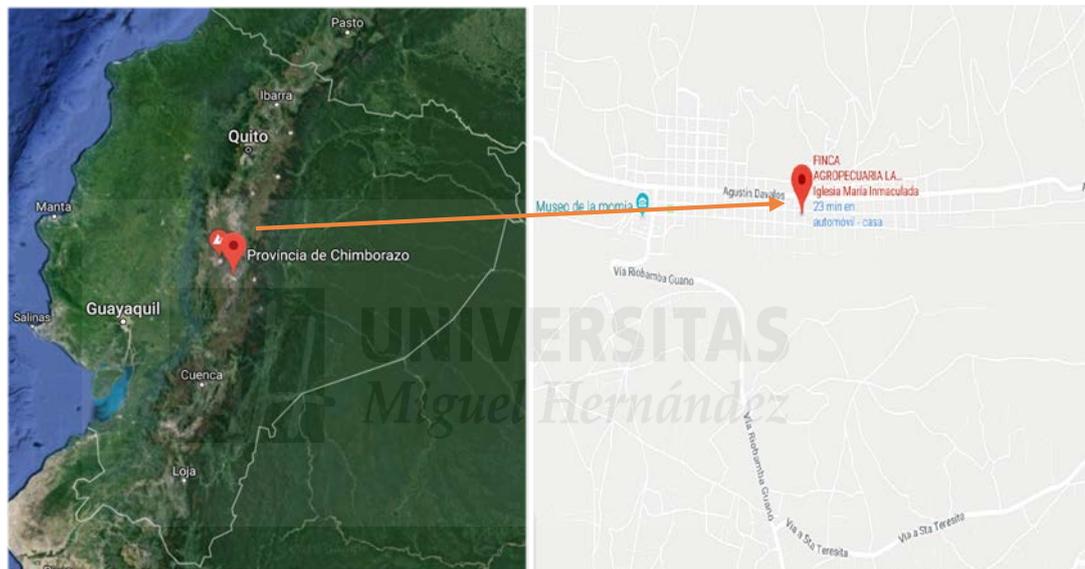


Figura 7 Georeferenciación del lugar de investigación: cantón Guano, Provincia de Chimborazo. Fuente (Google Maps)

Para esta investigación se determinaron las siguientes variables experimentales:

#### Variables dependientes

- Calidad, valor económico e impacto ambiental de los compost en función del sistema de compostaje empleado

#### Variables independientes.

- Parámetros físico-químicos, químicos y biológicos de los compost.

En este trabajo experimental se estudiaron dos técnicas para co-compostar residuos hortícolas y estiércol de cobaya. La primera mediante el uso de pilas móviles con aireación periódica mediante volteos y la otra con el sistema combinado de aireación forzada y volteos periódicos, para obtener un producto final estabilizado, humificado y

con valor añadido y comparar ambas técnicas desde una perspectiva medioambiental, económica y de calidad del compost obtenido.

Para ello, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 4 fases

- Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.
- Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.
- Fase 3: Desarrollo de los sistemas de compostaje sobre dos pilas, la primera mediante el uso de pilas móviles con aireación periódica mediante volteos, y la otra con el sistema de aireación combinado de volteos periódicos y aireación forzada.
- Fase 4: Análisis de las características físico-químicas, químicas y biológicas de los materiales a compostar durante el proceso, así como del producto final obtenido.

#### **Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar**

En primera instancia se desea conocer las características de los diferentes residuos vegetales y estiércol de cobaya, con el fin de establecer una estrategia de compostaje adecuada en función del tipo de materiales utilizados.

En este estudio se caracterizaron dos tipos diferentes de residuos:

- Residuos vegetales: residuos de origen vegetal procedentes de la actividad agrícola realizada en una finca agropecuaria del cantón Guano, en la provincia de Chimborazo. Se utilizó una mezcla homogénea de restos de cosecha de higos, maíz, restos de poda, duraznos, limón, tocte y zambo, entre otros, adecuando el tamaño de partículas para cada residuo a valores entre 1 cm y 5 cm.
- Estiércol de cobaya: el estiércol que resulta de la crianza de este animal en la finca agropecuaria La Inmaculada posee un valor agronómico importante por sus contenidos de macronutrientes (N,P,K) y MO, pudiendo usarse como enmienda orgánica.

Muestreo de los materiales iniciales: Las muestras se recolectaron directamente de los residuos dejados en las parcelas de cultivo de la finca ubicada en el cantón Guano. De cada residuo se procedió a tomar una muestra a través del método de cuarteo hasta obtener una muestra significativa de 2 kilogramos para su análisis inicial en el laboratorio.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar

Para garantizar un correcto desarrollo del proceso es necesario que la mezcla de materiales a compostar cumpla con ciertas características físicas, físico-químicas y químicas que condicionan el proceso. Por esta razón, en las pilas de compostaje elaboradas, se buscó conformar una mezcla inicial con adecuada porosidad y relación Corg/NT.

Fase 3: Desarrollo de dos sistemas de compostaje mediante dos pilas de tipo experimental, una usando el sistema de pilas móviles con aireación periódica mediante volteos y la otra con el sistema combinado que asocia volteos periódicos con aireación forzada.

Una vez establecida la mezcla inicial de materiales a compostar, se desarrollaron los sistemas de compostaje, garantizando las condiciones óptimas para el desarrollo del proceso para cada mezcla y sistema de compostaje.

Fase 4: Análisis de las características físico-químicas, químicas y biológicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido (compost)

En las muestras de los materiales iniciales se determinó:

- Humedad: H (%)
- Materia orgánica: MO (%)
- Carbono orgánico: Corg (%)
- Nitrógeno total: NT (%)
- Relación Carbono Nitrógeno: Corg/NT
- Macro y micronutrientes y metales pesados: P, Na, K, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Cd, Pb

Se estudió la evolución de la mezcla durante todo el proceso hasta la obtención del compost maduro, monitoreando diferentes parámetros definidos como indicativos del proceso de compostaje para cada sistema, se consideraron los siguientes:

- Asociados al propio proceso de compostaje: humedad, aireación y temperatura.

- Asociados a la evolución de la materia orgánica: Pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.
- Asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: carbono orgánico hidrosoluble, polifenoles solubles, pH y conductividad eléctrica.
- Asociados a la madurez del compost: índices de humificación e índice de germinación.
- Asociados a la presencia de diferentes componentes: nutrientes para plantas y metales pesados.

## 3.2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

### 3.2.1. Características de los residuos utilizados

En el presente trabajo se utilizaron dos tipos de residuos diferentes, residuos vegetales y estiércol de cobaya, cuyo origen fue el siguiente:

1. Residuos vegetales: una mezcla homogénea de restos de cosecha de higos, maíz, restos de poda, duraznos, limón, tocte y zambo, entre otros que proceden de la cosecha de los productos cultivados en la Finca Agropecuaria La Inmaculada, como se ha comentado anteriormente.
2. Estiércol de cobaya: resultante de la crianza de este animal sobre una cama de paja.

Las principales características de los residuos utilizados se exponen en la Tabla 4

*Tabla 4 Características físicas y físico-químicas de los materiales iniciales*

<b>PARAMETROS</b>	<b>RESIDUOS VEGETALES</b>	<b>ESTIÉRCOL DE COBAYA</b>
<b>Corg (%)</b>	36,0	48,8
<b>Nt (%)</b>	0,53	2,62
<b>Corg/Nt</b>	67,9	18,6
<b>HUMEDAD (%)</b>	77,1	50,4
<b>MATERIA SECA (%)</b>	22,9	49,6
<b>P(g/kg)</b>	3,72	5,80
<b>Na(g/kg)</b>	0,87	2,06
<b>K(g/kg)</b>	29,6	34,2
<b>Cr (mg/kg)</b>	nd	nd
<b>Mn (mg/kg)</b>	67	40
<b>Fe (mg/kg)</b>	1130	560
<b>Ni (mg/kg)</b>	2,43	0,73
<b>Cu (mg/kg)</b>	10	9
<b>Zn (mg/kg)</b>	15	83
<b>Se (mg/kg)</b>	0,08	0,32
<b>Cd (mg/kg)</b>	0,04	0,05
<b>Pb (mg/kg)</b>	0,69	0,71
<b>Nitratos (mg/kg)</b>	2415	3531
<b>Sulfatos (mg/kg)</b>	42	31
<b>Cloruros (mg/kg)</b>	17695	20054

nd: no detectado



### 3.2.2. Dispositivos de compostaje utilizado

El estudio de los procesos de compostaje mediante los dos sistemas descritos se desarrolló en la finca agropecuaria “La inmaculada” del cantón Guano de la provincia de Chimborazo. En un terreno de esta se realizó la construcción de una estructura diseñada para proteger a las pilas de compostaje de la exposición directa a factores climáticos que podrían afectar el correcto desarrollo del proceso (Figura 8).



*Figura 8 Estructura de protección de las pilas de compostaje de factores climáticos*

Se compararon dos sistemas distintos, para esto, con los residuos triturados se construyeron dos pilas con igual composición, una de ellas se trató mediante el sistema de ventilación por volteos y la otra con el sistema combinado de volteos y de aireación forzada. Para el montaje de las pilas se utilizó un tractor de carga frontal, también herramientas como rastrillos, machetes, palas, lonas, entre otras. Se colocó el material a compostar sobre el terreno y debajo de la estructura de protección en capas intercaladas de residuos orgánicos vegetales y estiércol de cobaya. Las pilas de compostaje mencionadas se construyeron sobre dos distintos sistemas de compostaje: Pila compostada mediante el sistema de pilas móviles con aireación periódica mediante volteos (windrow en inglés) (PW): Esta pila se construyó directamente sobre el terreno destinado a la zona de compostaje de las pilas, en el mismo no se utiliza el dispositivo para la aireación de la mezcla de materiales, la aireación en esta pila estará garantizada mediante volteos periódicos, que se darán simultáneamente para ambas pilas de compostaje.

Pila compostada mediante el sistema combinado que asocia volteos periódicos con aireación forzada (PR): Se instaló sobre el terreno una red de tubos de PVC hidráulico de 4 pulgadas de diámetro, unidos entre sí a una entrada común de tubería acoplada a un soplador que distribuye el aire a través de las tuberías que tuvieron perforaciones con diámetros de 5 mm separados a una distancia de 10 cm entre cada una, de esta manera se asegurará la circulación uniforme del aire por toda la tubería, en 2 periodos de 30 minutos distribuidos a lo largo del día (por la mañana y por la tarde) según las recomendaciones de Isaza-Arias y Laines-Canepa (2009). El aire se distribuyó ubicando sobre las tuberías una capa de agente estructurante para facilitar la circulación de aire a través de la mezcla de materiales (El agente estructurante en la construcción de estas pilas fueron las dos primeras capas consecutivas de residuos vegetales en la parte inferior de la pila, que confieren estructura y gracias a su alta porosidad proporcionaron intersticios para que el aire impulsado por el soplador fluyera a través de toda la pila). El sistema de ventilación estuvo controlado mediante un dispositivo diseñado que suministró a la pila un caudal de aire constante en periodos determinados mediante un soplador de ¼ HP (caballos de fuerza), que provee una tasa de aireación de  $0,6 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$ . Esta tasa de aireación se propuso previamente como una tasa óptima para la fracción orgánica de RSU en Teherán, Irán por (Rasapoor y col., 2009; Rasapoor y col., 2016). También se dispuso de un sistema de riego por aspersión manual para regar la

pila una vez conformada y también periódicamente, controlando así la humedad y garantizando niveles adecuados de la misma (40-60%) para evitar la inhibición de la actividad microbiana.

Una vez elaboradas las pilas de compostaje se controló diariamente la temperatura, humedad, temperatura ambiental y humedad ambiental, todos parámetros indicativos del desarrollo del proceso de compostaje con sondas termohigrómetras. Con este tipo de sonda se tomó la temperatura y la humedad en 5 puntos diferentes de la pila para obtener un promedio de datos representativos, reportándolos diariamente en una hoja de cálculo.

Ambos sistemas de compostaje garantizaron la oxigenación de la mezcla de materiales a compostar. En el primer sistema, el suministro de aire después de cada volteo se realizó de manera natural por convección dentro de la pila, mientras que en el segundo se forzó la entrada de aire al interior de la pila en periodos determinados.

En ambas pilas se realizaron volteos periódicos para proporcionar el oxígeno necesario en el caso de la pila PW y con el fin de acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica en el caso de PR. Una vez finalizada la etapa bio-oxidativa (82 días), las pilas se dejaron madurar en reposo, por un periodo de aproximadamente dos meses (62 días).

### 3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este apartado se comentan los pasos seguidos en el experimento, como la preparación de la mezcla a compostar, la conformación de las pilas de compost para ambos sistemas de compostaje y su seguimiento analítico a lo largo del tiempo de compostaje. Podemos considerar los siguientes pasos:

**1. Cálculo y preparación de las mezclas:** Para este experimento se deseó alcanzar en la mezcla inicio una relación Corg/NT entre 25 y 35. Para ello, se determinaron las cantidades necesarias a mezclar de los dos residuos (residuos vegetales y estiércol de cobaya), obteniéndose una relación Corg/NT de 28,9. Este cálculo se realizó mediante las expresiones:

Ecuación 1 
$$P = A + B$$

Ecuación 2 
$$C/N = \frac{(A*\%C_A*\%MS_A)+(B*\%C_B*\%MS_B)}{(A*\%N_A*\%MS_A)+(B*\%N_B*\%MS_B)}$$

Donde:

P= Peso total de la pila, en kg.

A=Peso del componente A, en kg.

B=Peso del componente B, en kg.

MS= Materia seca

En la siguiente tabla se expone la proporción de cada componente en la mezcla en peso fresco.

*Tabla 5 Proporción de cada componente de las pilas de compostaje*

<b>PILA DE COMPOSTAJE</b>	<b>% RESIDUOS VEGETALES</b>	<b>% ESTIERCOL COBAYA</b>
<b>PW</b>	76%	24%
<b>PR</b>	76%	24%

*PW: Pila compostada mediante el sistema Windrow de pilas móviles con aireación periódica mediante volteos; PR: Pila compostada mediante el sistema combinado de volteos periódicos con aireación forzada*

Se conformaron las pilas de compostaje colocando un 76% de residuos vegetales y 24% de estiércol de cobaya respectivamente, iniciando la etapa bio-oxidativa del proceso de compostaje. Se procedió a muestrear los mismos, para su posterior caracterización inicial, fueron pesados en una báscula, y posteriormente homogenizados en tandas manualmente con ayuda de palas. Las pilas de compost se conformaron en capas intercaladas de residuos orgánicos vegetales y estiércol, para que la mezcla resultante fuese homogénea. Se realizó un primer volteo para homogenizar, en el mayor grado posible las mezclas.

Se formaron dos pilas trapezoidales con dimensiones de 3 metros de base 2 metros de ancho y 1,5 metros de altura aproximadamente. El peso de cada pila fue de 1000 kg, 760 kg de residuos vegetales (reduciendo su tamaño de partícula a diámetros entre 1 y 5 centímetros) y 240 kg de estiércol. Las pilas se humedecieron con agua potable de la red de agua del cantón Guano (Chimborazo).

**2. Seguimiento del proceso de compostaje:** Una vez establecidas las pilas de compostaje, se controlaron la temperatura y la humedad, con el fin de darle un seguimiento al proceso en ambas pilas, como se indica a continuación:

Temperatura: La temperatura se registró a diario, mediante la sonda de temperatura y siempre a la misma hora del día (en la mañana). Se tomó la temperatura en tres puntos a lo largo de la sección longitudinal de la pila. La temperatura se tomó a una altura que correspondía con el centro de la masa en cada pila.

Humedad: La humedad se controló mediante una sonda de humedad de sustratos. Cuando la medida de la humedad se registró como insuficiente la pila se regó hasta alcanzar la humedad adecuada, evitando en la medida posible la formación de lixiviados.

Cuando la temperatura fue cercana a la ambiental y no se observó reactivación tras el volteo, la fase bio-oxidativa se consideró finalizada. Esta fase duró 82 días en ambas pilas. Luego se desmontó el sistema de aireación forzada en la una pila de compost, (cuyo volumen se había reducido al igual que la otra), y finalmente ambas pilas entraron en la fase de maduración que duró aproximadamente 2 meses (62 días).

El muestreo de las pilas de compostaje se realizó de la siguiente manera en ambos sistemas de compostaje:

Muestreo inicial: Se tomó una muestra inicial de la mezcla preparada el primer día.

Muestreo etapa termófila: Se tomaron muestras durante la etapa termófila de ambos procesos, coincidiendo cada muestreo con el volteo de la pila, garantizando que la muestra sea lo más representativa de toda la pila de compostaje, en la pila con aireación forzada+ volteo se tomaron muestras los mismos días que en el caso de la pila por volteo para hacer la comparación de ambos procesos en los mismos días de compostaje. El muestreo fue realizado con siete submuestras de siete puntos diferentes de la pila de compostaje, a tres distintas profundidades, mezclándolas y luego homogenizándolas, de esta manera se aseguró la representatividad de la muestra.

Muestra final de la etapa bio-oxidativa: Se tomó una muestra al final de la etapa bio-oxidativa a los 82 días de iniciado el proceso de compostaje.

Muestra final de la etapa de madurez: Se tomó una muestra al final de la etapa de madurez, a los 144 días de iniciado el proceso de compostaje.

Se realizaron volteos de las pilas en las fechas establecidas para cada muestreo, para airear y homogeneizar la pila.

Las fechas de los muestreos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6 Fechas de los muestreos realizados durante el experimento

MUESTREO	ETAPA	FECHA
CPW-01; CPR-01	Inicial	01-07-2017
CPW-02; CPR-02	Termófila	16-07-2017
CPW-03; CPR-03	Termófila	01-08-2017
CPW-04; CPR-04	Termófila	17-08-2017
CPW-05; CPR-05	Termófila	05-09-2017
CPW-06; CPR-06	Final etapa bio-oxidativa	21-09-2017
CPW-07; CPR-07	Madurez	22-11-2017

### 3.4. PARAMETROS ANALIZADOS Y MÉTODOS UTILIZADOS

Los siguientes análisis se realizaron en el Laboratorio de Biotecnología, Química Analítica, Química Industrial y Operaciones unitarias de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador), y en el Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente de la Universidad Miguel Hernández de Elche (España).

- Humedad original. Se calculó el porcentaje de agua respecto a la muestra fresca mediante la diferencia de peso entre el material húmedo y el secado a 105°C.
- Pérdida de peso por calcinación. Se determinó siguiendo el método de (Navarro y col., 1993).
- Pérdidas de materia orgánica. Se calculan mediante la diferencia de pesos entre el contenido de materia orgánica y cenizas en la muestra inicial, con respecto a la muestra tomada, de acuerdo con la ecuación de (Viel y col., 1987).
- Determinación del pH. El pH se midió en suspensión acuosa 1:10 sólido/líquido con un pH-metro.
- Determinación de la conductividad eléctrica. Se determina sobre la suspensión acuosa anterior con un conductímetro.
- Carbono orgánico total y nitrógeno total. Se realizaron en laboratorios mediante los métodos reportados por (Walkley y Black, 1934) y (Bremner, 1965) respectivamente.
- Mineralización de la muestra. Se realizó una digestión húmeda nítrico-perclórica de las muestras según el método establecido por (Abrisqueta y Romero, 1969)
- Fósforo total. Se determinó mediante la medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato

molibdato amónico obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización (Kitson y Mellon, 1944).

- Sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, manganeso, zinc, níquel, cromo, cadmio y plomo totales. Se determinaron en disoluciones adecuadas sobre un extracto de digestión nítrico-perclórica, usando un espectrómetro de masas atómicas de plasma de acoplamiento inductivo.
- Índice de germinación (IG). Se determinó usando semillas de *Lepidium sativum* L. según la técnica reportada por (Zucconi y col., 1985).
- Carbono extraíble. Se determinó sobre una extracción de la muestra con hidróxido sódico (Cegarra y col., 1974) 0,1 M en la proporción 1:20, se analizó el carbono extraído en un analizador elemental, según la técnica de (Sánchez-Monedero y col., 1996).
- Carbono hidrosoluble. Se realizó la extracción del carbono hidrosoluble con agua desionizada, y se analizó de la misma manera que para el carbono extraíble.
- Polifenoles solubles. Se determinaron por medio de una modificación del método Folin, en una extracción acuosa con relación 1:20 (Beltrán y col., 1999).
- Fraccionamiento del carbono de ácidos húmicos y fúlvicos. Se determinaron en un extracto acuoso de hidróxido sódico, donde se precipitaron los ácidos húmicos y así se separaron de los ácidos fúlvicos presentes en la muestra (Cegarra, 1978).

Los métodos analíticos empleados se muestran en detalle en el ANEXO I.

### 3.5. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Las diferencias significativas entre los valores de cada parámetro estudiado para cada pila durante el compostaje se calcularon mediante la diferencia mínima significativa (DMS) a  $P < 0.05$ , utilizando los datos de las réplicas analíticas para cada muestra. Las diferencias en el valor agronómico entre los compost finales se calcularon mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), al nivel de significancia del 5%. En el análisis económico de los compost obtenidos se calculó también el SEE (error estándar de la estimación). Todos estos tratamientos estadísticos de los datos se realizaron con el software estadístico SPSS 22.

La pérdida de MO durante el proceso de compostaje fue ajustada a una ecuación cinética de primer orden (Haug, 1993) usando el software estadístico Sigmaplot 12.0.

La ecuación usada fue  $OM\ loss\ (\%) = A(1 - e^{-kt})$ , donde A es la máxima degradación de la materia orgánica (%),  $k$  es la constante de degradación ( $\text{días}^{-1}$ ) y  $t$  es el tiempo de compostaje (días). Los valores RMS, F y SEE fueron calculados para comparar la significancia estadística.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. EVOLUCIÓN DE LOS FACTORES RELATIVOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE

#### 4.1.1. Temperatura

El seguimiento de la temperatura en el compostaje sirve para evaluar el correcto desarrollo del proceso o detectar cualquier posible alteración del mismo (Meseguer, 2016). Tanto la temperatura como la respiración microbiana medida por la producción de CO<sub>2</sub> se utilizan como parámetros de seguimiento del proceso e indicadores de la estabilidad del producto final (Epstein, 1997).

Un descenso en la temperatura indica un descenso en la actividad microbiana, causado probablemente por la falta de aireación, humedad insuficiente o falta de nutrientes, mientras que un incremento de este parámetro es indicativo del buen desarrollo del proceso aeróbico.

Durante el proceso de compostaje diferentes etapas suelen repetirse luego de cada volteo realizado, ya que los microorganismos, que ahora disponen de nuevo material orgánico para su metabolismo se reactivan y descomponen el material no degradado anteriormente por falta de humedad o por enfriamiento de la masa cercana a la zona de ventilación (Stentiford y col., 1985).

En ambas pilas de compostaje, se registró un rápido incremento de las temperaturas en los primeros días de compostaje, interpretándose como incremento de la actividad microbiana, se alcanzaron temperaturas superiores a los 40°C. Este incremento rápido de temperatura también ha sido observado por otros autores (Vargas-García y col., 2010; Jurado y col., 2014; Gavilanes-Terán y col., 2016; Idrovo-Novillo y col., 2018) durante el proceso de compostaje de residuos vegetales.

El incremento de temperatura fue similar en ambas pilas (Figura 9), sin embargo, en la pila PW se alcanzaron valores iniciales de temperatura superiores en máximo 5°C respecto a la pila PR, posiblemente explicado por los espacios que existen dentro de la pila por el sistema de tuberías que disipan el calor. La pila PW fue la que mayor valor de temperatura alcanzó (58,92°C), sin embargo, la diferencia de temperatura máxima con la pila PR fue mínima (57,94°C). En general, el perfil de temperatura es similar en las dos

pilas estudiadas, por la similitud que presentan en su composición. En cada pila se realizó un total de 5 volteos.

Después de realizar los volteos se observó un aumento significativo en la temperatura en las dos pilas de compostaje, debido a una adecuada oxigenación y una mezcla homogénea de la materia compostada. La etapa termófila se mantuvo por un tiempo aproximado de 15 días hasta el primer volteo en ambas pilas. La fase bio-oxidativa duró aproximadamente 82 días a partir del inicio del compostaje, durante los dos meses siguientes las pilas de compostaje se dejaron madurar (Figura 9).

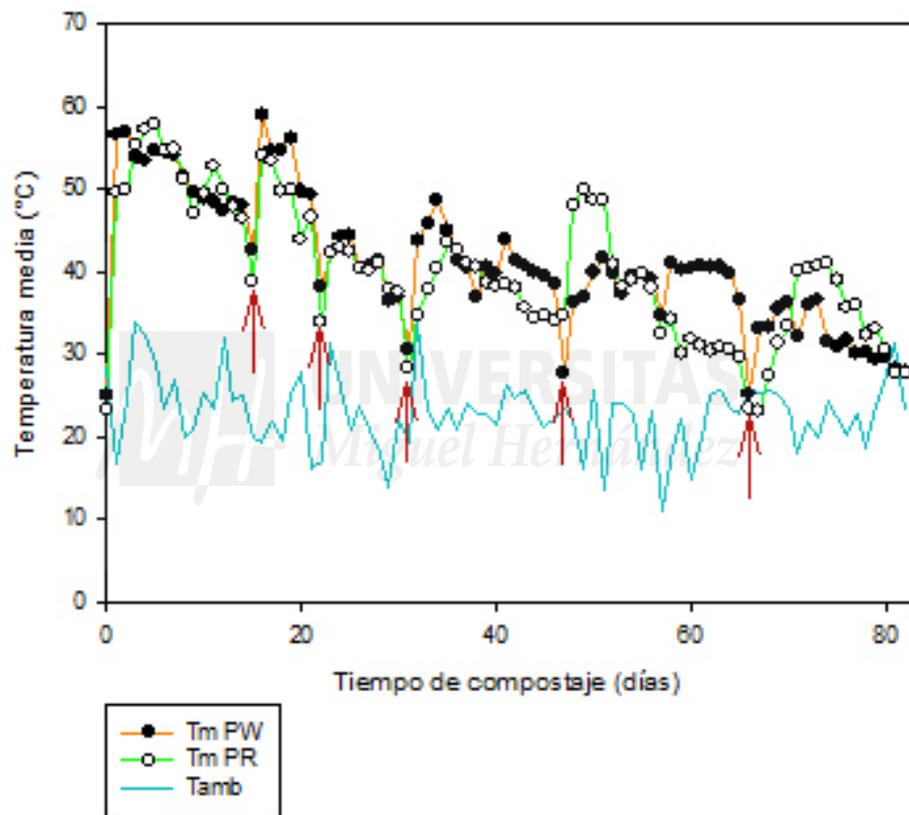


Figura 9 Evolución de la temperatura en las mezclas de compostaje y temperatura ambiental en función del tiempo. Las flechas indican los días de los volteos. (PW (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método Windrow) y PR (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método combinado de volteos y aireación forzada))

#### 4.1.2. Humedad

El control de la humedad garantiza un desarrollo adecuado del proceso de compostaje. Se debe mantener el porcentaje de humedad en valores entre 40-60% (Haug, 1993), para la mayoría de las mezclas de compost, el 60% es el límite superior recomendado para el contenido de humedad, por debajo de un contenido de humedad entre 35 a 40%, las tasas de descomposición se reducen considerablemente y por debajo del 30%

prácticamente se detienen (Cornell Composting, 2001). Demasiada humedad en la mezcla de materiales a compostar conduce a condiciones anaeróbicas y generación de malos olores.

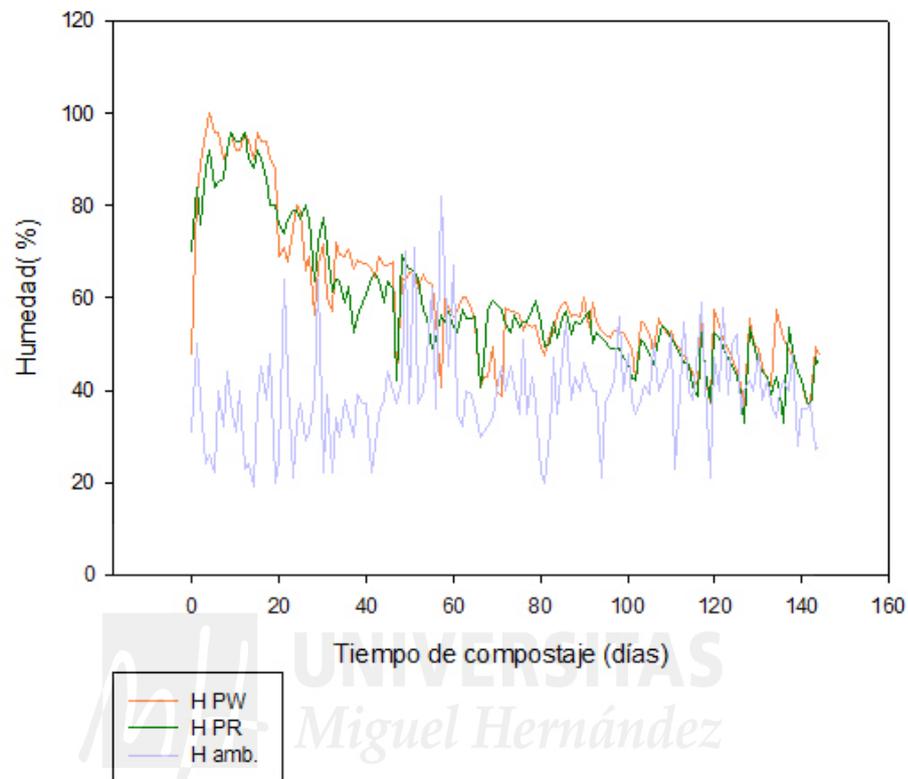


Figura 10 Evolución de la humedad en las mezclas de compostaje y humedad ambiental en función del tiempo. (PW (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método Windrow) y PR (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método combinado de volteos y aireación forzada))

En relación con la humedad ambiente, las pilas de compostaje funcionan como una esponja debido al principio de capilaridad (Pocoví, 2016), por tanto se controló y reportó la humedad ambiental diariamente. No se observó incremento en el contenido de humedad en las pilas debidos a la humedad ambiente, ya que ésta fue menor en la zona geográfica donde se realizó el experimento. Además, para evitar la deshidratación o hidratación excesiva de las mezclas por factores ambientales, ambas pilas se compostaron bajo una estructura tipo invernadero que las protegía del viento y la lluvia.

Las características de la mezcla de los residuos utilizados generan cierta dificultad al mantener una humedad cercana al 55%, como ha reportado (Andreu Amat, 2014). En este experimento, fue necesario realizar riegos periódicos a baja velocidad con la ayuda de un aspersor sobre toda la superficie de la pila de compostaje para poder mantener la

humedad necesaria. A lo largo del proceso de compostaje, en ambas pilas se observó que la mezcla inicial de materiales a compostar presentó valores elevados de humedad entre 70-90%, durante aproximadamente 31 días (ver figura 10), debido a la naturaleza y características iniciales de los residuos a compostar. Sin embargo, esto no fue un factor limitante, ya que la mezcla alcanzó la fase termófila en el mismo periodo, luego se realizaron riegos en ambas pilas de compostaje cuando los valores de humedad fueron inferiores al 50%. La PW fue regada en 11 ocasiones, y la PR en 13 ocasiones a lo largo de todo el proceso de compostaje.

## 4.2. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA Y DE SU FRACCIÓN SÓLIDA

El análisis de la materia orgánica y de su fracción sólida brindan información relacionada con los procesos que tienen lugar durante el compostaje y la actividad microbiana, aunque las variaciones no son tan marcadas ni varían tan rápido (Meseguer, 2016).

### 4.2.1. Pérdida de materia orgánica

Este parámetro es un indicador de la naturaleza orgánica de la mezcla. La concentración de materia orgánica debe ir descendiendo a medida que el tiempo transcurre, por la descomposición que sufre la materia durante la etapa bio-oxidativa.

Los valores de MO determinados en este experimento se muestran en la tabla 8. Como se observa, el contenido de materia orgánica disminuye como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por acción de los microorganismos en ella (Gavilanes-Terán, 2014).

Ambos compost presentaron contenidos de MO que se encontraban dentro del rango recomendado por las directrices estadounidenses (US Composting Council., 2001) (OM = 50-60%), para compost de origen municipal. En relación con este resultado, en este experimento se emplean materiales con un alto contenido de MO (estiércol de cobaya y residuos vegetales).

El contenido de MO decreció con el tiempo de compostaje de 80,1 y 79,5% a 53,3 y 59,4% en las pilas PW y PR, respectivamente. En ambas pilas, entre un 60 y 72% de la MO se perdió durante la fase bio-oxidativa, las pérdidas fueron bajas en la etapa de maduración (Figura 10). Esta estabilidad relativa de las pilas después de las fase bio-oxidativa ha sido reportada también por otros autores ( Paredes y col., 2000;

Bustamante y col., 2008; Gavilanes-Terán y col., 2016; Idrovo-Novillo y col., 2018;) en experimentos de co-compostaje con residuos vegetales y estiércoles.

La pérdida de MO durante el proceso de compostaje en ambas pilas fue ajustada a una ecuación cinética de primer orden, usando la ecuación  $OM\ loss\ (\%) = A (1 - e^{-kt})$ , como se ha indicado anteriormente. Los resultados obtenidos de este ajuste cinético se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores estadísticos para la degradación de materia orgánica de las pilas PW (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método Windrow) y PR (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método combinado de volteos y aireación forzada).

Tiempo (días)	Pila PW	Pila PR
<b>A</b>	72,3	64,2
<b>k</b>	0,0462	0,0338
<b>r<sup>2</sup> ajustado</b>	0,9957	0,9258
<b>RMS</b>	2,9757	39,6677
<b>F</b>	1393,53***	75,83***
<b>SEE</b>	1,73	6,30

\*\*\*: significativo a  $P < 0,001$ )

En ambas pilas, el ajuste de los datos experimentales a la ecuación cinética de primer orden relacionada con la degradación de la MO fue óptimo, teniendo en cuenta la alta significación de F, el valor de  $r^2$  ajustada y los valores del error estándar de la estimación.

Ambas ecuaciones presentaron alta significancia ( $P < 0,001$ ). Sin embargo, los resultados de la pila PW se ajustaron a la ecuación mejor que los resultados obtenidos de la pila PR, como lo muestran los valores más bajos de F y los valores más altos de SEE y RMS en la pila PR.

Los valores de A para ambas pilas de compostaje en este experimento se encontraron sobre el rango de 54,5-83,8% encontrados por diferentes autores ( Paredes y col., 2000; Bustamante y col., 2008; Gavilanes Terán, 2016;) en experimentos donde se co-compostaron residuos vegetales con estiércoles.

Los valores de k en las dos pilas compostadas también estuvieron dentro del rango de valores (0.0085 – 0.0598 días<sup>-1</sup>) reportados por distintos autores (Bernal y col., 1998;

Larney y col., 2000; Paredes y col., 2000; Bustamante y col., 2008; Gavilanes Terán, 2016; Idrovo-Novillo y col., 2018;), en experimentos de co-compostaje con residuos vegetales y estiércoles. Varios autores han indicado que el empleo de sistemas de aireación forzada combinada con volteos incrementa la velocidad de degradación de MO (Stentiford, 1996). Sin embargo, en este experimento, el empleo de estos sistemas de ventilación de forma conjunta disminuyó el valor de A y la velocidad de degradación de la MO, como puede observarse en sus menores valores de k y del producto de A x k.

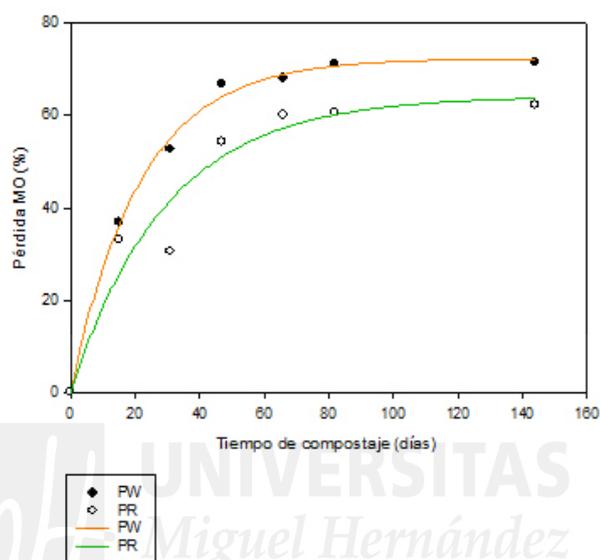


Figura 11 Pérdida de materia orgánica durante el proceso de compostaje de las pilas PW (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método Windrow) y PR (residuos vegetales + estiércol cobaya compostado mediante el método Rutgers). Las líneas representan el ajuste de la curva

Estudio comparativo medioambiental y económico de sistemas de aireación para el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya

Tabla 8 Parámetros relativos a la evolución de la materia orgánica y su fracción sólida durante el proceso de compostaje (peso seco).

Tiempo de compostaje (días)	MO (%)	Corg (%)	Nt (%)	Corg/Nt
<b>PW: Pila compostada mediante el sistema windrow</b>				
0	80,1	47,2	1,99	23,8
15	71,7	42,5	1,99	21,4
31	65,5	41,5	2,06	20,1
47	57,2	32,7	2,12	15,4
66	56,1	30,7	2,08	14,7
82	53,5	29,2	2,00	14,6
Maduro	53,3	26,1	1,73	15,1
DMS	5,8	0,5	0,05	0,2
<b>PR: Pila compostada mediante el sistema de ventilación combinada de volteos y aireación forzada</b>				
0	79,5	46,9	1,91	24,6
15	72,1	43,0	1,97	21,9
31	72,9	41,2	2,26	18,3
47	63,8	37,7	2,33	16,2
66	60,7	36,5	2,37	15,4
82	60,3	34,8	2,26	15,4
Maduro	59,4	34,7	2,39	14,5
DMS	3,8	1,0	0,07	0,3

MO: materia orgánica; Corg: carbono orgánico total; Nt: nitrógeno total; DMS: mínima diferencia significativa

#### 4.2.2. Carbono orgánico total

El contenido de carbono orgánico también disminuye a medida que transcurre el proceso de compostaje, esto sucede como consecuencia de la mineralización del material orgánico causado por los microorganismos que actúan durante el proceso.

Como la tabla 8 muestra, el mayor descenso de Corg se aprecia durante la fase bio-oxidativa, por la elevada actividad microbiana existente en esta etapa. El mayor valor de Corg en los compost finales se observó en la pila PR, en torno al 35%, en la pila PW se obtuvieron valores de Corg cercanos al 26% al final del proceso. Estos porcentajes finales de Corg estuvieron dentro del intervalo de valores reportados por otros autores en diferentes experimentos de compostaje con residuos de diversos orígenes (Larney y col., 2000; Paredes y col., 2002; Meseguer, 2016).

#### 4.2.3. Nitrógeno total

El contenido de nitrógeno en un residuo orgánico compostado es un indicador de su capacidad de fertilización. Se encuentra tanto en forma orgánica como inorgánica (Paredes y col., 2002). Por lo tanto, es importante minimizar al máximo las pérdidas de este elemento, si se desea obtener compost con una elevada capacidad fertilizante y uso agrícola. El nitrógeno se pierde por las emisiones de amoníaco hacia la atmósfera, generándose malos olores en los alrededores de la zona de compostaje, el amoníaco suspendido contribuye a la generación de lluvia ácida, y vuelve a las plantas más susceptibles a enfermedades ( Witter y Lopez-Real, 1988; Meseguer, 2016). La pérdida de materia orgánica producida a lo largo del reduce el peso y volumen de la masa a compostar, y se produce el “efecto concentración”, es decir, a pesar de que se pierde nitrógeno, al final del proceso de compostaje, el compost final presenta concentración de las especies nitrogenadas debido a la reducción en la masa total de la pila ( Said-Pullicino col., 2007; Camiletti, 2016). También puede explicarse por la posible fijación biológica de nitrógeno por parte de los microorganismos, según las condiciones de oxigenación durante el proceso (Paredes y col., 2002).

El contenido de Nt en la pila PW disminuyó a lo largo del proceso, mientras que en la pila PR este parámetro aumentó de 1,91% a 2,39% (Tabla 8) Estos valores muestran que el uso del sistema de aireación forzada combinada con volteos en pilas de compostaje disminuyó las pérdidas de nitrógeno, y produjo un aumento del nitrógeno total final si lo comparamos con la pila PW. Esta diferencia podría explicarse por la disponibilidad de oxígeno, más accesible para la actividad microbiana aeróbica en la pila PR debido a la aireación forzada suministrada a la mezcla, el efecto concentración, la posible fijación biológica del nitrógeno y su liberación cuando los microorganismos mueren, o fenómenos de lixiviación en zonas donde existe compactación parcial del material. El aumento del porcentaje de Nt de la pila a lo largo del proceso de compostaje también ha sido observado por (Getahun y col., 2012; Chen y col., 2015; Camiletti, 2016;). Los contenidos de nitrógeno en los compost obtenidos en el presente trabajo fueron cercanos al 2 %, estos valores son muy inferiores en relación con los observados en compost elaborados con otro tipo de residuos ganaderos, que alcanzaron valores de 3,5% de NT (Bustamante y col., 2013) y otros residuos agroindustriales y estiércoles (Bustamante y col., 2008).

#### 4.2.4. Relación Corg/Nt

La relación carbono orgánico total/nitrógeno total se utiliza como indicador de la evolución de la materia orgánica durante el compostaje, y por tanto de su madurez, ya que representa la pérdida de carbono orgánico por la mineralización de la materia orgánica, y el aumento de la concentración de nitrógeno debido a la pérdida de peso (Montes García, 2015). Al final del proceso, se observa una disminución de este parámetro, con valores prácticamente constantes debido a la estabilización de la materia orgánica.

En la tabla 8 se muestra la evolución de la relación Corg/Nt de las pilas de compostaje. Inicialmente, en ambas pilas, los valores de esta relación fueron cercanos a 24, por debajo del valor establecido para la relación Corg/Nt cuando se calcularon las cantidades de cada residuo en el momento de la preparación de la pila (Corg/Nt= 28,9). Esto es debido a que fue difícil preparar las pilas con exactamente las mismas proporciones de todos los componentes, teniendo en cuenta la gran masa de residuos a mezclar (1000 kg). Además, la superficie del estiércol de cobaya pudo estar más seca que el material interno, lo que agregó un problema adicional con respecto a lograr la misma composición que la establecida inicialmente.

También, en ambas pilas se observó, en general, una disminución de este parámetro en las primeras semanas del proceso, que es cuando se produce mayor degradación de materia orgánica. Después de esta etapa inicial, este parámetro evolucionó sin variaciones muy apreciables hasta alcanzar valores próximos a 15 después de la etapa de maduración. Los valores finales de la relación Corg/Nt de los compost obtenidos (15,09 y 14,53 en los compost PW y PR, respectivamente) mostraron que ambos compost un grado adecuado de madurez, ya que su relación Corg/Nt estuvo por debajo de 20, valor establecido como el indicador estándar de un compost maduro reportado por diferentes autores (Fukumoto y col., 2003; Ogunwande y col., 2008; Seoudi, 2013; Cesaro y col., 2015; Chen y col., 2015) Sin embargo, la relación Corg/Nt no puede ser empleada como un índice de madurez único, ya que varía en función de los materiales de partida como se observa en este experimento, donde a pesar de que se mantienen las mismas proporciones de materiales a compostar en ambas pilas, los valores iniciales de relación Corg/Nt difieren. Por lo tanto, la relación Corg/Nt es más útil para seguir la evolución de las pilas durante el compostaje que para indicar el grado de madurez

alcanzado por los compost (Jiménez y col., 2008; Gavilanes-Terán, 2014; Meseguer, 2016)

#### 4.3. EVOLUCIÓN DE LA FRACCIÓN HIDROSOLUBLE

Este parámetro proporciona información interesante acerca de la evolución del proceso de compostaje, donde ocurren numerosas transformaciones bioquímicas de la materia orgánica, por acción de los microorganismos que se desarrollan en la fase orgánica hidrosoluble. Los microorganismos degradan rápidamente los compuestos orgánicos solubles en agua, mientras que los insolubles necesitan de enzimas microbianas para descomponerse (Meseguer, 2016). Por esta razón, la fracción hidrosoluble del compost maduro obtenido muestra un claro descenso en comparación con la fracción inicial de los residuos a compostar.

##### 4.3.1. pH

La tabla 9 muestra la evolución del pH en ambas pilas a lo largo del proceso de compostaje, en los dos sistemas se observó un incremento de los valores desde 7,9 hasta 9,8, alcanzando valores de pH alcalino que no difirieron significativamente, estando por encima del rango (5.5-8.0) sugerido para la enmienda del suelo en la producción de diferentes cultivos según US Composting Council (2001).

Tabla 9 Parámetros relativos a la evolución de la fracción hidrosoluble

<b>Tiempo de compostaje (días)</b>	<b>pH</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>Chidros (%)</b>	<b>Polif. sol. (mg/kg)</b>
<b>PW: Pila compostada mediante el sistema windrow</b>				
0	8,0	5,86	4,70	9745
15	8,5	5,53	4,66	9470
31	9,7	6,02	6,24	10995
47	9,6	5,26	4,38	8984
66	9,7	5,33	2,75	7517
82	9,7	5,38	1,09	7385
Maduro	9,8	5,38	1,40	6581
DMS	0,2	0,09	0,45	117
<b>PR: Pila compostada mediante el sistema de ventilación combinada de volteos y aireación forzada</b>				
0	7,9	5,24	4,53	8399
15	8,5	4,58	4,33	7131
31	9,4	5,32	5,90	7992
47	9,5	5,22	4,45	7176
66	9,6	5,44	2,66	6767
82	9,7	5,09	1,97	6430
Maduro	9,8	5,83	1,61	6203
DMS	0,09	0,2	0,7	121

CE: conductividad eléctrica; Chidro: carbono hidrosoluble; DMS: mínima diferencia significativa

Ambas pilas registraron un valor de pH inicial alto, dentro del intervalo de valores de pH adecuado (pH=6-9) para el desarrollo de bacterias y hongos encargados de degradar la materia orgánica durante el compostaje (Casco y Bernat, 2008).

El pH de las pilas estudiadas aumentó en la fase bio-oxidativa, produciéndose una estabilización del pH en ambas mezclas al cabo de un mes de proceso de compostaje, también se observó un ligero aumento de los valores de este parámetro al final de la fase bio-oxidativa y durante la etapa de madurez. Este podría estar relacionado con la mineralización de la materia orgánica y la degradación de compuestos ácidos, aminoácidos y degradación de proteínas (Moreno y Moral, 2008). Similares resultados también han sido encontrados por otros autores (Cayuela y col., 2006; Bustamante y col., 2008; Gavilanes-Terán y col., 2016).

#### 4.3.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es un indicador de la salinidad de un compost, generalmente se incrementa a lo largo del proceso de compostaje por la mineralización de la materia orgánica y la concentración de iones causada por la pérdida de peso de la pila ( Wong y col., 1995; Meseguer, 2016). Sin embargo, también puede disminuir por fenómenos de dilución causados por los riegos de las pilas.

En esta investigación los valores de CE (tabla 9) disminuyeron en la pila PW desde 5,86 hasta 5,38, resultados similares fueron reportados por Camileti (2016). En la pila PR se observó un incremento en los valores de CE de 5,24 a 5,83. Los compost maduros obtenidos presentaron valores finales de CE entre 5,38 y 5,83 dS/m, manteniéndose estos valores constantes en la pila PW al final del proceso, sin embargo, en la pila PR durante la etapa de maduración se registró un incremento de la CE. Wong y col. (1995); Bustamante y col. (2008); Ogunwande y col. (2011); Rasapoor y col. (2016) y Gavilanes-Terán y col. (2016) también observaron incrementos en la CE de pilas elaboradas con diferentes residuos en la fase final del proceso.

#### 4.3.3. Carbono hidrosoluble

Se observa reducción de este tipo de carbono debido a la mineralización llevada a cabo por los microorganismos, su incremento causado por la hidrólisis y solubilización de las sustancias orgánicas más complejas (Saviozzi y col., 1986). Se reportaron disminuciones significativas en las pilas PW y PR, fundamentalmente al inicio del proceso, cuando las temperaturas alcanzadas fueron más altas. Este descenso pudo ser causado por procesos de degradación de la materia orgánica más lábil, lo cual ha sido también observado por Bustamante y col. (2008) durante el compostaje de residuos de alcoholera con estiércoles. Como muestra la tabla 9, al final del proceso, ambas pilas mostraron contenidos similares de carbono orgánico hidrosoluble entorno al 1,5% por lo que todos los compost se pudieron considerar maduros según el límite de carbono hidrosoluble establecido por Bernal y col. (1998) para compost con un grado adecuado de madurez ( $C_{hidro} < 1,7\%$ ). Resultados similares fueron reportados por Meseguer (2016) e Idrovo-Novillo y col. (2018) en el compostaje de lodos de depuradora con residuos de palmera y residuos de flores con estiércoles de aves de corral, respectivamente.

#### 4.3.4. Polifenoles hidrosolubles

Los residuos de origen vegetal poseen gran cantidad de polifenoles; que son compuestos fitoquímicos antioxidantes, integrados principalmente por ácidos fenólicos que a concentraciones altas en el compost producen un efecto negativo sobre las plantas, inhibe su capacidad de germinación de semillas (Vodopivec y col., 2006; Mekki y col., 2007) y la inmovilización de nitrógeno en el suelo (Bustamante, 2007). En la presente investigación, la concentración de polifenoles solubles en agua decreció significativamente a lo largo del proceso de compostaje en ambas pilas, alcanzándose un porcentaje de reducción del 32,5% y 26,1% para las pilas PW y PR, respectivamente (Tabla 9). Esto se debe a procesos de polimerización, oxidación de fenoles a compuestos fenólicos de bajo peso molecular y a la descomposición de compuestos fácilmente degradables (Cegarra y col., 2006; Meseguer, 2016).

#### 4.4. EVOLUCIÓN DE LA FITOTOXICIDAD

La presencia temporal de diferentes compuestos como fenoles, ácidos grasos, amoníaco etc., resultantes generalmente de los procesos de mineralización de la materia orgánica, condicionan las características de fitotoxicidad de los materiales orgánicos durante el compostaje. En este experimento, el método usado para determinar la fitotoxicidad de los composts producidos fue el índice de germinación, propuesto por Zucconi (1981).

En los primeros muestreos, para ambas pilas los valores del índice de germinación fueron muy bajos, lo cual indica la presencia de sustancias fitotóxicas al inicio del proceso (Manios y col., 1987). Sin embargo, este índice aumentó significativamente en las dos pilas, ya que los compuestos fitotóxicos fueron degradados, y la presencia de nutrientes en el compost favorece la germinación de las semillas. El porcentaje de índice de germinación está relacionado con contenido de polifenoles que son los principales causantes de fitotoxicidad en el proceso, por lo tanto, mientras en ambos procesos de compostaje estos valores disminuyeron, el índice de germinación aumentó en todas las pilas desde 0% hasta 22 y 8,5% para las pilas PW y PR, respectivamente (Tabla 10). A pesar de este aumento del índice de germinación, ambas pilas presentaron fitotoxicidad al final del proceso debido a que ninguna presentó un valor de este índice por encima del porcentaje mínimo sugerido (>50%) por Zucconi (1981) para la utilización en actividades agrícolas. Esto pudo deberse al alto contenido de polifenoles solubles todavía presentes en los compost maduros después de todos los procesos de degradación sufridos durante el compostaje (6581 y 6203 mg/kg en PW y PR,

respectivamente), como consecuencia de la alta proporción de residuos vegetales (76%) empleados para la elaboración de las pilas, donde estos compuestos están en concentraciones elevadas.

*Tabla 10 Parámetros relativos a la evolución de la humificación de la materia orgánica*

<b>Tiempo de compostaje (días)</b>	<b>Cah (%)</b>	<b>Caf (%)</b>	<b>Cah/Caf</b>	<b>HI (%)</b>	<b>IG (%)</b>
<b>PW: Pila compostada mediante el sistema Windrow</b>					
0	4,72	9,15	0,52	10,0	0,0
15	5,21	6,25	0,83	12,3	0,0
31	6,24	4,55	1,37	15,0	0,7
47	6,73	3,16	2,13	20,7	0,4
66	6,58	2,55	2,58	21,6	1,6
82	8,24	2,54	3,25	28,2	16,2
Maduro	11,86	2,15	5,51	45,3	22,0
DMS	1,3	0,6	0,3	4,01	3,79
<b>PR: Pila compostada mediante el sistema de ventilación combinada de volteos y aireación forzada</b>					
0	4,68	8,34	0,56	10,1	0,0
15	7,74	6,56	1,18	18,0	0,4
31	9,64	4,58	2,11	23,6	6,9
47	9,68	3,36	2,88	25,9	9,6
66	8,66	2,81	3,08	24,0	16,3
82	8,18	2,65	3,09	23,5	11,9
Maduro	8,86	2,44	3,63	25,7	8,5
DMS	1,7	0,2	0,6	4,8	1,4

Cah: carbono de ácidos húmicos; HI: índice de humificación; IG: índice de germinación;

DMS: mínima diferencia significativa.

## 4.5. EVOLUCIÓN DE LA HUMIFICACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

### 4.5.1. Carbono de ácidos húmicos y fúlvicos

La materia orgánica original sufre una mineralización parcial durante el proceso de compostaje, y la fracción residual se transforma en nuevos materiales orgánicos, que posteriormente se humifican (Campitelli y col., 2006). El humus es uno de los principales componentes de la materia orgánica del suelo. Esta fracción presenta más resistencia a la degradación microbiana, y confiere la mayoría de las propiedades beneficiosas que ésta aporta al suelo, como la capacidad tamponante, y la mejora de su estructura (Gonzales, 2017).

### Carbono de ácidos húmicos

Los contenidos de carbono total extraíble se han considerado parámetros válidos para la determinación del grado de humificación, y se asocian a la cantidad de sustancias húmicas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos en el proceso. Sin embargo, se ha vuelto imprescindible utilizar otros indicadores de humificación más reales, ya que el contenido de sustancias humificadas podría sobreestimarse, sobre todo, en las fases iniciales del proceso de compostaje, ya que parte de los materiales no humificados interferirán con el fraccionamiento de sustancias húmicas( Ciavatta y col., 1990; Meseguer, 2016 )

En la Tabla 10, observamos que el contenido de ácidos húmicos se incrementó en ambas pilas, de valores de 4,72 y 4,68 hasta 11,86 y 8,86 para las pilas PW y PR respectivamente. Este incremento se puede explicar por la cantidad de carbono asociado a los ácidos húmicos que producen durante el proceso de compostaje.

### Carbono de ácidos fúlvicos

A medida que avanza la condensación y polimerización de las moléculas sencillas resultantes de la degradación de la materia orgánica (humificación), se produce un aumento de los ácidos húmicos, mientras que el contenido de ácidos fúlvicos tiende a decrecer (Bernal y col., 2009).

El contenido de ácidos fúlvicos disminuyó en ambas pilas, de valores de 9,15 y 8,34 hasta 2,15 y 2,44 para las pilas PW y PR, respectivamente (Tabla 10). Moreno y col. (2014) encontraron un comportamiento similar entre el contenido en carbono asociado a los ácidos húmicos y fúlvicos en compostaje de restos vegetales, siendo mayor la presencia en los compost maduros de carbono húmicos, frente a los ácidos fúlvicos. Estos resultados también concuerdan con los reportados por Campitelli y Ceppi (2008) quienes encuentran que en compost y vermicompost, predominan los ácidos húmicos sobre los ácidos fúlvicos.

Uno de los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost es el índice de humificación HI ((carbono de los ácidos húmicos/carbono orgánico total) x100). El valor mínimo de este índice para evaluar la madurez del compost encontrado por Iglesias-Jiménez y Pérez García (1992) fue > 13%. En este experimento, ambos compost cumplieron este índice indicativo de madurez. El índice de humificación muestra que evidentemente en el co-compostaje de residuos

vegetales y estiércol de cobaya, el desarrollo del proceso conduce a contenidos mayores de carbono de ácidos húmicos.

La relación de polimerización (carbono de los ácidos húmicos/carbono de los ácidos fúlvicos) se considera un índice para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica en los compost. El valor mínimo de este índice para evaluar la madurez del compost encontrado por Roletto y col. (1985) y Bernal y col. (2017), fue de una relación de polimerización  $> 1\%$ . Los compost producidos en este estudio cumplen con este índice indicativo de madurez.

La relación de polimerización muestra que, en los compost estudiados, más del 70% del carbono extraído corresponde a los ácidos húmicos (Tabla 10), permitiendo inferir que hay un predominio de estructuras aromáticas más complejas sobre las menos polimerizadas de los ácidos fúlvicos. Sin embargo, en la pila PR la generación de ácidos húmicos fue menor, lo que se manifiesta en valores de la relación Cah/Caf mayores en la pila PW (5,51) que en la pila PR (3,63).

#### 4.6. CONTENIDO DE MACRO Y MICRONUTRIENTES Y ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EN COMPOST

Los contenidos de Nt en los compost estuvieron por encima del valor mínimo establecido ( $Nt \geq 10$  g/kg) por las directrices de US Composting Council (2001) para la aplicación agrícola de los compost (Tabla 11). Sin embargo, los contenidos de P estuvieron por debajo del valor mínimo establecido por las directrices anteriores. El compost PR presentó un mayor contenido para Nt, P, Na y K en comparación con PW. Los contenidos de macronutrientes en este estudio fueron mayores que los obtenidos por Gavilanes-Terán y col. (2016) en un experimento similar al compostar residuos hortícolas y estiércoles de aves de corral.

Con respecto a los micronutrientes el compost PW fue el que tuvo mayor concentración de Fe, Cu, Mn y Zn en comparación con los valores obtenidos para el compost PR. Los contenidos de Cu y Zn se encontraron por debajo de los límites máximos establecido por las directrices tanto europeas como americanas reportadas. Gavilanes-Terán y col. (2016) e Idrovo-Novillo y col. (2018) consiguieron resultados parecidos cuando compostaron residuos hortícolas y residuos de flores con estiércoles de aves de corral, respectivamente.

Las concentraciones de metales pesados en ambos compost se encontraron muy por debajo de los límites máximos establecidos por US Composting Council (2001) y European Commission (2014). Los contenidos de Ni, Cr y Cd fueron mayores en el composts PW que en el PR, mientras que lo contrario ocurrió para el caso del Pb.

Tabla 11 Concentraciones de macro, micronutrientes y metales pesados de los compost maduros (peso seco)

	Compost PW	Compost PR	ANOVA	US guidelines <sup>1</sup>	European guidelines <sup>2</sup>
<b>Nt (g/Kg)</b>	17,3 a	23,9 b	***	≥ 10	
<b>P (g/Kg)</b>	6,62	9,16	NS	≥ 10	-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	3,03	4,20	NS	-	-
<b>Na (g/kg)</b>	5,37 a	6,58 b	*	-	-
<b>K (g/kg)</b>	45,7	49,6	NS	-	-
<b>K<sub>2</sub>O(%)</b>	11,0	11,9	NS	-	-
<b>Fe(mg/kg)</b>	6040 b	3358 a	***	-	-
<b>Cu(mg/kg)</b>	36	33	NS	1500	200
<b>Mn(mg/kg)</b>	139 b	103 a	*	-	-
<b>Zn(mg/kg)</b>	182	152	NS	2800	600
<b>Ni (mg/kg)</b>	15,7 b	4,1 a	**	420	50
<b>Cr (mg/kg)</b>	10,2 b	6,0 a	**	1200	100
<b>Cd (mg/kg)</b>	0,65	0,41	NS	39	1,5
<b>Pb (mg/kg)</b>	33	50	NS	300	120

<sup>1</sup>(US COMPOSTING COUNCIL, 2001)

<sup>2</sup>(European Commission, 2014)

#### 4.7. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS NUTRIENTES DE LOS COMPOST

El valor económico de los nutrientes contenidos en el compost se calculó a partir de los precios de los siguientes fertilizantes: urea, fosfato diamónico (DAP) y muriato de potasio (KCl). Los valores promedio de estos fertilizantes, considerando sus precios en el primer semestre del año 2018 según lo estipulado por MAG-SIPA (2018), fueron de 409.67, 589.67 y 418.00 dólares estadounidenses (USD)/tonelada, respectivamente, para urea, DAP y KCl. Estos datos permitieron calcular el valor de 100 kg de cada

compuesto (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O) y los valores promedio de las unidades de fertilización de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O se calcularon como 8,91, 29,13 y 8,39 USD/tonelada, respectivamente, de acuerdo a los cálculos realizados por Jara-Samaniego et al. (2017). Sobre esta base, se asignó un valor económico a los nutrientes dentro de los compost, considerando un contenido de humedad del 35% en todos los compost (el mínimo nivel de humedad recomendado para enmiendas del suelo utilizado en la producción de diferentes cultivos por los EE. UU. (US COMPOSTING COUNCIL, 2001).

La tabla 12 muestra los valores para cada nutriente en los compost elaborados (USD/tonelada), considerando la cantidad de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, y K<sub>2</sub>O en cada compost y el valor de las unidades fertilizantes calculado como se ha indicado.

Tabla 12 Valor económico de los composts obtenidos, basados en el contenido de nutriente (USD/ton.) (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O)

NUTRIENTE	COMPOST PW	COMPOST PR	MEDIA
N	10,01 ± 0,01	13,82 ± 0,10	11,92
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	57,46 ± 1,31	79,51 ± 5,19	68,47
K <sub>2</sub> O	60,11 ± 2,30	65,15 ± 2,27	62,63
VALOR COMBINADO TOTAL	127,58 ± 1,00	158,48 ± 7,56	143,02

Valores reportados como medias ± EES. El valor del contenido de nutrientes fue calculado basándose en un valor de humedad de 35% en los compost (el valor mínimo recomendado para enmiendas de suelo usadas para diferentes cultivos, de acuerdo con (US COMPOSTING COUNCIL, 2001)

El valor total combinado de los compost mantuvo la siguiente relación PW < PR, debido principalmente al gran contenido de nitrógeno total y de fósforo en el compost PR en relación al compost PW (Tabla 12).

Con respecto al contenido de nutrientes, el potasio aportó aproximadamente un 47% y un 41 % y el fósforo un 45 y un 50% del valor combinado para el compost PW y PR, respectivamente. Los nutrientes del compost constituyen una alternativa económica de aporte de macro y micronutrientes, pudiendo reducir requerimientos nutricionales para los mismos cultivos, resultados similares fueron reportados por Jara-Samaniego y col. (2017) e Idrovo-Novillo y col. (2018). De esta manera, el uso de compost puede reducir costos de fertilización en la producción agrícola de la finca agropecuaria.

#### 4.8. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LOS PROCESOS DE COMPOSTAJE

##### Consumo de energía y emisión de carbono para el compostaje de las pilas.

En los dos sistemas de compostaje estudiados, el consumo energético se da por: el consumo de energía utilizado para la preparación de la pila y en los volteos en ambos

sistemas, además por el consumo de electricidad del soplador durante la aireación de la pila de compostaje en el sistema combinado de aireación forzada con volteos periódicos.

Con el propósito de hacer una comparación justificada, siguiendo el método empleado por Levis y Barlaz (2013) y Rasapoor y col. (2016), el consumo específico de energía por unidad de masa de compost terminado se definió de la siguiente manera:

$$U_{E,C} = \sum E / m_{\text{compost seco}} = \sum P_i t_i L f_i / [m_{\text{compost}} (1 - MC)]$$

Donde, E es la energía consumida (en kWh o MJ)

P es la potencia nominal (en kW),

t es el tiempo de trabajo (en horas)

Lf es el factor de carga (en porcentaje) del equipo que consume energía respectivamente,

MC es el contenido promedio de humedad del compost.

En este experimento se utilizó un tractor de carga frontal marca SIENA RS (diseñado para trabajar en pequeñas explotaciones agrícolas y en cultivos especiales donde los espacios para maniobrar son reducidos), con un motor de 35,6 CV (26,20 Kw) para la preparación de las pilas. El tiempo de trabajo de esta maquinaria empleado para la preparación de las mezclas fue de 1,5 horas en cada pila. Para el volteo de las pilas se utilizó una maquinaria volteadora de arrastre modelo ST-200, cuya capacidad de procesamiento de material es de 11,65 m<sup>3</sup>/Kw y proporciona un consumo energético de 0,26 Kw en cada volteo de las pilas de compostaje. Para estos cálculos se consideró que el compost obtenido tuvo una densidad aparente de 0,33 g/cm<sup>3</sup>, la cual ha sido utilizada en experimentos realizados por Barrena y col. (2005) y Rasapoor y col. (2016) para compostar residuos sólidos urbanos altamente heterogéneos.

La emisión asociada al uso de energía por unidad de masa del compost terminado ( $U_{P,C}$ ) se define utilizando el factor de emisión (EF) por tipo de energía consumida (en g-contaminante por kWh) de la siguiente manera (IPCC, 2006):

$$U_{P,C} = \sum E_i EF_i / m_{\text{compost seco}}$$

Los factores medios de emisión de CO<sub>2</sub> se adoptaron del estudio de Rasapoor y col. (2016), donde se consideraron de 767,48 g/kWh para la energía eléctrica (consumo de

un soplador 150W), y el factor de emisión para el combustible diésel fueron 70,1 g/MJ (74 kg/mmBtu), los mismos se adoptaron a partir del promedio de emisiones por generaciones en centrales de acuerdo a Rasapoor y col. (2016) y los factores de emisión para el combustible diésel fueron tomados en cuenta del promedio de valores reportados por EPA (2014).

Con base a las consideraciones del (IPCC, 2006), las emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso de compostaje no se tuvieron en cuenta, ya que se consideran de origen biogénico. Por lo tanto, estas emisiones no contribuyen al calentamiento global, ya que se supone que son compensadas por el CO<sub>2</sub> consumido en la fotosíntesis por las plantas, cuyos residuos vegetales son compostados. Además, la producción de CO<sub>2</sub> por degradación de la materia orgánica se considera parte del ciclo corto de carbono (IPCC, 2006).

Como muestran los datos de la Tabla 13, las emisiones asociadas son mayores en el sistema que utiliza aireación forzada debido al consumo eléctrico del soplador, el uso energético también es mayor en este sistema de compostaje.

Tabla 13 Resumen de los resultados de consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas para el compost producido en cada uno de los sistemas de compostaje estudiados

<b>Técnica de aireación</b>	<b>SR</b>	<b>SW</b>
Uso energético preparación pilas (MJ/kg m.s.)	0,2177	0,2177
Emisiones asociadas (g-CO <sub>2</sub> /kg m.s.)	15,2590	15,2590
Uso energético aireación forzada (MJ/kg m.s.)	0,0681	0,0000
Emisiones asociadas (g-CO <sub>2</sub> /kg m.s.)	14,5231	0,0000
Uso energético volteo pila (MJ/kg m.s.)	0,00468	0,00468
Emisiones asociadas (g-CO <sub>2</sub> /kgm.s.)	0,32807	0,32807
Consumo energético total (MJ/kg m.s.)	0,29048	0,22238
Emisiones asociadas totales (g-CO <sub>2</sub> /kgm.s.)	30,11017	15,58707

SR: Sistema que combina aireación forzada con volteos periódicos; SW: Sistema Windrow con volteos periódicos.

## 5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede concluir que el co-compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya, utilizando el sistema de aireación por volteos, así como el sistema de aireación forzada combinada con volteos, pueden considerarse como métodos eficientes para la obtención de compost con características adecuadas, en general, para su empleo agrícola y el reciclaje de residuos. Los compost producidos presentaron niveles de salinidad compatibles con el crecimiento vegetal y presentaron valores de materia orgánica y de nitrógeno dentro del intervalo de las directrices americanas para el empleo de compost como enmienda orgánica del suelo en diferentes cultivos. Además, los contenidos de metales pesados de los compost estuvieron muy por debajo de los valores máximos establecidos tanto en las directrices europeas como americanas para el uso agrícola de compost. También, ambos compost alcanzaron una adecuada estabilización y humificación de la materia orgánica como lo demostraron la evolución y los valores finales de diferentes parámetros, tales como el contenido de C hidrosoluble, las relaciones de C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub> y C ácido húmico/C ácido fúlvico y los porcentajes de C ácido húmico, de C ácido fúlvico y del índice de humificación. Sin embargo, ambos compost presentaron fitotoxicidad debido principalmente al alto contenido de polifenoles solubles que tuvieron, como consecuencia de la insuficiente degradación de estos compuestos presentes en grandes cantidades en los residuos vegetales iniciales empleados.

El sistema de aireación empleado en el compostaje influyó en la degradación de la materia orgánica, consiguiéndose una mayor degradación y con mayor velocidad en el caso de la pila con ventilación por volteos (PW). Este hecho contribuyó a que en esta pila se obtuviera un compost con menor contenido de materia orgánica y de nitrógeno y una mayor estabilización y humificación de su materia orgánica en comparación con el compost de la pila con aireación forzada+ volteos (PR). También, el compost PW presentó mayor contenido de micronutrientes, mientras que el compost PR tuvo mayor contenido de macronutrientes. De este modo, el compost PR presentó un mayor valor económico adicional del compost final derivado de su contenido de nutrientes. Sin embargo, las emisiones asociadas fueron mayores en el sistema que utilizó aireación forzada + volteos, debido al consumo eléctrico del soplador que contribuyó a que el uso energético en este sistema fuese mayor.

Por lo tanto, el compostaje de residuos vegetales con estiércol de cobaya puede contribuir a la adopción de modelos de producción sostenible, aumentando la eficiencia del uso de los recursos en la producción agrícola y contribuyendo a la reducción de sus impactos en el cambio climático.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abrisqueta, C., & Romero, M. (1969). Digestión húmeda rápida de suelos y materiales orgánicos. *Anal. Edafol. Agrobiol*, 27, 855-867.
- Alvarez-Uría, P., & Rodríguez, M. E. (2007). Optimización de la distribución de aire en túneles de compostaje. *Residuos*, 98, 42-50.
- Andreu Amat, A. (2014). *Efectes de la relació C/N inicial en la descomposició i maduració del compostatge de la FORM amb restes de poda urbana al Campus del Baix Llobregat*. (Tesis de Pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Anex, R. P., & Kiely, G. (1999). Evaluating a model of anaerobic digestion of organic wastes through system identification. En *Environmental Engineering 1999* (pp. 489-498). New York: Univ. of Oklahoma, Norman, OK (US).
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y Codigestión Anaerobia de Residuos Agrícolas, Ganaderos y Lodos de Depuradora*. Tesis Doctoral, Universidad de Málaga.
- Asociación Argentina de Ecología. (2008). *Ecología austral*. *Ecología austral* (Vol. 18). ASAE.
- Bach, P. D., Nakasaki, K., Shoda, M., & Kubota, H. (1987). Thermal balance in composting operations. *Journal of Fermentation Technology*, 65(2), 199-209.
- Baldwin, K. R., & Greenfield, J. T. (1993). *Composting on the Organic Farm. Control* (Vol. 1). North Carolina. Cooperative Extension Services: Raleigh, NC, USA.
- BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. (2018). Producto Interno Bruto por Industria. <https://contenido.bce.fin.ec/home1/estadisticas/bolmensual/IEMensual.jsp>. (Consultado 13 de julio de 2018)
- Barrena, R., Pagans, E., Faltys, G., & Sánchez, A. (2005). Effect of inoculation dosing on the composting of source-selected organic fraction of municipal solid wastes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81(3), 420-425.
- Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., & Álvarez, P. M. (1999). Wine distillery wastewater degradation. 1. Oxidative treatment using ozone and its effect on the wastewater biodegradability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(9), 3911-3918.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource technology*, 100(22), 5444-5453.
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sanchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource technology*, 63(1), 91-99.
- Bernal, M. P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63(1), 91-99.
- Biddlestone, A. J., & Gray, K. R. (1991). Aerobic processing of solid organic wastes for the production of a peat alternative: a review. *Process Biochemistry*, 26(5), 275-279.
- Blancas Cabello, C., & Hervás Ramírez, M. E. (2001). *Contaminación de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud*. Andalucía: Consejería de Salud.

- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. Ben, & Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process biochemistry*, 40(3-4), 989-995.
- Bremner, J. M. (1965). Nitrogen Availability Indexes 1. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, (methodsofsoilanb), 1324-1345.
- Burton, C. H., & Turner, C. (2003). *Manure management: Treatment strategies for sustainable agriculture*. Editions Quae.
- Bustamante Muñoz, M. Á. (2007). Compostaje de los residuos generados en la industria vinícola y alcohólica. Valorización agronómica de los materiales obtenidos. (Tesis doctoral, Universidad Miguel Hernández de Elche).
- Bustamante, M. A., Moral, R., Paredes, C., Vargas-García, M. C., Suárez-Estrella, F., & Moreno, J. (2008). Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes. *Bioresource technology*, 99(15), 7299-7306.
- Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72(4), 551-557.
- Bustamante, M. A., Restrepo, A. P., Albuquerque, J. A., Pérez-Murcia, M. D., Paredes, C., Moral, R., & Bernal, M. P. (2013). Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Cleaner Production*, 47, 61-69.
- Camiletti, J. (2016). *Estudio del vermicompostaje de compost de residuos orgánicos de distinta naturaleza*. (Tesis de posgrado, Universidad Miguel Hernández de Elche).
- Campitelli, P. A., Velasco, M. I., & Ceppi, S. B. (2006). Chemical and physicochemical characteristics of humic acids extracted from compost, soil and amended soil. *Talanta*, 69(5), 1234-1239.
- Campitelli, P., & Ceppi, S. (2008). Effects of composting technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids. *Geoderma*, 144(1-2), 325-333.
- Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Ediciones Díaz de Santos.
- Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., & Roig, A. (2006). Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry*, 41(3), 616-623.
- Cegarra, J. (1978). *Fraccionamiento de fertilizantes orgánicos y de sus productos de humificación*. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Murcia. Universidad Autónoma de Madrid.
- Cegarra, J., Albuquerque, J. A., González, J., Tortosa, G., & Chaw, D. (2006). Effects of the forced ventilation on composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") managed by mechanical turning. *Waste Management*, 26(12), 1377-1383.
- Cegarra, J., Reverte, L., Lax, A., & Costa, F. (1974). Factores que influyen en la extracción y fraccionamiento de la materia orgánica del suelo. *Anal Edafol Agrobiol*, 33, 575-590.
- Cesaro, A., Belgiorno, V., & Guida, M. (2015). Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 72-79.

- Cevallos, C., & Zaldivar Puig, M. (2017). Chimborazo: una reflexión sobre su sector agropecuario. *eumed.net. Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (228).
- Chen, R., Wang, Y., Wang, W., Wei, S., Jing, Z., & Lin, X. (2015). N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen transformation during windrow composting of dairy manure. *Journal of Environmental Management*, 160, 121-127.
- Chica Pérez, A., Artola, A., Rosal, A., Solé-Mauri, F., Fernández-Morales, F. J. García-Morales, J. L., Dios Pérez, M., ... Font-Segura, X. (2014). *Ingeniería y aspectos técnicos de la digestión aeróbica II.3*. (J. L. Moreno & R. Moral, Eds.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Chiumenti, A. (2005). *Modern composting technologies*. JG Press.
- Ciavatta, C. (1988). A first approach to the characterization of the presence of humified materials in organic fertilizers. *Agrochimica*, 32, 510-517.
- Ciavatta, C., Govi, M., Antisari, L. V., & Sequi, P. (1990). Characterization of humified compounds by extraction and fractionation on solid polyvinylpyrrolidone. *Journal of Chromatography A*, 509(1), 141-146.
- Cornell Composting. (2001). The Science and Engineering of Composting. <http://www.cfe.cornell.edu/compost/Note.html>. Recuperado 25 de julio de 2018
- Costa, F., García, C., Hernández, T., & Polo, A. (1991). Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Caja Murcia, Murcia. *Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. Caja Murcia, Murcia*.
- Cuadros, S. (2008). *Residuos agrícolas, forestales y lodos*. EOI Escuela de Negocios, 70
- de Bertoldi, M., Vallini, G., & Pera, A. (1983). The Biology of Composting: a Review. *Waste Management & Research*, 1(1), 157-176.
- Dick, W. A., & McCoy, E. L. (1993). Enhancing soil fertility by addition of compost. *Science and engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects*, 622-624.
- Ekinci, K. (1997). Evaluation of decomposition rate, airflow rate and ammonia control of short paper fiber with broiler litter and additives—alum and sulfuric acid. The Ohio State University.
- Epstein, E. (1997). Science of composting Technomic Publishing Company. *Lancaster, USA*.
- Epstein, E. (2017). *The science of composting* (1.<sup>a</sup> ed.). New York: Routledge.
- European Commission. (2014). *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*. Sevilla, España. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*
- FAO. (2016). Los efectos sociales y económicos de la modernización de la agricultura. <http://www.fao.org/docrep/x4400s/x4400s10.htm> (Fecha de consulta 8 de agosto de 2018)
- FAO. (2017a). Enfoques: Conciliar la ganadería con el medio ambiente. <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0704sp2.htm>. (Fecha de consulta 9 de agosto de 2018)
- FAO. (2017b). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/es/c/387641/> (Fecha de consulta 9 de agosto de 2018)

agosto de 2018)

- Fernandes, L., & Sartaj, M. (1997). Comparative Study of Static Pile Composting Using Natural, Forced and Passive Aeration Methods. *Compost Science & Utilization*, 5(4), 65-77.
- Finstein, M. S. (1992). Composting in the context of municipal solid waste management. *Environmental microbiology*, 355-374.
- Finstein, M. S., Miller, F. C., MacGregor, S. T., & Psarianos, K. M. (1985). *The Rutgers strategy for composting: process design and control*. National Technical Information Service Springfield.
- Fukumoto, Y., Osada, T., Hanajima, D., & Haga, K. (2003). Patterns and quantities of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale. *Bioresource Technology*, 89(2), 109-114.
- GADP Chimborazo. (2015). *PLAN DE DESARROLLO Y DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DECHIMBORAZO 2015*. <http://www.chimborazo.gob.ec/chimborazo/wp-content/uploads/LOTAIP/ANEXOS4/1.%20%20PDOT%20Chimborazo.pdf>. (Fecha de consulta 13 de mayo de 2018).
- Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., & Yang, L. (2010). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere*, 78(5), 614-619.
- Garcia, C., Hernandez, T., Costa, F., & Ayuso, M. (1992). Evaluation of the maturity of municipal waste compost using simple chemical parameters. *Communications in soil science and plant analysis*, 23(13-14), 1501-1512.
- Gavilanes-Terán, I. (2014). *Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de Chimborazo (Ecuador)*. (Trabajo Fin de Máster, Universidad Miguel Hernandez de Elche).
- Gavilanes-Terán, I., Jara-Samaniego, J., Idrovo-Novillo, J., Bustamante, M. A., Moral, R., & Paredes, C. (2016). Windrow composting as horticultural waste management strategy—a case study in Ecuador. *Waste management*, 48, 127-134.
- Gavilanes Terán, I. del C. (2016). Sonstenibilidad del sector agroindustrial de Ecuador mediante el compostaje de sus residuos y el uso agrícola de los materiales obtenidos. (Tesis doctoral, Universidad Miguel Hernandez de Elche).
- Getahun, T., Nigusie, A., Entele, T., Gerven, T. Van, & Bruggen, B. Van der. (2012). Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 79-84.
- Golueke, C. G. (1989). Putting principles into successful practice. *The BioCycle guide to yard waste composting*. JG Press, Inc., Emmaus, Pennsylvania, USA, 106-110.
- Gonzales, R. (2017). Análisis del contenido y valor equivalente de productos orgánicos de aplicación en agricultura a nivel de sustancias húmicas. (Trabajo Fin de Grado, Universidad Miguel Hernandez de Elche).
- Gordillo, F., & Chavez, E. (2018). *Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Centro de Investigación Científica y Tecnológica.
- Guamangallo, P. (2018). Estudio de factibilidad para la creación de “cobayas” microempresa

- productora y comercializadora quitoecuador 2017. Quito. (Trabajo Fin de Grado, Universidad Israel).
- Hachicha, S., Cegarra, J., Sellami, F., Hachicha, R., Drira, N., Medhioub, K., & Ammar, E. (2009). Elimination of polyphenols toxicity from olive mill wastewater sludge by its co-composting with sesame bark. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 1131-1139.
- Hamoda, M. F., Qdais, H. A. A., & Newham, J. (1998). Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, conservation and recycling*, 23(4), 209-223.
- Harada, Y., & Inoko, A. (1980). The measurement of the cation-exchange capacity of composts for the estimation of the degree of maturity. *Soil Science and Plant Nutrition*, 26(1), 127-134.
- Haug, R. T. (1993). The practical handbook of compost engineering. *Lewis publishers*, 717.
- Herrero, M. A., Gil, S. B., Sardi, G. M., Flores, M. C., Carbó, L. I., & Orlando, A. A. (2006). Transferencia de nutrientes del área de pastoreo a la de ordeño, en tambos semiextensivos en Buenos Aires, Argentina. *InVet*, 8(1), 23-30.
- Hoitink, H. A. J., & Keener, H. M. (1993). *Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. Ohio State University.
- Hue, N. V., & Liu, J. (1995). Predicting compost stability. *Compost science & utilization*, 3(2), 8-15.
- Idrovo-Novillo, J., Gavilanes-Terán, I., Angeles Bustamante, M., & Paredes, C. (2018). Composting as a method to recycle renewable plant resources back to the ornamental plant industry: Agronomic and economic assessment of composts. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 388-395.
- Iglesias-Jiménez, E., & Pérez García, V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity: a review. *Biol. Wastes*, 27, 115-142.
- Iglesias Jiménez, E., & Pérez García, V. (1992). Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some "humification" indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.
- INEC. (2016a). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, 38. [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2016/Informe%20ejecutivo%20ESPAC\\_2016.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2016/Informe%20ejecutivo%20ESPAC_2016.pdf). (Fecha de consulta 2 de enero de 2018).
- INEC. (2016b). ENCUESTA NACIONAL DE EMPLEO, DESEMPLEO Y SUBEMPLEO. [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2016/Diciembre-2016/122016\\_Presentacion\\_Laboral.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2016/Diciembre-2016/122016_Presentacion_Laboral.pdf) (Fecha de consulta 2 de enero de 2018)
- INEC. (2017). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*, 23. [http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac\\_2017/Presentacion\\_Principales\\_Resultados\\_ESPAC\\_2017.pdf](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac_2017/Presentacion_Principales_Resultados_ESPAC_2017.pdf) (Fecha de consulta 2 de enero de 2018)
- IPCC. (2006). Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 5). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies. *IPCC - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*.
- Isaza-Arias, G. C., Pérez-Méndez, M. A., Laines-Canepa, J. R., & Castañón-Nájera, G. (2009). Comparación de dos técnicas de aireación en la degradación de la materia orgánica.

- Universidad y ciencia, 25(3), 233-243.
- Jann, G. J., Howard, D. H., & Salle, A. J. (1959). Method for the determination of completion of composting. *Applied microbiology*, 7(5), 271.
- Jara Samaniego, J. (2016). Oportunidades de valorización mediante compostaje de los residuos orgánicos de origen urbano y afines en Ecuador: propuesta de gestión para la provincia de Chimborazo. (Tesis doctoral, Universidad Miguel Hernandez de Elche).
- Jarvis, S. C. (1993). Nitrogen cycling and losses from dairy farms. *Soil Use and Management*, 9(3), 99-104.
- Jimenez, E. I., & Garcia, V. P. (1992). Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture, ecosystems & environment*, 38(4), 331-343.
- Jiménez, E. I., Silva, M. T. B., & Egea, F. C. M. (2008). Indicadores de la estabilidad y madurez del compost. *Compostaje*, 243.
- Jurado, M. M., Suárez-Estrella, F., Vargas-García, M. C., López, M. J., López-González, J. A., & Moreno, J. (2014). Evolution of enzymatic activities and carbon fractions throughout composting of plant waste. *Journal of environmental management*, 133, 355-364.
- Keener, H. M., Ekinci, K., & Michel, F. C. (2005). Composting process optimization—using on/off controls. *Compost science & utilization*, 13(4), 288-299.
- Keener, H. M., Elwell, D. L., Das, K., & Hansen, R. C. (1997). Specifying design/operation of composting systems using pilot scale data. *Applied Engineering in Agriculture*, 13(6), 767-772.
- Kiely, G., Bowler, S., Carton, O., Cunningham, D., Duffy, N., Giller, P. S., O'cinneide, D. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. McGraw-Hill Interamericana de España.
- Kithome, M., Paul, J. W., & Bomke, A. A. (1999). Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments. *Journal of Environmental Quality*, 28(1), 194-201.
- Kitson, R. E., & Mellon, M. G. (1944). Colorimetric Determination of Phosphorus as Molybdivanadophosphoric Acid. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 16(6), 379-383.
- Kulcu, R., & Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 93(1), 49-57.
- Larney, F. J., Olson, A. F., Carcamo, A. A., & Chang, C. (2000). Physical changes during active and passive composting of beef feedlot manure in winter and summer. *Bioresource Technology*, 75(2), 139-148.
- Levis, J. W., & Barlaz, M. (2013). Composting Process Model Documentation. North Carolina State University, NC, USA.
- Liang, C., Das, K. C., & McClendon, R. W. (2003). The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource technology*, 86(2), 131-137.
- Lopez-Real, J. (1990). Agro-industrial waste composting and its agricultural significance. *Agro-industrial waste composting and its agricultural significance.*, (293). Proceedings - Fertiliser

Society 1990 (293), 26.

López, M., Masaguer, A., Paredes, C., Roca Pérez, L., Ros Muñoz, M., Salas, M. C., & Boluda, R. (2015). *Residuos orgánicos y agricultura intensiva III.1*. (J. A. P. y M. P. B. J. Moreno, R. Moral, J.L. García-Morales, Ed.). Madrid: Mundi-Prensa Libros, S.A.

Macías, P. L. (2009). *Compostaje de residuos orgánicos*. (Trabajo Fin de grado, Universidad del Valle, Colombia).

MAGAP. (2017). Leche y quinua aportan al desarrollo productivo de Mocha. *Leche y quinua aportan al desarrollo productivo de Mocha*. <https://www.agricultura.gob.ec/leche-y-quinua-aportan-al-desarrollo-productivo-de-mocha/>. (Fecha de consulta 16 de febrero de 2018).

Manios, V. I., Tsikalas, P. E., Siminis, H. I., & Verdonck, O. (1987). Phytotoxicity of olive tree leaf compost. En: *Compost: Production, Quality and Use*. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 296-301.

Martínez Farré, F. X. (2006). *Retema : revista técnica de medio ambiente. Medio ambiente. Retema* (Vol. 19). Publiteca.

Mekki, A., Dhouib, A., & Sayadi, S. (2007). *Polyphenols dynamics and phytotoxicity in a soil amended by olive mill wastewaters. Journal of Environmental Management, 84(2), 134-140*.

Meseguer, M. L. (2016). Valorización de residuos de palmera y lodos de depuradora mediante co-compostaje. (Trabajo Fin de Máster, Universidad Miguel Hernández de Elche).

Miller, F. C., Harper, E. R., Macauley, B. J., & Gulliver, A. (1990). Composting based on moderately thermophilic and aerobic conditions for the production of commercial mushroom growing compost. *Australian Journal of Experimental Agriculture, 30(2), 287-296*.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA. Haro, R. (2003). *Informe sobre recursos zoogenéticos Ecuador. Ministerio de Agricultura y ganadería y subsecretaría de fomento Agroproductivo. Dirección para la Implementación del Desarrollo Agropecuario, Agroforestal y Agroindustrial. Quito, Ecuador*.

Miyares, P. Á.-U., & Rodríguez, M. E. (2007). Optimización de la distribución de aire en túneles de compostaje. *Residuos: Revista técnica, 17(98), 42-51*.

Monteros, A., & Sumba, E. (2014). Productividad agrícola en el Ecuador. Quito, Ecuador: Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información, Coordinación General del Ecuador

Montes García, L. (2015). Valorización de flujos residuales orgánicos generados en entornos urbanos mediante co-compostaje. (Trabajo Fin de Máster, Universidad Miguel Hernández de Elche).

Moreno Casco, J. . ed., & Moral Herrero, R. . ed. (2008). *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa.

Moreno, J., & Bernat, S. (2008). *Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje*. (J. Moreno Casco & R. Moral Herrero, Eds.), *Compostaje*. Madrid: Mundi-Prensa Libros.

Moreno, J., Moral, R., García, J., Pascual, J., & Bernal, M. (2014). De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad. *Editorial Mundi-Prensa. Madrid*.

Morse, D. (1995). Environmental considerations of livestock producers. *Journal of animal science, 73(9), 2733-2740*.

- Mustin, M. (1987). Le compost: gestion de la matière organique. AGRIS. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2015023178>. (Fecha de consulta 17 de julio de 2018).
- Navarro, A. F., Cegarra, J., Roig, A., & Garcia, D. (1993). Relationships between organic matter and carbon contents of organic wastes. *Bioresource Technology*, 44(3), 203-207.
- Nogales, R., Gallardo-Lara, F., & Delgado, M. (1982). Aspectos físico-químicos y microbiológicos del compostaje de basuras urbanas. *An. Edafol. Agrobiol*, 41, 1159-1174.
- Ogiyama, S., Sakamoto, K., Suzuki, H., Ushio, S., Anzai, T., & Inubushi, K. (2005). Accumulation of zinc and copper in an arable field after animal manure application. *Soil Science & Plant Nutrition*, 51(6), 801-808.
- Ogunwande, G. A., & Osunade, J. A. (2011). Passive aeration composting of chicken litter: Effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 85-91.
- Ogunwande, G. A., Osunade, J. A., & Ogunjimi, L. A. O. (2008). Effects of carbon to nitrogen ratio and turning frequency on composting of chicken litter in turned-windrow piles. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Paredes, C., Bernal, M. P., Cegarra, J., & Roig, A. (2002). Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting with agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 85(1), 1-8.
- Paredes, C., Roig, A., Bernal, M. P., Sánchez-Monedero, M. A., & Cegarra, J. (2000). Evolution of organic matter and nitrogen during co-composting of olive mill wastewater with solid organic wastes. *Biol. Fert. Soils* 32, 222–227.
- Pedreño, J. N., Herrero, J. M., Lucas, I. G., & Beneyto, J. M. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*. Universidad de Alicante.
- Pérez, A. F. C., & Morales, J. L. C. (2008). Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje Dpto. *Compostaje*, 6, 142.
- Pocoví, G. (2016). Revisión y análisis de los manuales de compostaje doméstico suministrados en las campañas municipales. (Trabajo Fin de Máster, Universidad Miguel Hernández de Elche)
- Posse, G., Lewczuk, N., & Richter, K. (2014). *Sustentabilidad y las emisiones de carbono en la agricultura argentina*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Buenos Aires. AR. 2014. Capítulo 5, p. 66-74
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2017). Ecuador recibe más de US \$ 80 millones para frenar la deforestación. <http://www.ec.undp.org/content/ecuador/es/home/presscenter/articles/2017/07/10/ecuador-recibe-m-s-de-us-80-millones-para-frenar-la-deforestaci-n/> (Fecha de consulta 16 de febrero 2018)
- Rasapoor, M., Adl, M., & Pourazizi, B. (2016). Comparative evaluation of aeration methods for municipal solid waste composting from the perspective of resource management: A practical case study in Tehran, Iran. *Journal of Environmental Management*, 184, 528-534.
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., & Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2),

570-573.

- Roletto, E., Consiglio, M., Jodice, R., & Barberis, R. (1985). Chemical parameters for evaluating compost maturity. *BioCycle*, 26 (2), 46-47
- Rufete-Sáez, A. B. (2015). *Caracterización de Residuos Ganaderos del Sureste Español: Implicaciones Agronómicas y Medioambientales*. (Trabajo Fin de Carrera, Universidad Miguel Hernández de Elche).
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., & Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology*, 98(9), 1822-1831.
- Sánchez, S., Hernández, M., & Ruz, F. (2011). Alternativas de manejo de la fertilidad del suelo en ecosistemas agropecuarios. *Pastos y Forrajes*, 34(4), 375-392.
- Sánchez-Básconez, M., Correa, A., Pérez-Espinosa, A., Blanco, D., Cabaleiro-Nunez, F., García-Morales, J., ... Carballas, T. (2016). *Residuos ganaderos*. (2016 Ediciones Paraninfo, S.A., Ed.), *DE RESIDUO A RECURSO, EL CAMINO HACIA LA SOSTENIBILIDAD*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Martínez-Pardo, C., Cegarra, J., & Paredes, C. (1996). A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances. Relationships between total organic carbon and oxidable carbon. *Bioresource Technology*, 57(3), 291-295.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Paredes, C., & Bernal, M. P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource technology*, 78(3), 301-308.
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2014). *Agroecología*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Sartaj, M., Fernandes, L., & Patni, N. K. (1997). Performance of forced, passive, and natural aeration methods for composting manure slurries. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40(2), 457-463.
- Saviozzi, A., Riffaldi, R., & Levi-Minzi, R. (1986). Compost maturity by water extract analyses. En: *Compost: Production, Quality and Use*. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 359-367.
- Schwarz, M., & Bonhotal, J. (2011). *Composting at Home - The Green and Brown Alternative*. Cornell Waste Management Institute / Department of Crop and Soil Sciences.
- Seoudi, O. A. T. (2013). Enhancement of cotton stalks composting with certain microbial inoculations. *J. Adv. Lab. Res. Biol.*, 4(1), 25-32.
- Spohn, E. (1978). Determination of compost maturity. *Compost Sci. Land Utilization*, 19(3), 26-29.
- Stentiford, E. I. M. de Bertoldi, M. Ferranti, P. L'Hermite, F. Zucconi (Eds.), *Recent developments in composting*. (1987) *Compost, Production, Quality and Use*, Elsevier, London (1987), pp. 52-60
- Stentiford, E. I. (1996). *Composting Control: Principles and Practice*. En *The Science of Composting* (pp. 49-59). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Stentiford, E. I., Mara, D. D., & Taylor, P. L. (1985). Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. *Composting of agricultural and other wastes/edited by JKR Gasser*.
- Stickelberger, D. (1975). Survey of city refuse composting. *Soils Bulletin (FAO)*. no. 27.
- Sugahara, K., Harada, Y., & Inoko, A. (1979). Color change of city refuse during composting process. *Soil science and plant nutrition*, 25(2), 197-208.
- US Composting Council. (2001). *Field guide to compost use*. [http://compostingcouncil.org/admin/wp-content/plugins/wp-pdfupload/pdf/1330/Field\\_Guide\\_to\\_Compost\\_Use.pdf](http://compostingcouncil.org/admin/wp-content/plugins/wp-pdfupload/pdf/1330/Field_Guide_to_Compost_Use.pdf). (Fecha de consulta 08 de febrero de 2018)
- Valderrama, A. (2013). Biodegradación de residuos sólidos agropecuarios y uso de bioabono como acondicionador del suelo. Universidad Pontificia Bolivariana 1–54
- Vallini, G., & Pera, A. (1984). Technological aspects of composting including modelling and microbiology. *Gasser, JKR*, 27-40.
- Valverde, V. H. (2016). *Diseño y Automatización de un Sistema de Aireación Forzada para el Co-compostaje de residuos hortícolas en la comunidad de Gatazo cantón Colta*. (Trabajo Fin de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Vargas-Garcia, M. C., Suárez-Estrella, F., Lopez, M. J., & Moreno, J. (2010). Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials. *Waste management*, 30(5), 771-778.
- Vázquez, M. A., De La Varga, D., Plana, R., & Soto, M. (2015). Integrating liquid fraction of pig manure in the composting process for nutrient recovery and water re-use. *Journal of Cleaner Production*, 104, 80-89.
- Vestal, J. R., & McKinley, V. L. (1986). *Microbial activity in composting municipal sewage sludge*. US Environmental Protection Agency, Water Engineering Research Laboratory.
- Viel, M., Sayag, D., Peyre, A., & André, L. (1987). Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. *Biological Wastes*, 20(3), 167-185.
- Vilaseca, J. S., & Torrentó, M. S. (1987). *El compostatge: procés, sistemes i aplicacions*. Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient.
- Vodopivec, B., Tomažič, I., Škvarč, A., & Trebse, P. (2006). *Determination of Polyphenols in White Grape Berries cv. Rebula*. *Acta Chimica Slovenica* (Vol. 53): 58-64.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wilson, G. (1980). *Manual for composting Sewage Sludge by Aerated Static Pile Method*. US EPA. Cincinnati. Ohio. USA.
- Witter, E., & Lopez-Real, J. (1988). Nitrogen losses during the composting of sewage sludge, and the effectiveness of clay soil, zeolite, and compost in adsorbing the volatilized ammonia. *Biological wastes*, 23(4), 279-294.
- Wong, J. W. C., Li, S. W. Y., & Wong, M. H. (1995). Coal Fly Ash as a Composting Material for Sewage Sludge: Effects on Microbial Activities. *Environmental Technology*, 16(6), 527-537.

- Zucconi, F. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 22(2), 54-57.
- Zucconi, F. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. *En: Compost: Production, Quality and Use. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P., L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp. 30-50.*
- Zucconi, F., Monaco, A., Forte, M., & Bertoldi, M. de. (1985). Phytotoxins during the stabilization of organic matter. *Composting of agricultural and other wastes/edited by JKR Gasser.*
- Zumba Mejía, T. P. (2016). Caracterización y plan de manejo integral de los residuos sólidos para la parroquia de San Andrés cantón Guano provincia de Chimborazo. (Trabajo Fin de Grado, Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador).



## 7. ANEXO I: MÉTODOS ANALÍTICOS

- Preparación de la muestra. Las muestras tanto de residuos iniciales como las tomadas a lo largo del proceso de compostaje son secadas a 60°C y posteriormente molidas en un molino y pasadas a través de una malla de 0,5 mm de luz. Una vez molidas, se secan en estufa a 105°C por 24 horas, y posteriormente se conservan en un desecador de vacío hasta su análisis.
- Humedad operativa. Se toma como humedad el porcentaje de agua con respecto a muestra húmeda, por diferencia de pesadas entre material húmedo y seco. Procedimiento: Se pesan de 1-3 g de muestra seca al aire y molida, en un pesa-sustancias de peso conocido. Se calienta a 105°C durante 12 horas. Se deja enfriar en desecador y se pesa. La pérdida de peso se da como humedad, expresando el resultado como porcentaje respecto a peso de muestra húmeda. Todos los demás datos que se obtengan se corregirán con este valor, para referirlos a peso seco.
- Humedad original. Se determina de igual forma que la humedad operativa, pero pesando de 5-10 g de muestra fresca.
- Pérdida de peso por calcinación (cenizas). Se determina según el método de (Navarro et al., 1993), se toman aproximadamente 2 kg de las muestras tomadas en bandejas y se colocan en la estufa a 75 °C, y cada 7 horas, dos veces al día se pesa la muestra hasta que el peso sea constante, y se toma como cenizas el residuo fijo obtenido luego de calcinar la muestra a 430°C. El contenido en "cenizas" se expresa en porcentaje respecto al peso de la muestra seca.
- Pérdidas de materia orgánica. Las pérdidas de materia orgánica (MO), se calculan respecto al contenido de materia orgánica y cenizas inicial, y en la muestra tomada, de acuerdo con la ecuación de (Viel et al., 1987). Se determinan con respecto a la materia orgánica inicial, se colocan 3 gramos de la muestra en un crisol previamente tarado y se los lleva a la mufla a 430°C por 24 horas, una vez enfriado se pasa al desecador por 30 minutos para que se enfríe y finalmente se pesa el crisol con la muestra calcinada.

$$\text{Pérdidas MO(\%)} = 100 - 100[X_1(100 - X_2)]/[X_2(100 - X_1)]$$

- Determinación del pH. El pH se mide pesando 3 gramos de la muestra en un tubo falcón, posteriormente se adiciona 30 ml de agua destilada (suspensión acuosa 1:10 sólido/líquido), se agita por 2 horas y se deja sedimentar. Finalmente se mide el pH en el líquido sobrenadante de la suspensión acuosa con un pH-metro. Esta diferencia de potencial es función lineal de la actividad

de los iones hidrógeno presentes en la muestra problema a una temperatura dada.

- Determinación de la conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica de un extracto acuoso es la aptitud que presenta éste para transmitir la corriente eléctrica. Se determina sobre una suspensión acuosa 1:10 sólido/líquido, se la centrifuga por 4 minutos a 1000 rpm, se filtra el líquido en el tubo falcón y se mide la conductividad con un conductímetro.
- Carbono orgánico total y nitrógeno total. Se realizan mediante los métodos reportados por (Walkley & Black, 1934) y (Bremner, 1965) respectivamente.
- Mineralización de la muestra. Se realiza mediante digestión húmeda nítrico-perclórica de las muestras según el método recomendado por (Abrisqueta & Romero, 1969).

Reactivos Ácido nítrico concentrado (d = 1,33)

Ácido perclórico 60 %

Ácido clorhídrico 0,5 N

En un tubo de digestión de doble enrase de 50 ml se pesa 0,5 g de muestra seca al aire y molida a través de una malla de 0,5 mm de luz, con una precisión de 0,0001 g. Se añaden 6 ml de mezcla nítrico-perclórica 2:1 y se deja macerar durante toda la noche. Se calienta a 150 °C durante 1 hora y a 210 °C durante 2 horas en bloque digestor. Las paredes y fondo se lavan con HCl 0,5 N hasta llevar el volumen a 50 ml y a continuación se filtra con papel lavado a los ácidos.

- Fósforo total. Se determina por medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización (Kitson & Mellon, 1944).
- Sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, manganeso, zinc, níquel, cromo, cadmio y plomo totales. Estos elementos se miden en disoluciones adecuadas del extracto de digestión nítrica perclórica anteriormente obtenida, mediante un espectrómetro de absorción atómica.
- Índice de germinación (IG). El índice de germinación (IG) fue determinado usando semillas de *Lepidium sativum* L. (Zucconi et al., 1985). Se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y longitud de las raíces de semillas *Lepidium sativum* L., incubadas en un extracto acuoso del compost. Se pesan 2 gramos de muestra y se añaden 30 ml de agua destilada, se agita y se deja en reposo por 30 min, se filtra la mezcla en un embudo buchner a través de papel filtro de 0,45 micras para el análisis cuantitativo. Se toma 1ml de muestra y se coloca sobre la caja Petri previamente rotulada junto con 8 semillas. Por cada muestra se trabajó con 10 cajas Petri. De la misma manera se

prepara un blanco con agua destilada. Se envuelven las cajas Petri con papel aluminio para evitar que se sequen y se las coloca en la incubadora a 27,5 °C por 48 horas. Finalmente, pasado este tiempo se cuentan las semillas germinadas y se mide la longitud de la raíz con pie de rey.

- Carbono extraíble. Se realiza una extracción de la muestra con hidróxido sódico (Cegarra et al., 1974) 0,1 M en la proporción 1:20, se agita durante 4 horas y se centrifuga. El líquido sobrenadante pasa a través de una malla de fibra sintética, se introducen 25 ml del extracto en viales y se determina el carbono extraído en un analizador elemental, según la técnica de (Sánchez-Monedero et al., 1996).
- Carbono hidrosoluble. Se realiza la extracción del mismo modo que para el carbono extraíble, pero se sustituye el hidróxido sódico por agua desionizada y el tiempo de agitación se reduce a 2 horas.
- Polifenoles solubles. Se determinan los polifenoles solubles presentes en los compost mediante extracción acuosa en relación 1:20 y determinación por medio de una modificación del método Folin (Beltrán et al., 1999). Los reactivos usados son: Ácido gálico, Reactivo Folin-Ciocalteu de fenoles y Carbonato sódico 20 %. Para esto se pesan 2 g del residuo seco y homogeneizado y se le añaden 40 mL de agua desionizada y se agita durante 2 horas. Después de la agitación, se centrifuga a 3000 rpm 5 minutos. El extracto obtenido se emplea para la determinación de los polifenoles solubles.  
Curva patrón: Se pesan 1 g de ácido gálico y se llevan a 1 L con agua desionizada en matraz aforado. Esta disolución contiene 1000 ppm de ácido gálico. De esta disolución se toman exactamente 6 mL y se llevan a 100 mL con agua desionizada. Esta disolución contiene 60 ppm de ácido gálico. En matraces aforados de 50 mL se toman: 0, 1, 2, 3, 4 y 5 mL de la disolución anterior y se le adicionan 2,5 mL de reactivo Folin-Ciocalteu. Se agita para homogeneizar y después de 3 minutos, se añaden 5 mL de una solución acuosa de carbonato sódico al 20 %, se mueve para eliminar las burbujas generadas y se lleva a enrase con agua desionizada. Estas disoluciones contienen: 0 ; 1,2; 2,4; 3,6; 4,8 y 6 ppm de ácido gálico y se procede de igual forma que para las muestras problema.  
Determinación de fenoles: Se toman 0,5 mL de disolución acuosa de polifenoles (un volumen mayor si hay pocos polifenoles) y 2,5 mL de reactivo Folin-Ciocalteu, se agita y después de 3 minutos se añaden 5 mL de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 20 %. Se lleva el volumen a 50 mL con agua desionizada, se mezcla todo bien y después de 1 hora de reposo se mide la absorbancia en un espectrofotómetro a una longitud de onda de 725 nm, calculándose la concentración de polifenoles respecto a la recta patrón.
- Fraccionamiento del carbono de ácidos húmicos y fúlvicos. (Cegarra, 1978). Se precipitan los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en el extracto acuoso de

hidróxido sódico, se adiciona H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado hasta llevarlo a pH 2, se deja en reposo a 4°C durante 24 horas, para conseguir una completa precipitación de los ácidos húmicos. Estos se separan del líquido sobrenadante, ácidos fúlvicos, por decantación y centrifugación. El líquido sobrenadante pasa a través de una malla de fibra sintética, y se determina el carbono de ácidos húmicos por diferencia entre el carbono extraíble y el carbono de ácidos fúlvicos. El resultado se expresa en porcentaje.

$$C_{ah} (\%) = C_{ex} (\%) - C_{af} (\%)$$

