

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA



FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

TEMA:

MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE Y EFICIENCIA DE LOS  
PROCESOS DE COMPOSTAJE TAKAKURA Y LOMBRICULTURA EN EL CENTRO  
INTEGRAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE LOJA

Tesis de Grado Previa a la Obtención del Título  
de: INGENIERO EN MANEJO Y CONSERVACIÓN  
DEL MEDIO AMBIENTE

AUTOR:

ROGER ANDRÉS BUSTOS VILLAMAR

DIRECTORA:

Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo Mg. Sc

LOJA-ECUADOR

2019

**CERTIFICACIÓN**

Loja, 22 de Agosto del 2019.

**Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo, Mg. Sc.  
DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y  
CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE**

**CERTIFICA:**

En calidad de directora de la tesis titulada **“MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE Y EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE COMPOSTAJE TAKAKURA Y LOMBRICULTURA EN EL CENTRO INTEGRAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE LOJA”**, de autoría del Sr. Roger Andrés Bustos Villamar con C.I. 1500622426, egresado de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certifico que la investigación ha sido culminada dentro del cronograma aprobado y autorizo continuar con los trámites de graduación correspondientes.

*Atentamente,*

**Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo Mg. Sc**  
**DOCENTE CIMCMA**

## CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL

En calidad de Tribunal Calificador de la tesis titulada “**MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE Y EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE COMPOSTAJE TAKAKURA Y LOMBRICULTURA EN EL CENTRO INTEGRAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA CIUDAD DE LOJA**”, de autoría del señor **Roger Andrés Bustos Villamar**, egresado de la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certificamos que la misma ha sido revisada e incorporada todas las sugerencias efectuadas por los miembros del tribunal, y una vez revisada se ha procedido a la respectiva calificación.

Por lo tanto, autorizamos al señor egresado, la publicación de la versión final de la tesis y entrega oficial para su disertación pública.

Loja, 06 de septiembre de 2019

Atentamente,

Mg.Sc., Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo  
**PRESIDENTE TRIBUNAL DE GRADO**

Ph.D., Iván Patricio Burneo Saavedra  
**VOCAL DEL TRIBUNAL**

Mg.Sc., Carlos Guillermo Chunchu Morocho  
**VOCAL DEL TRIBUNAL**

## AUTORÍA

Yo, Roger Andrés Bustos Villamar declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca virtual.



Roger Andrés Bustos Villamar

CI: 1500622426

Loja, 06 de septiembre de 2019

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA  
CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN  
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, Roger Andrés Bustos Villamar declaro ser autor de la tesis titulada “**MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE Y EFICIENCIA DE LOS PROCESOS DE COMPOSTAJE TAKAKURA Y LOMBRICULTURA EN EL CENTRO INTEGRAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA CIUDAD DE LOJA**”, como requisito para optar al grado de: Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los seis días del mes de septiembre de dos mil diecinueve, firma el autor

  
Roger Andrés Bustos Villamar

CI. 1500622426

Dirección: Barrio Daniel Álvarez, ciudad de Loja

Teléfono celular: 0985520191

Correo electrónico: andresroger1993@gmail.com

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Directora de Tesis:** Ing. Raquel Verónica Hernández Ocampo Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo Mg. Sc.

Ing. Iván Patricio Burneo Saavedra Ph. D.

Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho Mg. Sc.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar un profundo agradecimiento a mi directora de tesis Ing. Raquel Verónica Hernández Mg. Sc., por su constante apoyo, guía, paciencia y sugerencias que me ayudaron a consolidar y culminar la presente investigación. Además, manifiesto mi más agradecimiento al Ing. Carlos Guillermo Chunchu Morocho Mg. Sc., quien me ayudo a orientar mi investigación de mejor manera en cooperación con la Ing. Raquel Hernández.

Asimismo, quiero agradecer al Ing. Yohnel Ramírez Armijos. Coordinador del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja, quien supo apoyarme en todo el tema logístico. También quiero agradecer a la carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio, por enriquecerme de conocimientos básicos teóricos-prácticos, permitirme mejorar mis aptitudes y actitudes, conocer personas maravillosas y madurar como ser humano y como profesional.

Finalmente, expreso un infinito agradecimiento a mi padre, mi madre y mis hermanos, que siempre me apoyaron durante mi carrera universitaria, si ellos no sería posible llegar tan lejos en mis estudios y son el pilar fundamental de mi vida.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo, tiempo y esfuerzos primero a Dios por darme vida y fuerzas para seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi padre Kenny quien supo enseñarme todos los valores humanos y estuvo ahí siempre que necesite de su apoyo.

A mi madre Patricia, quien a la distancia me brindaba su apoyo sus consejos y sus ánimos para continuar en mi carrera universitaria.

A mis hermanos Melissa y Ariel, por demostrarme el sincero cariño y su apoyo a pesar de la distancia.

**Roger Andrés Bustos Villamar**



## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MARCO TEÓRICO .....	4
2.1.	Efecto invernadero.....	4
2.1.1.	Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	5
2.1.2.	Mitigación de los GEI .....	6
2.2.	Huella ecológica .....	7
2.2.1.	Huella de Carbono.....	8
2.2.2.	Dióxido de Carbono Equivalente .....	9
2.3.	Captura de carbono.....	10
2.4.	Residuos Sólidos Urbanos.....	11
2.5.	Tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos.....	12
2.5.1.	Reciclaje .....	13
2.5.2.	Compostaje.....	14
3.	MARCO LEGAL .....	18
4.	METODOLOGÍA.....	20
4.1.	Área de estudio.....	20
4.2.	Descripción de la zona.....	20
4.3.	Materiales .....	21
4.4.	Métodos .....	21
4.4.1.	Determinación de la cantidad de dióxido de carbono presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.....	23



4.4.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.....	27
4.4.3. Análisis de la calidad del compostaje Takakura y lombricultura realizado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.....	28
5. RESULTADOS .....	29
5.1. Determinación de la cantidad de CO <sub>2</sub> presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura. ....	29
5.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura.	31
5.3. Análisis de la calidad y comparación de los compostajes Takakura y lombricultura. .	32
6. DISCUSIÓN.....	34
6.1. Determinación de la cantidad de dióxido de carbono presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura. ....	34
6.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura	36
6.3. Análisis de la calidad del compostaje Takakura y lombricultura. ....	37
7. CONCLUSIONES.....	41
8. RECOMENDACIONES .....	43
9. BIBLIOGRAFÍA.....	44
10. ANEXOS.....	53

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Análisis de calidad del compost Takakura.....	15
<b>Tabla 2.</b> Análisis de calidad de compost obtenido mediante la lombricultura.....	16
<b>Tabla 3.</b> Factores de emisión y Potenciales de Calentamiento Global.....	24
<b>Tabla 4.</b> Factores de Emisión utilizados en el tratamiento biológico.....	26
<b>Tabla 5.</b> Emisiones parciales de CO <sub>2</sub> <sup>e</sup> para los dos tipos de compostaje .....	29
<b>Tabla 6.</b> Emisiones totales de CO <sub>2</sub> <sup>e</sup> para los dos tipos de compostaje .....	30
<b>Tabla 7.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> <sup>e</sup> para ambos compostajes en un periodo medio de 100 años. ....	30
<b>Tabla 8.</b> Análisis de calidad de los compostajes Takakura y lombricultura. ....	32
<b>Tabla 9.</b> Análisis Fitopatológico de los compostajes Takakura y lombricultura. ....	33

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Ubicación del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos .....	20
<b>Figura 2.</b> Emisión de dióxido de carbono equivalente, según el peso de los residuos orgánicos ingresados del año 2014 al año 2018 en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos. ....	31

**LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO 1.</b> Proceso de elaboración del compostaje mediante la lombricultura que se realiza en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja. ....	53
<b>ANEXO 2.</b> Proceso de elaboración del compostaje Takakura en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos.....	55
<b>ANEXO 3.</b> Aplicación de la Ec. 1 para los gases considerados en el estudio para el compostaje Takakura y lombricultura. ....	57
<b>ANEXO 4.</b> Aplicación de la Ec. 2 para los gases considerados en el estudio para el compostaje Takakura y lombricultura. ....	59
<b>ANEXO 5.</b> Aplicación de la Ec. 3 para la emisión de dióxido de carbono equivalente según el peso de los residuos sólidos orgánicos ingresados del año 2014 al año 2018 en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.....	60
<b>ANEXO 6.</b> Registro fotográfico .....	61

**ACRÓNIMOS**

<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
<b>CMNUCC</b>	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
<b>CO<sub>2</sub><sup>e</sup></b>	Dióxido de Carbono Equivalente
<b>DEFRA</b>	Department for Environment, Food and Rural Affairs (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales)
<b>EM</b>	Effective Microorganisms (Microorganismos Eficientes)
<b>GAD</b>	Gobierno Autónomo Descentralizado
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>HC</b>	Huella de Carbono
<b>HE</b>	Huella Ecológica
<b>IGES</b>	Institute for Global Environmental Strategies (Instituto de Estrategias Ambientales Globales)
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
<b>NT</b>	Nitrógeno Total
<b>PCG</b>	Potencial de Calentamiento Global (Global-warming potential)
<b>RSU</b>	Residuos Sólidos Urbanos

## RESUMEN

En la presente investigación se realizó la medición del dióxido de carbono equivalente y la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos en la ciudad de Loja. Se determinó el dióxido de carbono equivalente mediante los pesos iniciales de cada compostaje, además se consideró el peso final de los mismos y los factores de emisión de los gases de efecto invernadero, y con ello se obtuvo una aproximación de la huella de carbono para el compostaje Takakura y lombricultura. Para la estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje se usaron los valores obtenidos de la aproximación de la huella de carbono, y se obtuvieron los porcentajes aproximados de la eficiencia de la captura de carbono para ambos compostajes. Para analizar la calidad de los compostajes se determinó el contenido de materia orgánica, el potencial de hidrógeno, óxido de fósforo, nitrógeno total y óxido de potasio. Los resultados de la aproximación de la huella de carbono determinaron que el compostaje Takakura tiene una mayor emisión de dióxido de carbono equivalente con un valor de 2 875,6 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> y en cuanto a la eficiencia el compostaje mediante la lombricultura obtuvo un valor de 4,40%. Finalmente, el valor nutricional del compost Takakura es superior, en comparación con el compost elaborado mediante la lombricultura, el cual no presentó bacterias nocivas para el ser humano como la *Escherichia coli*.

**Palabras clave:** dióxido de carbono equivalente, estimación, huella de carbono, eficiencia, compostaje, Takakura, lombricultura.

## ABSTRACT

In the present study was carried out the measurement of the carbon dioxide equivalent and the efficiency of the composting processes Takakura and vermiculture in the Integral Center of Solid Waste Management in the city of Loja. To do this, it was determined the carbon dioxide equivalent using the initial weights of each composting, in addition, it was considered the final weight and emission factors for greenhouse gases and thus obtained an approximation of the carbon footprint for composting Takakura and vermiculture. To estimate the efficiency of the processes of composting, were used the values obtained from the approximation of the carbon footprint, and were obtained approximate percentages of the efficiency of carbon capture for both compostajes. To analyze the quality of compostajes it was determined the content of organic matter, the potential of hydrogen, the oxide phosphorus, total nitrogen and potassium oxide.

The results of the approximation of the carbon footprint determined that Takakura composting has a higher emission of carbon dioxide equivalent with a value of 2 875.6 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> and in terms of efficiency vermiculture composting obtained a value of 4.40%, and finally, the nutritional value of Takakura compost is superior, in comparison with the vermiculture compost, which presented no harmful bacteria to humans such as *Escherichia coli*.

**Keywords:** carbon dioxide equivalent, estimation, carbon footprint, efficiency, composting, Takakura, vermiculture.



## 1. INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es uno de los principales problemas ambientales en las zonas urbanas y rurales de las ciudades, debido a criterios como la demografía, el modo de vida consumista y las actividades cotidianas de la dinámica poblacional (Salmerón et al., 2017). La acumulación de los RSU genera diferentes impactos a nivel ambiental, paisajístico, social, económico, de gestión municipal y de salubridad (Bonilla y Núñez, 2012).

Los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD's) son los responsables de proveer el servicio público de gestión integral de los residuos sólidos (separación en la fuente, reciclaje, almacenamiento y disposición final) (Rodríguez, 2008). La ciudad de Loja tiene responsabilidad en la gestión adecuada de los RSU, Loja produce un promedio de 135 toneladas diarias de RSU de los cuales el 60% corresponden a residuos orgánicos. Los residuos orgánicos son tratados en la planta de lombricultura, ubicada dentro del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos bajo la administración del municipio de la ciudad de Loja (Hernández, Torres, y Ramírez, 2015). La acumulación de los residuos orgánicos en la planta de lombricultura, para su posterior transformación en compostaje, produce emanaciones de gases (como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso) que pueden ser contabilizadas dentro de una estimación de la Huella de Carbono, pero solo como un elemento informativo según el estudio de Zúñiga (2013).

La estimación de la Huella del carbono permite conocer la cantidad de Dióxido de Carbono Equivalente ( $\text{CO}_2^e$ ) producida en un sistema, lo que contribuye a la comprensión del medio ambiente (natural) y su relación con los sistemas sociales (economía) según el estudio de Ocampo y Restrepo (2016). Para el presente estudio se realizó una estimación de la Huella de carbono (HC), usando la relación de peso inicial de los residuos orgánicos y el peso final del compostaje elaborado, así como los valores de emisión para cada Gas de Efecto Invernadero

(GEI) considerado dentro de este estudio. Los GEI se presentan en unidades de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para mejorar su cuantificación, y su posterior comparación entre las emisiones de ambos compostaje de interés y la emisión anual de los RSU orgánicos que ingresan en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja (Salmerón G. et al., 2017).

El Dióxido de Carbono equivalente es una medida estándar del inventario de los GEI y de esta manera es posible determinar los niveles de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> presentes en la atmósfera, así como su impacto a la temperatura media del planeta (Salmerón et al., 2017). Los valores de emisión obtenidos de la estimación de la Huella de Carbono permiten realizar una comparación entre los dos tipos de compostaje, la eficiencia en el proceso de captura de carbono y de esta manera elegir el mejor proceso de compostaje considerando sus emisiones. Por lo mencionado anteriormente, el presente trabajo contribuye al incremento del conocimiento científico y la aportación de nuevos resultados que ayuden a mejorar la gestión de los RSU orgánicos para reducir las afectaciones negativas de la contaminación en la población. Para lo cual se plantearon los siguientes objetivos:

**Objetivo general:**

- Medir la cantidad de dióxido de carbono equivalente y eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura implementado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

**Objetivos específicos:**

- Determinar la cantidad de dióxido de carbono presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

- Estimar la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.
- Analizar la calidad del compostaje Takakura y lombricultura realizado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

## **2. MARCO TEÓRICO**

Los conceptos más importantes considerados dentro de la investigación son los siguientes: el efecto invernadero es un fenómeno natural producido por los Gases de Efecto Invernadero (GEI), la importancia en el estudio radica en la relación directa con el aumento de GEI (en el presente estudio el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso) y el aumento de la temperatura de la Tierra. Por este motivo también se menciona la mitigación de los GEI como alternativa para evitar el incremento de estos gases. Además, se aborda el concepto de Huella Ecológica (HE) y como parte de la HE se estudia la Huella de Carbono (HC) concepto utilizado para el presente estudio como estimación de la HC. Es necesario mencionar que la HC se presenta en medidas de Dióxido de Carbono Equivalente para mejorar la cuantificación de los gases. De igual manera, se manifiesta que la Captura de Carbono es una técnica de retención del carbono y se menciona las diferentes formas en las que se encuentra capturado. Asimismo, se define a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) con una clasificación general (para entendimiento del estudio) y se señala algunos de los Tratamientos de los RSU, especialmente los usados en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja. Finalmente se hace una referencia a los tratamientos para los RSU orgánicos en el Centro Integral los cuales son el compostaje Takakura y lombricultura. Por otro lado, se menciona un apartado para la parte legal para la gestión de los RSU y una ordenanza que busca la reducción de la HE en la ciudad de Loja.

### **2.1. Efecto invernadero**

El efecto invernadero es un fenómeno natural, que se produce cuando los Gases de Efecto Invernadero (GEI) absorben la radiación solar que llega a la Tierra, parte de esta radiación calienta la superficie terrestre y el resto es reflejada al espacio. Además, los GEI retienen la radiación infrarroja emitida por la Tierra y de esta manera mantienen la temperatura

media del planeta. La radiación atmosférica (es la combinación de la radiación infrarroja y solar) se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre (IPCC, 2002).

El efecto invernadero se produce cuando el flujo solar (o radiación solar) viaja por el espacio y penetra la atmósfera. La atmósfera está compuesta de muchos gases (como el dióxido de carbono, metano, etc.) los cuales absorben parte de esta energía, calentando sus moléculas y por consiste calentando la atmósfera. La energía del sol que no es absorbida es devuelta al espacio, y de esta manera se mantiene el equilibrio de la temperatura media de la Tierra (Manahan, 2007; Morata, 2014).

La cantidad de GEI en la atmósfera influye directamente en el efecto invernadero. Es decir, el rápido incremento de la temperatura global es producto del “efecto invernadero” como consecuencia de la liberación de GEI de origen antropogénico a la atmósfera. Por lo cual el efecto invernadero puede intensificarse por la intervención antrópica, y sus emanaciones de GEI (Manahan, 2007; ASEGRE, 2010).

### **2.1.1. Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) son aquellos compuestos que pueden absorber la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra. Los principales GEI son: el vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el ozono ( $O_3$ ). Los GEI pueden provenir de fuentes naturales como de fuentes antropogénicas derivadas, en gran parte, de las actividades industriales como cementeras, metalúrgicas, etc., u otras actividades como la agricultura y la ganadería. Estas actividades antrópicas producen GEI como los clorofluorocarbonos (CFC), el hexafluoruro de azufre, los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el trifluoruro de nitrógeno (Ríos, Arango, Acevedo y Vera, 2013).

La liberación de GEI antropogénico a la atmosfera produce un rápido incremento de la temperatura global. Cada GEI tiene diferente capacidad de provocar calentamiento global, debido a que su intensidad depende de su poder de radiación y el tiempo promedio que la molécula del GEI se encuentra presente en la atmósfera. Al considerarse estos dos factores, al promedio de calentamiento que causan, se denomina como Potencial de Calentamiento Global (PCG) que se expresa en unidades de (CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>) dióxido de carbono equivalente (ASEGRE, 2010; Espíndola y Valderrama, 2011).

Las emisiones de GEI son el resultado de una dinámica de sistemas como el crecimiento demográfico, socio-económico y el desarrollo tecnológico, cuyo origen deriva de la actividad humana (Morata, 2014). El incremento de la temperatura media del planeta asociado al efecto invernadero antropogénico promueve el interés en la búsqueda de estrategias de mitigación de los GEI (Cayambe, Iglesias, García, Chuquillanqui y Riga, 2015).

### **2.1.2. Mitigación de los GEI**

La mitigación de los GEI involucra cambios en las actividades diarias de la población y en las actividades económicas con la finalidad de disminuir la emisión de los GEI y reducir los efectos negativos del cambio climático. De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las estrategias de mitigación son todas las políticas y tecnologías tendientes a limitar y reducir las emisiones de GEI (Ríos et al., 2013).

La mitigación de los GEI es un tema de interés público considerado desde el año 1992 en la CMNUCC, que implica un compromiso especialmente por parte de los países industrializados para disminuir las emisiones de GEI. El compromiso establece que cada país es responsable de elaborar, actualizar y publicar inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas; además de formular, aplicar y actualizar periódicamente los programas de mitigación y adaptación del cambio climático (Cayambe et al., 2015).

El gobierno de Ecuador identificó cinco estrategias de mitigación priorizadas: i) reducción de deforestación de bosques nativos; ii) manejo sustentable de bosque con aprovechamiento de madera de bosque nativo; iii) forestación y reforestación para captura de CO<sub>2</sub>; iv) reducción de emisiones vía sistemas productivos sostenibles (agroforestería); v) reducción de emisiones vía restauración y conservación de suelos. La cobertura es de 4 650 000 hectáreas con una reducción de emisiones de 2 116,10 t CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> y una captura de 365,70 t CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>, a un costo estimado de 1 680 millones de dólares (Manaf, Samah, y Zukki, 2009; Ludeña y Wilk, 2012).

Las estrategias de mitigación y la Huella Ecológica son usadas como herramientas de planificación para un país. En este contexto, en el siguiente apartado se define el concepto de Huella Ecológica.

## **2.2. Huella ecológica**

La Huella Ecológica (HE) es usada como herramienta de planificación para un país, ésta mide la superficie terrestre y la cantidad de agua biológicamente productiva que un individuo, comunidad o la humanidad necesita para producir los recursos que consume y absorber los desechos que genera, y compara esta medida con la cantidad de tierra y mar disponible (Martínez, 2007).

En otras palabras, la HE de un país es la suma de las huellas de los recursos obtenidos y desechos generados dentro de los límites geográficos, incluye toda el área que se requiere para cosechar los productos primarios (agricultura, pastos y marina), la infraestructura y energía eléctrica (superficie construida). De esto modo, la Huella de Carbono (incluida dentro de la HE) es el área necesaria para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> provenientes de los combustibles fósiles o de las actividades productivas realizadas (Andrade, Defáz, y Portilla, 2014).



### 2.2.1. Huella de Carbono

La Huella de Carbono (HC) también llamada Huella Energética representa la cantidad de GEI emitidos a la atmósfera provenientes de las actividades antropogénicas (producción o consumo de bienes y servicios). La HC es una de las herramientas más importantes para cuantificar las emisiones de los GEI (Espíndola y Valderrama, 2011).

Según Cayambe et al. (2015) describe que la HC es una expresión cuantitativa de las emisiones de GEI de una actividad, que ayuda en la gestión de las emisiones y en el diagnóstico de las medidas de mitigación. De igual manera CEPAL (2013) menciona que la HC se define como la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un producto, organización o individuo. La HC puede ser considerada como un instrumento de mitigación, pero debe seleccionarse la metodología adecuada para su estimación.

Existen diversas metodologías para la estimación de la HC, las más conocidas son la propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA). Estas metodologías se basan en la aplicación de ecuaciones de primer nivel (que proporciona un factor de emisión sin especificidad geográfica donde se realiza la estimación), de segundo nivel (que considera un valor de emisión específico de la región, continente o país donde se realiza el estudio) y tercer nivel (donde el factor de emisión es específico para la localidad donde se realiza la estimación de la HC) (Zúñiga, 2013). Además, se considera aspectos como los límites de la organización y los límites operativos.

Los límites de la organización abarcan la jerarquización de una empresa o institución (las distintas áreas dentro de la empresa y sus correspondientes emisiones) y las actividades que realiza cada área identificada. Por otro lado, los límites operativos corresponden al alcance de las operaciones que están bajo responsabilidad de la empresa o institución y de esta manera

evitar un doble conteo en los valores de emisión calculados (Andrade et al., 2014). Así mismo es importante mencionar el concepto de distribución.

La distribución, dentro de la estimación de la HC se define como el análisis de un procedimiento desde su fase inicial hasta su fase de finalización. De esta manera la distribución aprovecha la información obtenida tanto al inicio de un proceso (como la elaboración de un producto) hasta llegar a la finalización del mismo (el producto elaborado) (Osuna y Spendeler, 2013; IPCC, 2013).

La estimación de HC se expresa en medidas de Dióxido de Carbono Equivalente, para mejorar la comprensión y cuantificación de las emisiones de los GEI, se detalla en el siguiente apartado.

### **2.2.2. Dióxido de Carbono Equivalente**

El dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2^{\text{e}}$ ) es una medida, en toneladas o kilogramos, de todos los gases considerados dentro de la HC; se expresan de esta manera para mejorar su comprensión y la cuantificación de los gases. Esta medida se considera dentro de un inventario de GEI, para facilitar el cálculo de la HC en las áreas de interés dentro de una empresa o institución (IPCC, 2013). Un elemento importante dentro del cálculo de HC es el Potencial de Calentamiento Global de un GEI.

Las emisiones de  $\text{CO}_2^{\text{e}}$  se calculan usando el Potencial de Calentamiento Global y multiplicándolo por el factor de emisión de un GEI. Es necesario mencionar que el  $\text{CO}_2$  es usado como referencia para medir otros gases, razón por la cual su PCG es igual a uno (ASEGRE, 2010; IPCC, 2013).

Por otra parte, la captura de carbono es uno de los conceptos claves de la investigación y se define como una técnica de retención del carbono, las diferentes formas de

almacenamiento, y el porcentaje de eficiencia en la retención al considerar al carbono dentro de un sistema.

### 2.3. Captura de carbono

La captura de carbono es una técnica que se fundamenta en la retención del CO<sub>2</sub> emitido por algún sistema (como una instalación) de tal manera que el carbono no sea emitido a la atmósfera. Los procesos más comunes de captura son la precombustión, la oxicomcombustión y la post combustión. La captura de carbono busca reducir las emisiones atmosféricas de carbono derivadas de las actividades antropogénicas, pero no debe confundirse con el secuestro de carbono que consiste en la eliminación del carbono existente en la atmósfera mediante procesos naturales (como el crecimiento de los bosques) (Aguinaco, 2008; Sanz, 2013).

El carbono se encuentra almacenado en diversas formas. Los tipos de carbono almacenado, tanto en componentes bióticos como en componentes abióticos (Masera y Ordóñez, 2016). Se pueden clasificar en:

- **Carbono en vegetación (C<sub>v</sub>).** - Es la suma del carbono que se encuentra contenido en la biomasa aérea (tronco, hojas, ramas) y de las raíces (sistema radicular).
- **Carbono en descomposición (C<sub>d</sub>).** - Es el carbono presente en la materia orgánica (M.O.) que se encuentra en proceso de descomposición, se origina cuando las hojas, ramas, troncos son depositados en el suelo. También se considera los residuos orgánicos que procedan de cualquier otra fuente, y que se encuentren dispuestos en rellenos sanitarios, botaderos, etc. (Cáceres y Cáceres, 2011)
- **Carbono en productos (C<sub>p</sub>).** - Productos forestales que almacenan carbono en su ciclo de vida, es decir, a mayor tiempo de vida media de un producto forestal el carbono se almacenará por más tiempo.

- **Carbono en el suelo (Cs).** - Es el carbono contenido en las capas que conforman la estructura del suelo forestal; este suelo se origina por la desestructuración de la roca madre expuesta, a lo largo del tiempo forma capas por deposición de materiales; al irse acumulando y compactando, almacena una cantidad de carbono, que irá en aumento por el continuo proceso de formación del suelo.

La labranza es una de las prácticas que afectan negativamente al secuestro del carbono, ésta expone el suelo a agentes erosivos (agua o viento), y facilita el contacto de los organismos heterótrofos presentes en el suelo con la presión del oxígeno de la atmósfera favoreciendo la mineralización de la materia orgánica, en vez de su descomposición; y además disminuye el tamaño y estabilidad de los agregados del suelo (Martínez, Fuentes, y Acevedo, 2008).

La eficiencia en la tecnología de captura de carbono es uno de los aspectos mas importantes dentro de la HC. La eficiencia es la capacidad que posee un sistema para almacenar las emisiones de carbono, en unidades de porcentaje (%), con esta medida se puede comparar la efectividad que tiene los sistemas empleados considerados dentro de la captura del carbono (Sanz, 2013).

Por otra parte los Residuos Sólidos Urbanos son destinados al Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos, aquellos de origen orgánico poseen carbono en descomposición, pero es prudente mencionarlos sin importar su procedencia y de esta manera que sea correctamente identificados en el siguiente apartado.

#### **2.4. Residuos Sólidos Urbanos**

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son los residuos generados en espacios urbanos como consecuencia de las actividades de consumo y, de la gestión de actividades domésticas o de servicios. Los RSU se pueden clasificar como no peligrosos (que se pueden reutilizar) o

peligrosos (que representan un riesgo para la salud y/o para el medio ambiente por su condición de toxicidad, persistencia o de no biodegradabilidad) (Castillo y Villalobos, 2015). En Ecuador se genera aproximadamente 2 542 064 toneladas de residuos orgánicos y 4 142 143 toneladas de residuos inorgánicos (MAE, 2015). La producción per cápita de desechos sólidos en la ciudad de Loja es de 0,70 Kg/Hab/día, lo que representa un promedio de 135 toneladas diarias, de los cuales el 60% corresponde a residuos orgánicos y el 40% a inorgánicos (Hernández et al., 2017).

Los RSU son una mezcla de componentes, su clasificación más sencilla es la de residuos orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos provienen de la biomasa, la mayoría de estos se pueden descomponer por acción de los microorganismos (biodegradación). El papel, el cartón, los cueros y las gomas también provienen de la biomasa, pero debido a su composición se degradan lentamente. Por otro lado, los residuos inorgánicos son aquellos provenientes de la materia inerte (no pueden ser biodegradados), por lo cual no experimentan transformaciones significativas, los más comunes son el vidrio, la cerámica, baldosas y otros recipientes; también se incluyen los escombros y restos de construcciones. Los residuos inorgánicos permanecen por largos periodos de tiempo, debido a su condición de no biodegradabilidad, a diferencia de los residuos orgánicos que pueden degradarse en condiciones ambientales (Aguilar, Vega, Taboada, y Aguilar, 2010; Cervetto y Molina, 2017).

Existen diversos tratamientos de los RSU, pero se considera al reciclaje y compostaje los más importantes de acuerdo al tipo de residuos encontrados en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

## **2.5. Tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos**

En los RSU, la materia orgánica es el componente más abundante y está compuesta por restos de comida, vegetales, poda de árboles y jardín. Los residuos orgánicos tienen la

capacidad de transformarse biológicamente en gases y en sólidos orgánicos inertes, mediante tratamientos biológicos y térmicos. Los tratamientos de los RSU son una estrategia de reducción del volumen total de residuos en un área determinada, como una ciudad o un país (Vaca y Sánchez, 2007; Cervetto y Molina, 2017). Estos tratamientos de los RSU incluyen las actividades de generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición de los residuos (Sharholy, Ahmad, Mahmood, y Trivedi, 2008; Palanivel y Sulaiman, 2014), con la finalidad de proteger al ambiente y la calidad de vida de la población (Zhu, Asnani, Zurbrügg, Anapolsky, y Mani, 2008).

El tipo de tratamiento a implementarse debe ser elegido en base a diferentes factores como: económicos, sociales y ambientales. Además, el mejoramiento de estas actividades permite que incremente la vida útil de un relleno sanitario (Hoornweg y Bhada, 2012). El Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja cuenta con una planta de reciclaje y una planta de lombricultura, donde se realiza el tratamiento de los RSU de la ciudad de Loja (Hernández et al., 2017).

### **2.5.1. Reciclaje**

El reciclaje consiste básicamente en los mecanismos y operaciones complejas que permiten la recuperación, la transformación y la elaboración de un material a partir de los residuos producidos en la zona urbana. El reciclaje permite aprovechar los residuos como un bien para producir otros productos, reducir la demanda de los recursos y el volumen de los residuos producidos (Solans y Gadea, 2015). De igual manera Vaca y Sánchez (2007) señalan que el reciclaje es un proceso por el cual un material es recuperado para elaborar un nuevo producto, sin recurrir al gasto de nuevas materias primas. Los residuos que son reciclados con mayor frecuencia son:

- **Reciclaje de papel y cartón.** - Depende del tipo de material del papel o cartón para que el mismo se aproveche como materia prima. Los residuos que se pueden reciclar son el papel periódico, el cartón corrugado, el papel de alto grado (papel de computadora, papel de libros a color y blanco y negro) y el papel mezclado. Además, el reciclaje de papel y cartón involucra las etapas de desintegración y de depuración. También se pueden incluir etapas de destintado, blanqueo y refinado para mejorar la calidad y aspecto del papel y/o cartón reciclado (Aguilar, 2004; Area, 2018).
- **Reciclaje de plástico.** – Se busca de la recuperación y reprocesamiento de los mismos, al término de su vida útil. Existen cuatro categorías de reciclaje de plástico, el reciclaje primario o re-extrusión, el reciclaje secundario o mecánico, el reciclaje terciario o químico y el reciclaje cuaternario o valorización energética. Los plásticos en el embalaje, envasado y en la agricultura tiene una vida útil menor a un año, por otro lado los usados en artículos domésticos o eléctricos tiene una duración de uno a diez años y los del sector mobiliario y del automóvil no aparecen como residuos antes de los diez años (Vazquez y Velasco, 2016).

### 2.5.2. Compostaje

El compostaje es un proceso de transformación de residuos orgánicos en abono. El compostaje se define como la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas, para mejorar la estructura y aportar nutrientes al suelo (Martínez, Pantoja, y Román, 2013). El abono o compostaje obtenido tiene un mejor contenido nutricional y puede ser incluido en el suelo para mejorar su productividad. Es necesario mencionar que existe diversos procesos de compostaje (Quinatoa, 2012; Samaniego, 2014). Los dos tipos de compostaje considerados para el presente estudio son el Takakura y lombricultura.



### 2.5.2.1. Compostaje Takakura

El compostaje Takakura es una tecnología de eliminación de RSU orgánicos. Este compostaje fue creado por Koji Takakura, científico del laboratorio para Estudios Medio-Ambientales de JPEC (Japan Petroleum Energy Center o Centro de Energía Petrolera de Japón) como una medida de reducción de la cantidad de residuos orgánicos de los hogares en la zona urbana. Este compostaje fue aplicado en la ciudad de Surabaya – Indonesia en el continente asiático, donde el manejo de los residuos orgánicos e inorgánicos era un grave problema ya que su producción sobrepasó la capacidad para ser gestionada (IGES, 2010). Según el estudio de Hernández et al. (2017) este compostaje fue implementado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja, por lo cual hay un precedente de su análisis de calidad que se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Análisis de calidad del compost Takakura

Parámetros	Unidad	(Hernández et al., 2017)
M.O.	%	37,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,50
NT	%	0,14
K <sub>2</sub> O	%	0,07
pH	1:100	9,1

**Leyenda:** Potencial de hidrógeno (pH), Óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Materia orgánica (M.O.), Nitrógeno Total (NT), Óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), Potencial hidrógeno (pH) y Dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub><sup>e</sup>).

**Fuente:** (Hernández et al., 2017)

La importancia del compostaje Takakura es la facilidad con la que puede ser elaborado. Además, esta técnica se desarrolló para eliminar o reducir residuos orgánicos de los hogares urbanos y no produce malos olores. Por otra parte, su elaboración requiere de ingredientes que se encuentran en todos los hogares y no necesita un conocimiento técnico avanzado para realizarlo (Honobe, 2013).

El método Takakura es un compostaje que aprovecha el metabolismo de los microorganismos los cuales descomponen la fracción orgánica, y permite reducir los residuos

orgánicos producidos en los hogares y en las actividades agropecuarias. En el método Takakura, las sustancias orgánicas y los medios de cultivo de microorganismos que se adaptan al suelo se usan para la realización del compostaje. Estos microorganismos están disponibles en el medio ambiente y sirven para eliminar los microorganismos indeseables. El uso efectivo de los mismos permite que la producción del compostaje se elabore en un espacio pequeño y en un corto período de tiempo (IGES, 2010; Honobe, 2013).

En la naturaleza tenemos dos tipos de microorganismos: los aerobios (necesitan oxígeno para sobrevivir) y los anaerobios (viene con poco oxígeno o sin él). Para la descomposición de los residuos orgánicos, el método Takakura utiliza los microorganismos aerobios. El movimiento constante del compost les da mayor disponibilidad de oxígeno a los microorganismos aerobios y minimiza la acción de los anaerobios. Asimismo, los microorganismos del método Takakura se encuentran en los alimentos fermentados (como el queso, yogurt, levadura, etc.) y en la cobertura de los bosques (hojarasca, hongos y moho). Los microorganismos de los alimentos fermentados descomponen carbohidratos, grasas y proteínas; y los microorganismos del bosque descomponen las fibras y las ligninas que son las partes más duras de la materia orgánica (Honobe, 2013).

#### **2.5.2.2. Lombricultura**

La lombricultura es una tecnología que elimina los RSU orgánicos y los transforma en abono (Humus). Esta tecnología fue implementada en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja en el año 2002, y continúa siendo utilizada hasta la actualidad. Este proceso permite el aprovechamiento de los desechos orgánicos para la producción del fertilizante orgánico y su comercialización (Guamán y Chamba, 2016). Este tipo de compost puede ser analizado considerando los parámetros mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 2.** Análisis de calidad de compost obtenido mediante la lombricultura

Parámetros	Unidad	(Mejía y Ramos, 2019)
M.O.	%	25,32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	2
NT	%	2,34
K <sub>2</sub> O	%	3,76
pH	1:100	8,01

**Leyenda:** Potencial de hidrógeno (pH), Óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Materia orgánica (M.O.), Nitrógeno Total (NT), Óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), Potencial hidrógeno (pH) y Dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub><sup>e</sup>).

**Fuente:** (Mejía y Ramos, 2019)

La lombricultura es un tipo de compostaje conocido como una actividad agropecuaria, consiste en la crianza de las lombrices, cuyo objetivo es la producción de humus de lombriz, el cual es un abono orgánico. Además la producción de lombrices se denomina pie de cría o biomasa de lombrices que constituyen una fuente de proteína (Somarriba y Guzmán, 2002).

La lombricultura se fundamenta en la metabolización de los residuos por las lombrices, que adquiere una apariencia y olor a tierra negra fresca. Este compostaje no genera malos olores o atracción de vectores, y no es necesario tener un profundo conocimiento técnico ni equipos costosos. Este tipo de lombrices tienden a crecer muy rápidamente, su reproducción es acelerada y se alimentan de materia orgánica (M.O). alcanzando altas densidades (Elorsa, 2012).

El agua es uno de los elementos básicos para el desarrollo del compostaje, ésta debe estar libre de contaminantes y agentes desinfectantes; otro elemento es el tipo de desecho que influye directamente en el desarrollo de la lombriz; y por último, el espacio que se encuentra en función de la cantidad de los desechos y las lombrices que deben ser de la especie *Eisenia fetida* para que la producción del compostaje sea la adecuada (Quinatoa, 2012; Izar y Izar, 2014).

### 3. MARCO LEGAL

La gestión de los RSU se encuentra regulada dentro de las normativas legales vigentes, donde se establece la responsabilidad de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) en el manejo de sus residuos, pero al relacionarlo con las emisiones de dióxido de carbono equivalente no se cuenta con normativas específicas en este tema. Por lo cual se presenta el siguiente marco legal:

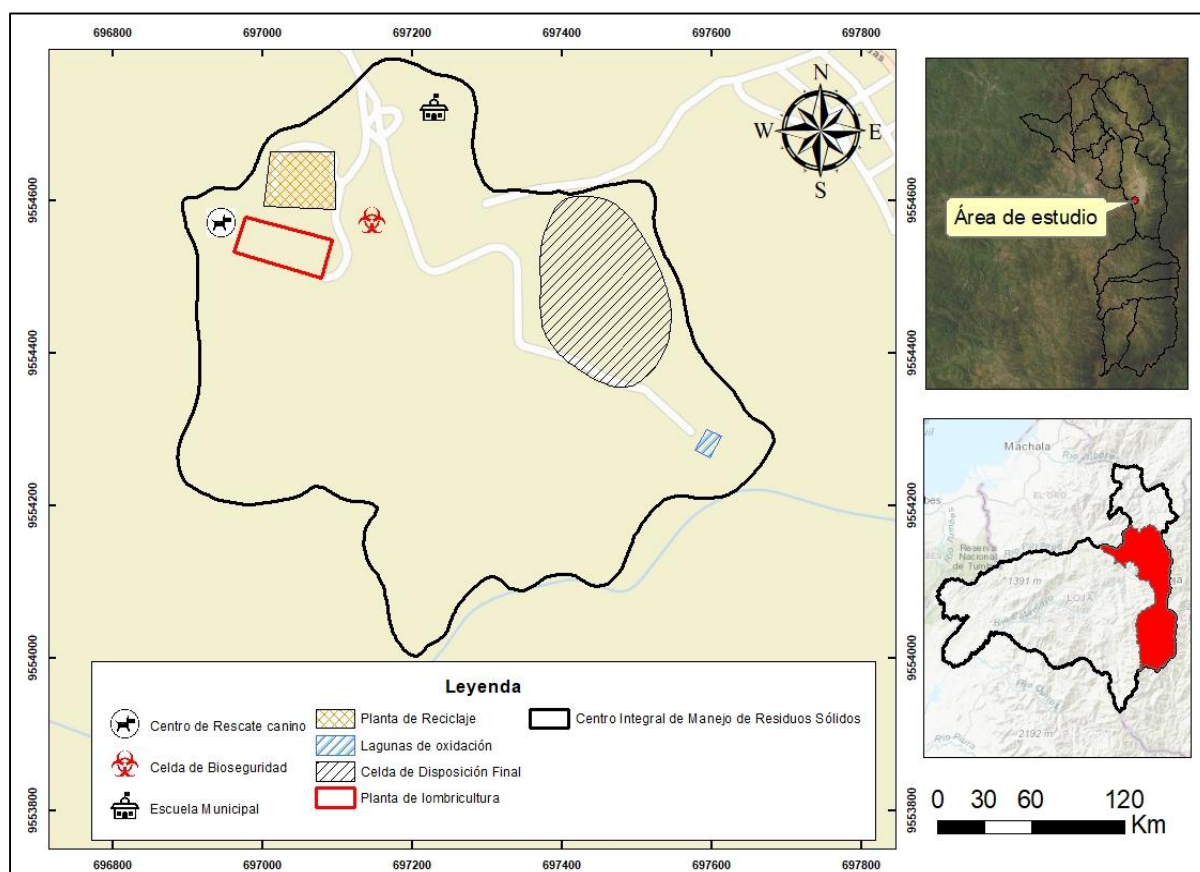
- Código del Orgánico del Ambiente (2017) menciona a la gestión de RSU teniendo en cuenta la división administrativa (GAD), los artículos 27 y 224 se detalla la responsabilidad de los GAD's Metropolitanos y Municipales en materia ambiental, asimismo la elaboración de normas y procedimientos para la gestión de los RSU. El artículo 225 señala las políticas generales de la gestión integral de los residuos y desechos.
- Recopilación Codificada de la Legislación Municipal de Loja, según Municipio de Loja (2015) dentro del Libro IV Agua potable, Alcantarillado y Protección Ambiental, donde el artículo 93 clasifica los desechos generales o comunes como basura biodegradable y basura no biodegradable. Además, el artículo 94 define la basura orgánica a toda aquella proveniente de la materia viva, de origen orgánico, de uso doméstico y de jardines, cuyos propietarios quieren deshacerse de su pertenencia; cabe mencionar que en este artículo se menciona el reciclaje de la materia orgánica, mediante la elaboración del compostaje, pero además el Municipio promoverá el compostaje individual.

- Ordenanza que regula la Implementación de prácticas amigables para reducir el índice de la huella ecológica en el cantón Loja, según Gobierno Autónomo Descentralizado de Loja (2017), se busca generar una política pública local orientada a promover las prácticas ambientales, que permitan la reducción de la huella ecológica en el cantón mediante la participación ciudadana, sector privado y público. Los establecimientos que implementen y motiven a la ciudadanía buenas prácticas ambientales serán reconocidos por el Cabildo Loja en la Sesión Solemne del 8 de diciembre de cada año.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Área de estudio

El presente estudio fue realizado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos se encuentra en el sector Chontacruz, parroquia Sucre, cantón y provincia de Loja. La ciudad de Loja se encuentra ubicada al Sur de la Región Interandina (Sierra) de la República del Ecuador (Sudamérica), en el valle de Cuxibamba, pequeña depresión de la provincia de Loja situada a 2.100 m.s.n.m. y a 4° de latitud sur (GEO-Loja, 2007).



**Figura 1.** Ubicación del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.2. Descripción de la zona

La investigación contempla el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos provenientes de los hogares de la ciudad de Loja, de los mercados públicos, de las ferias libres,

entre otras zonas; estos residuos ingresan al Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos, el cual posee una superficie total de 46 hectáreas, de las cuales solo utiliza seis. La planta de lombricultura que posee un área de 0,61 hectáreas, es la zona donde también se realizó el compostaje Takakura de tal manera que ambos compostajes tengan las mismas condiciones de elaboración.

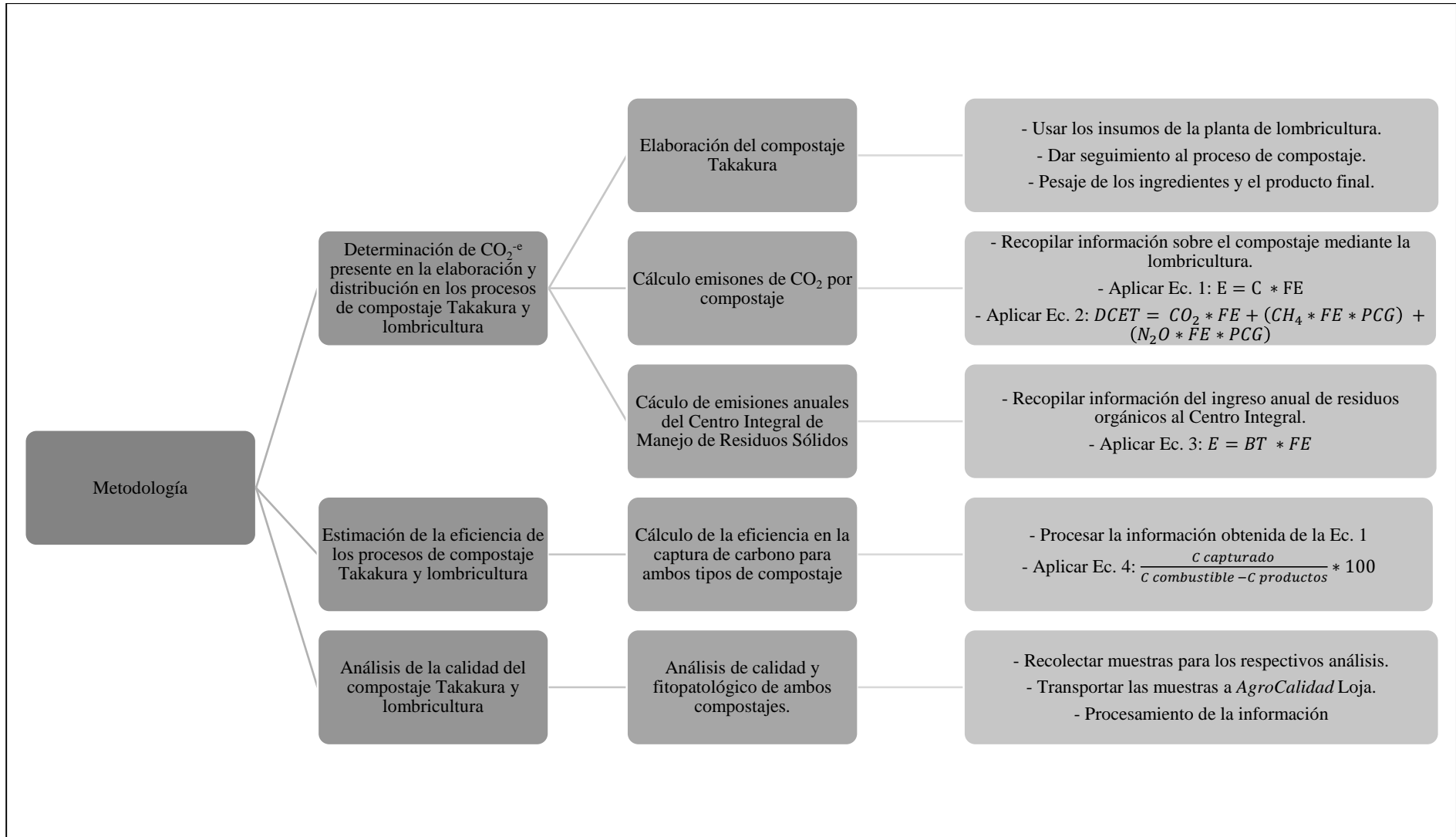
#### **4.3. Materiales**

Los materiales utilizados en la investigación son aquellos que se emplearon para la elaboración del compostaje Takakura. Estos materiales están detallados en el Anexo 2. Además, se usó una balanza digital disponible en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos para obtener los valores de peso inicial y final de los compostajes.

#### **4.4. Métodos**

Para la realización de la presente investigación se ejecutaron las siguientes metodologías con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados, las cuales se describen en el siguiente esquema:





Fuente: Elaboración propia

#### **4.4.1. Determinación de la cantidad de dióxido de carbono presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.**

La estimación de la huella de carbono se la realizó después de obtener la información sobre la elaboración del compostaje mediante la lombricultura (Anexo 1) y los datos generales de los RSU orgánicos que ingresan al Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos. Se estableció el 2014 como año base. Además, se elaboró el compostaje Takakura (Anexo 2) para obtener la información necesaria para realizar la comparación con el compostaje mediante la lombricultura. Posteriormente, se realizó la estimación de las emisiones de GEI enfocado en el dióxido de carbono. La información se revisó, excluyendo los datos innecesarios para la aplicación de las fórmulas y factores de emisión propuestos por el DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (Zúñiga, 2013).

##### **4.4.1.1. Determinación de Emisiones Totales**

Se realizó el pesaje de los materiales utilizados en la elaboración de ambos compostajes, así como el producto final de los mismos para estimar el volumen total de emisiones (Ec. 1). Tras obtener los valores entregados por el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos con sus factores de emisión, se realizó el cálculo de emisiones de los procesos de compostaje usando los factores de emisión (Ver Tabla 3) con la Ec. 1 (Zúñiga, 2013).

$$E = C * FE \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:

**E:** Emisiones, corresponde al total de emisiones [kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>].

**C:** Pesos iniciales y/o finales de los compostajes [kg].

**FE:** Factor de emisión, corresponde a la tasa de emisión de GEI por unidad multiplicado por el PCG específico a ese GEI [ $\text{kg CO}_2\text{-}^e$ ] (Ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Factores de emisión y Potenciales de Calentamiento Global

Gas de Efecto Invernadero	Fórmula molecular	100-años PCG	Factor de emisión $\text{kg CO}_2\text{-}^e / \text{t}$
<b>Dióxido de carbono</b>	$\text{CO}_2$	1	0
<b>Metano</b>	$\text{CH}_4$	21	26
<b>Óxido nítrico</b>	$\text{N}_2\text{O}$	310	65

**Leyenda:** El factor de emisión para el dióxido de carbono en este caso es cero, debido a que en la biomasa no se considera la emisión del mismo. PCG: Potencial de Calentamiento Global

**Fuente:** (ASEGRE, 2010)

Para la determinación de  $\text{CO}_2\text{-}^e$ , se aplicó la Ec. 1 usando los valores del peso de los ingredientes utilizados para realizar los compostajes y el peso final del compostaje. Se multiplicaron los pesos iniciales y finales de cada compostaje para cada factor de emisión de los GEI considerados en el presente estudio. Para el compostaje Takakura los ingredientes fueron cascarilla de arroz, hojarasca y residuos sólidos orgánicos. Estos ingredientes fueron pesados antes y después de la elaboración del compostaje. Para el compostaje mediante la lombricultura se obtuvo el valor de peso inicial de los residuos, y luego el peso final del compostaje elaborado. Por último, se sumaron los resultados obtenidos para cada factor de emisión de los GEI, y se obtuvo el valor de emisión para cada compostaje.

#### 4.4.1.2. Determinación de Dióxido de Carbono Equivalente Total

En el cálculo del dióxido de carbono equivalente total en un periodo de 100 años (DCET) se determinó por medio de la Ec. 2. Se tomó en cuenta los gases incluidos en el estudio, además de los factores de emisión (Ver Tabla 3). El factor de emisión se multiplicó por el Potencial de Calentamiento Global (PCG) para obtener resultados de emisión que consideran un periodo medio de 100 años (Zúñiga, 2013). La Ec. 2 se muestra a continuación:

$$\text{DCET} = \text{CO}_2 * \text{FE} + (\text{CH}_4 * \text{FE} * \text{PCG}) + (\text{N}_2\text{O} * \text{FE} * \text{PCG}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

**DCET:** Dióxido de Carbono equivalente total en un periodo de 100 años [ $\text{kg CO}_2\text{-}^e$ ].

**FE:** Factor de Emisión específico para el GEI [ $\text{kg CO}_2\text{-}^e$ ].

**PCG:** Potencial de Calentamiento Global, o GWP por sus siglas en inglés, específico para el GEI [ $\text{CO}_2\text{-}^e$ ] (Ver Tabla 3).

Para la aplicación de la (Ec. 2) el valor obtenido representa el PCG que poseen los gases considerados dentro de los procesos de compostaje en un periodo medio de 100 años. Se utilizó el valor de los pesos finales para cada uno de los compuestos obtenidos de la Ec. 1 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) correspondientes a cada tipo de compostaje. Este valor se lo multiplicó por el Potencial de Calentamiento Global de cada uno de los compuestos y el resultado fue sumado para obtener la estimación de emisiones en un periodo medio de 100 años.

#### **4.4.1.3. Determinación de las Emisiones Totales Anuales**

Dentro del tratamiento biológico de los desechos orgánicos las emisiones de  $\text{CO}_2$  se consideran neutras, debido a que estas emisiones son de origen biológico, por lo que no están contabilizadas dentro del total de emisiones de GEI, pero están declaradas como elemento informativo. Por lo cual, se calculan las emisiones del compostaje como elemento informativo, y éstas no influyen en el resultado de la Huella de Carbono.

La evolución total de desechos se obtuvo de los registros otorgados por el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos del año 2014 al 2018 (Anexo 5); y de manera más específica el volumen de residuos del tipo orgánico que pueden ser utilizados para la elaboración del compostaje Takakura y lombricultura.

Se realizó una caracterización de los residuos sólidos orgánicos que ingresan en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos, separándolos en al menos dos categorías: restos de comida (todos los residuos de origen doméstico, etc.) y restos de plantas y jardinerías (procedentes de podas municipales, de las ferias libres, etc.). Las proporciones para la caracterización se realizaron conforme al volumen declarado por el Centro durante el 2014.

Según Zúñiga (2013), en el cálculo de los residuos sólidos se utilizan los factores de emisión correspondientes a los desechos debido al manejo que se les da a las pilas de compostaje, usando la Ec. 3 tenemos:

$$E = BT * FE \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

**E:** Emisiones totales anuales [kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>].

**BT:** Residuos sólidos orgánicos tratados el año 2014 al 2018 [t].

**FE:** Factor de emisión específico al tipo de residuo tratado [kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>\*t<sup>-1</sup>] (Ver Tabla 4).

Para la determinación de las emisiones anuales de dióxido de carbono equivalente entre los años 2014 al 2018, se utilizó la información proporcionada por el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos sobre los ingresos anuales de los residuos y se multiplicó por el factor de emisión correspondiente a restos de plantas y jardinerías que se encuentra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Factores de Emisión utilizados en el tratamiento biológico

Consumos	Factor de emisión de CO <sub>2</sub> <sup>-e</sup>	Unidad
Restos de comida	30	kgCO <sub>2</sub> <sup>-e</sup> ton <sup>-1</sup>
Restos de plantas y jardinería	57	kgCO <sub>2</sub> <sup>-e</sup> ton <sup>-1</sup>

Fuente: (Zúñiga, 2013)

#### 4.4.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

La estimación de la eficiencia se estableció en la captura del dióxido de carbono, la cual tiene algunos requisitos energéticos como el incremento de consumo de combustible fósil (Gómez y Watterson, 2006). El proceso de captura tiene una eficacia inferior al 100%, por lo que aún se emite una parte de dióxido de carbono del caudal del gas. La eficacia de la captura del dióxido de carbono de cualquier sistema se calcula mediante la siguiente ecuación (Ver Ec. 4).

$$\text{Eficiencia}_{\text{Tecnología de captura de CO}_2} = \frac{C_{\text{capturado CO}_2}}{C_{\text{Combustible}} - C_{\text{productos}}} * 100 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

**Eficiencia Tecnología de captura del CO<sub>2</sub>:** eficiencia del sistema de captura de CO<sub>2</sub> en porcentaje.

**C Capturado CO<sub>2</sub>:** Cantidad de carbono del caudal de CO<sub>2</sub> capturado (kg).

**C combustible:** Cantidad de carbono de la biomasa del sistema (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>).

**C productos:** Cantidad de carbono en los productos químicos carbonáceos o de combustible de la planta (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>).

Para la estimación de la eficiencia en los procesos de compostaje, se tomaron en consideración los valores obtenidos de la Ec. 1 (Emisiones Totales). Primero, para el término C<sub>Capturado CO<sub>2</sub></sub> de la Ec. 4 se toma el valor inicial del peso de los residuos sólidos orgánicos usados para el compostaje mediante la lombricultura, así como el valor total del peso de los ingredientes para elaborar el compostaje Takakura (cascarilla de arroz, hojarasca y residuos

sólidos orgánicos). Además, para el término  $C_{\text{combustible}}$  se usa el valor obtenido de la aplicación de la primera fórmula con el peso final de ambos procesos de compostaje. Finalmente, para el término  $C_{\text{productos}}$  se lo considera como cero, debido a que no se añadió algún tipo de producto químico que contenga carbono.

#### **4.4.3. Análisis de la calidad del compostaje Takakura y lombricultura realizado en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.**

Para los análisis de la calidad de compostaje se utilizó los servicios de la *Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (AgroCalidad)* que se encuentra en la ciudad de Loja. Se recolectaron muestras de aproximadamente 1kg según lo establecido por AgroCalidad, para la realización de los análisis de calidad de fertilizantes y análisis fitopatológicos. Se utilizó una muestra por cada análisis, razón por la cual se tomaron dos muestras del compostaje Takakura y dos muestras del compostaje mediante la lombricultura.

Finalmente se usó los resultados obtenidos de los primeros objetivos del presente estudio, la cantidad de dióxido de carbono y la eficiencia de los procesos de compostaje. Estos resultados permitieron identificar cuál de los dos es recomendable usar, teniendo en cuenta sus emisiones, su valor nutritivo (calidad) y la eficiencia en la captura de carbono de los mismos. Cabe mencionar que estos resultados servirán para una mejor gestión de los residuos sólidos urbanos, así como su aprovechamiento y, de ser posible, su reutilización de manera eficiente.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Determinación de la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura.

En la determinación de la cantidad de dióxido de carbono equivalente en los procesos de compostaje, de acuerdo a cada ecuación empleada y los gases considerados dentro del presente estudio (Anexo 3), se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 5:

**Tabla 5.** Emisiones parciales de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para los dos tipos de compostaje

Compostaje	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Peso inicial (kg CO <sub>2</sub> <sup>e</sup> )			Peso final (kg CO <sub>2</sub> <sup>e</sup> )		
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
<b>Lombricultura</b>	67,2	16,8	0	1 747,2	4 368	0	436,8	1 092
<b>Takakura</b>	67,2	31,6	0	1 747,2	4 368	0	821,6	2 054

**Fuente:** Elaboración propia

En la variación de las emisiones parciales de CO<sub>2</sub><sup>e</sup>, se puede observar que el compostaje Takakura presenta una mayor emisión en los componentes de N<sub>2</sub>O con 2 054 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> y CH<sub>4</sub> con 821,6 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>, a diferencia del compostaje mediante la lombricultura que presentó una emisión menor de 1 092 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para N<sub>2</sub>O y 436,8 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para CH<sub>4</sub>.

Por otra parte, el resultado obtenido para cada compuesto de los GEI, se sumó para calcular el valor total de las emisiones de dióxido de carbono equivalente, donde se determinó que el compostaje Takakura presentó un valor de 2 875,6 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> por lo cual tiene una mayor emisión, en comparación al compostaje mediante la lombricultura el cual obtuvo una cantidad de 1 528,8 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> (ver Tabla 6).



**Tabla 6.** Emisiones totales de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para los dos tipos de compostaje

<b>Compostaje</b>	<b>Cálculo inicial (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>)</b>	<b>Cálculo final (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>)</b>
<b>Lombricultura</b>	6 115,2	1 528,8
<b>Takakura</b>	6 115,2	2 875,6

**Fuente:** Elaboración propia

Al aplicar la Ec. 2 los resultados de los valores de emisión obtenidos para cada uno de los compostajes considerando un periodo medio de 100 años (Anexo 4), se detallan a continuación:

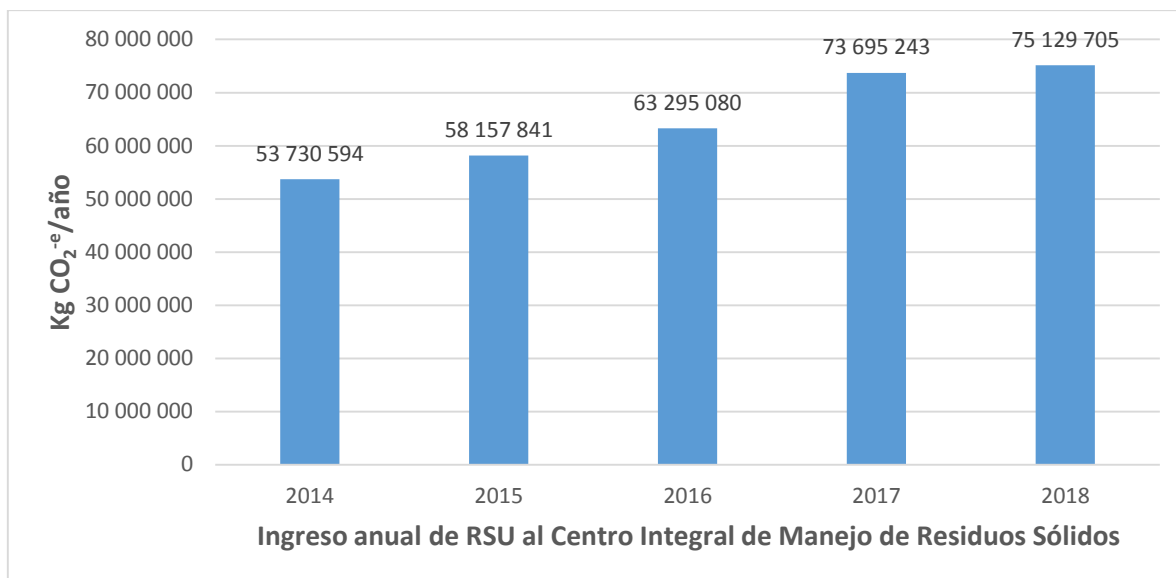
**Tabla 7.** Emisiones de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> para ambos compostajes en un periodo medio de 100 años.

<b>Compostaje</b>	<b>Peso final (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>)</b>			<b>DCET parcial (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>)</b>			<b>DCET Total (kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>)</b>
	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	
<b>Lombricultura</b>	0	436,8	1 092	0	9 172,8	338 520	347 692,8
<b>Takakura</b>	0	821,6	2 054	0	17 253,6	636 740	653 993,6

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los valores obtenidos de emisiones para ambos tipos de compostaje en un periodo medio de 100 años. Para el compostaje Takakura el valor total de emisión es mayor con 653 993,6 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>, mientras que en lombricultura se obtuvo un valor menor de 347 692,8 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup>.

Los resultados de la Emisión Total anual (Ec. 3) con respecto a la emisión de CO<sub>2</sub><sup>e</sup>, según el ingreso anual de residuos sólidos orgánicos al Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos, se observa en la Figura 2:



**Figura 2.** Emisión de dióxido de carbono equivalente, según el peso de los residuos orgánicos ingresados del año 2014 al año 2018 en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos.

En la Figura 2 se observa la cantidad de emisión total anual de dióxido de carbono equivalente desde el año 2014 al 2018 (Anexo 5), donde se puede apreciar que para el año 2014 la emisión fue de 53 730 594 kg CO<sub>2</sub>-e, con una elevación de las emisiones para el año 2016 (63 295 080 kg CO<sub>2</sub>-e) y una distribución homogénea entre el año 2017 (73 695 243 kg CO<sub>2</sub>-e) y el año 2018 (75 129 705 kg CO<sub>2</sub>-e), esto se debe al aumento de la población y como consecuencia, el incremento del volumen de los residuos sólidos orgánicos.

## 5.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura.

Para la estimación de la eficiencia de captura de carbono aplicando la fórmula a cada proceso de compostaje se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para el compostaje mediante la lombricultura:

$$\text{Eficiencia}_{\text{Tecnología de captura de CO}_2} = \frac{67,2 \text{ Kg}}{1\,528,8 \text{ kg CO}_2^{-e}} * 100$$

$$\text{Eficiencia} = 4,40 \%$$

- Para el compostaje Takakura:

$$\text{Eficiencia}_{\text{Tecnología de captura de CO}_2} = \frac{67,2 \text{ Kg}}{2\ 875,6 \text{ kg CO}_2^{-e}} * 100$$

$$\text{Eficiencia} = 2,34 \%$$

En el compostaje mediante la lombricultura mostró una mayor eficiencia de 4,40%, mientras que para el compostaje Takakura se calculó un valor de 2,34%.

### 5.3. Análisis de la calidad y comparación de los compostajes Takakura y lombricultura.

Los resultados con respecto al valor nutricional y al análisis fitopatológico de los compostajes según la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (*AgroCalidad*) son los siguientes:

**Tabla 8.** Análisis de calidad de los compostajes Takakura y lombricultura.

Parámetros	Unidad	Lombricultura	Takakura
<b>M.O.</b>	%	18,90	37,38
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	%	0,94	0,87
<b>NT</b>	%	1,18	1,39
<b>K<sub>2</sub>O</b>	%	0,58	0,64
<b>pH</b>	1:100	7,45	8,55

El compostaje Takakura muestra una mejor calidad de acuerdo a los resultados de cada parámetro analizado a diferencia del compostaje mediante la lombricultura, el cual presenta un pH neutro de 7,45 y un porcentaje de M.O. de 18,9%, mientras que el compostaje Takakura tiene un pH ligeramente alcalino con 8,55 y 37,38% de M.O. (Ver Tabla 8).

En cuanto al análisis fitopatológico de ambos compostajes se encontraron los siguientes resultados (Ver Tabla 9).

**Tabla 9.** Análisis Fitopatológico de los compostajes Takakura y lombricultura.

	<b>Lombricultura</b>	<b>Takakura</b>
<b>Identificación microbiológica</b>	Coliformes Totales <i>Escherichia coli</i>	<i>Erwinia sp.</i>
<b>Identificación micológica</b>	<i>Rhizopus sp.</i>	<i>Penicillium sp.</i> <i>Rhizopus sp.</i> <i>Curvularia sp.</i> <i>Fusarium sp.</i>

En la identificación microbiológica se detectó la presencia de coliformes totales y *Escherichia coli* en el proceso de lombricultura y para el Takakura *Erwinia sp.* Por otro lado, en la identificación micológica se obtuvo que el compostaje mediante la lombricultura cuenta con *Rhizopus sp.*, mientras que el Takakura mostro la mayor cantidad de especies fúngicas (Ver Tabla 9).

## 6. DISCUSIÓN

### 6.1. Determinación de la cantidad de dióxido de carbono presente en la elaboración y distribución en los procesos de compostaje Takakura y lombricultura.

En la presente investigación, para el compostaje mediante la lombricultura se registró un valor de emisión de 1 528,8 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>, mientras que para el proceso de Takakura se reportó una emisión de 2 875,6 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>, estos resultados no tomaron a consideración los límites de la organización que se muestran como los distintos niveles de jerarquización, incluyendo a toda el área de compostaje dentro del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos; y los límites operativos, que se definen como el alcance e impacto que éste tiene, llegando inclusive a la influencia que tiene para con los hogares de la ciudad de Loja. Al comparar los resultados de esta investigación, con el estudio de Osuna y Spendeler (2013), las emisiones en una planta de compostaje en Zaragoza-España fue de 107,45 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> (del total de RSU que ingresan solo el 18% se consideran para la elaboración del compost), no obstante en este estudio fueron considerados los límites operacionales de la planta, así mismo los niveles de emisión biogénicos no son altos debido a la clasificación de los RSU orgánicos y el tipo de tratamiento realizado usando microorganismos eficientes (EM).

En un estudio similar (Pérez, 2013) se determinó un valor de emisión de 74,32 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> (lo que representa el 6% de los RSU que se utilizaron para la elaboración del compost), estos valores son menores que aquellos obtenidos en la presente investigación (emisiones de CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> de ambos compostajes). Por otra parte, en el estudio de Zúñiga (2013) se obtuvo 212 100,7 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> de emisión (lo que corresponde al 90,9% de los RSU destinados en la elaboración del compost) en la planta de compostaje del relleno sanitario de La Pintana-Chile es mayor al obtenido en la presente investigación esto se debe a la cantidad de RSU orgánicos utilizados para la elaboración del compostaje y el aprovechamiento óptimo de la mayor parte de los

residuos que ingresan al relleno La Pintana; por el contrario, en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja, se aprovechan los residuos provenientes de los mercados (del 20 al 30% de los RSU totales que ingresan al Centro Integral) y no los de origen doméstico (éstos son destinados al área de Disposición Final) de la ciudad de Loja (Hernández et al., 2017). Estas variaciones en la cantidad de  $\text{CO}_2^{-\text{e}}$  pueden darse debido que las prácticas o el manejo de los residuos sólidos urbanos, específicamente orgánicos son diferentes entre las ciudades, zonas metropolitanas, áreas urbanas pequeñas y rurales.

Es necesario recalcar que no es posible realizar un cálculo de la huella de carbono para los procesos de compostaje, debido a que las emisiones del mismo están consideradas dentro de los procesos derivados de la biomasa (Osuna y Spendeler, 2013), a pesar de esto, se realizó una estimación y/o aproximación de las emisiones de GEI, tomando a consideración el metano y el óxido nitroso, gases considerados dentro del cálculo de la huella de carbono y cuyos valores son expresados en unidades de kilogramos de dióxido de carbono equivalente ( $\text{kg CO}_2^{-\text{e}}$ ), pero solo como un elemento informativo, es decir estos valores no pueden ser considerados dentro de un inventario de GEI (Zúñiga, 2013). De esta manera, se puede conocer el impacto que produce un tratamiento biológico que busca la reducción del volumen de residuos sólidos en la ciudad de Loja.

Por otro lado, los resultados alcanzados en la investigación con respecto a la emisión anual del  $\text{CO}_2^{-\text{e}}$  muestran variaciones significativas en los cinco años evaluados (2014 - 2018), calculados a partir de la información obtenida del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos, registrando para el año 2014 la más baja emisión de 53 730 594  $\text{kg CO}_2^{-\text{e}}$  (debido a que este valor es el inicio de la serie, Ver Figura 2), a diferencia de los otros años que presentan una tendencia de incremento de emisiones, como lo ocurrido en el 2018 donde se obtuvo una cantidad de 75 129 705  $\text{kg CO}_2^{-\text{e}}$ , debido al incremento poblacional de la ciudad de Loja y como

consecuencia el aumento de los residuos orgánicos. Al comparar estos resultados con el estudio realizado en La Pintana-Chile donde determinaron una emisión anual (2010) de 1 426 441,8 kg CO<sub>2</sub><sup>e</sup> (Zúñiga, 2013), donde se muestra que existe una baja emisión de este componente. Este hecho se asocia a que las variaciones de CO<sub>2</sub><sup>e</sup> pueden deberse a que existe una relación directa entre la generación de residuos, con la cantidad de habitantes, tamaño y expansión de las ciudades.

## **6.2. Estimación de la eficiencia de los procesos de compostaje Takakura y lombricultura.**

En cuanto a la eficiencia de captura de carbono, Sanz (2013) menciona que se requieren complejos procesos tecnológicos, físicos y químicos para que ésta sea la más óptima; siendo los procesos más usados la precombustión, oxcombustión y postcombustión (Saldívar, Cabrera, y Reta, 2017), estos procesos son extraordinariamente costosos y difíciles de adquirir (Sanz, 2013). Al comparar con los resultados obtenidos en la presente investigación, en los procesos de compostaje se obtuvo el 4,40% de eficiencia para el compostaje mediante la lombricultura; mientras que para el Takakura se calculó un 2,34% de eficiencia. Según los datos obtenidos, se puede inferir que los procesos de compostaje no tienen una mayor eficiencia en la tecnología de captura de carbono, esto se debe a que no se realizó ningún proceso para mejorar la eficiencia de captura de carbono, por lo cual los compostajes como un sistema no lograron retener al carbono, mismo que es emitido directamente a la atmósfera en forma de gas.

Es necesario mencionar que las tecnologías de captura de carbono buscan reducir y limitar las emisiones atmosféricas que son producidas por las actividades antropogénicas, en su gran mayoría, aplicadas a las emisiones producidas en plantas industriales o centrales eléctricas (Aguinaco, 2008). Pero la biomasa posee una tendencia natural a la captura del carbono, al referirnos a la biomasa también se engloba a aquellos organismos como los hongos y/o

microorganismos que actúan directamente en la producción de ambos procesos de compostajes, y éstos son los encargados de capturar el carbono para su posterior uso en los procesos metabólicos, pero su eficiencia es casi nula debido a que todo el carbono capturado debe ser devuelto a la atmósfera en forma de emisiones y de esta manera cumplir con el ciclo biogeoquímico del carbono (Ramírez, Mendizábal, y Alba, 2012; Masera y Ordóñez, 2016).

Según el estudio de Metz, Davidson, Coninck, Loos, y Meyer (2005) la tecnología de captura de carbono se puede aplicar de forma generalizada a los fertilizantes orgánicos pero aún se requiere una focalización en el área de los compostajes, su capacidad de captura y la técnica correcta para ser usada en estos casos; por lo cual para el compostaje se presenta un bajo porcentaje en la captura de carbono llegando a niveles menores a 10%, a diferencia de los procesos energéticos donde su eficiencia varía entre 55 a 60%. Esto coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación, con respecto a los procesos de compostaje y su eficiencia, los mismos que fueron calculados considerando a los procesos como un sistema individual, sin incluir a la planta de lombricultura en su totalidad, o en mayor medida, al Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos. En este contexto, se demuestra que la captura de carbono se puede aplicar para los procesos de compostaje, tanto de lombricultura como el Takakura, ya que proveen datos aproximados que pueden ser usados como elemento informativo pero que no pueden ser incluidos dentro de un inventario de gases de efecto invernadero.

### **6.3. Análisis de la calidad del compostaje Takakura y lombricultura.**

En lo referente al análisis de calidad de los compostajes, Hernández et al. (2017) menciona que el valor nutricional se determina considerando los siguientes parámetros: materia orgánica (M.O.), óxido de fósforo ( $P_2O_5$ ), nitrógeno total (NT), óxido de potasio ( $K_2O$ ), y potencial hidrógeno (pH). Comparando con los resultados obtenidos en esta investigación



donde se analizaron los mismos parámetros tenemos que para el compostaje mediante la lombricultura se obtuvo: un valor de M.O. de 18,9%,  $P_2O_5$  0,94%, NT 1,18%,  $K_2O$  0,58%, y pH 7,45. Sin embargo, los datos de la presente investigación no coinciden con los resultados del estudio de Mejía y Ramos (2019) realizado en la Mancomunidad de aseo de los cantones Colta, Alausí y Guamote de la provincia de Chimborazo, donde se determinaron los siguientes resultados M.O. 25,32%, pH 8,01 (Ver Tabla 2), los cuales varían significativamente en todos sus parámetros, esto se da por el tipo de residuo (residuos provenientes de mercados y ferias libres), así como las diferencias en el manejo de los compostajes (como la frecuencia de aireación, la cantidad de agua utilizada, la reproducción de la lombriz) y los microorganismos presentes en los compostajes. Las variaciones observadas en la M.O. son consecuencia del manejo de los residuos en la fase inicial, es decir en la fase termófila. El  $P_2O_5$  que se encuentra en cantidades mínimas se debe a que promueve la descomposición de la M.O. y se encuentra condicionado por los niveles de pH; para el NT se observaron niveles mayores a los de los macronutrientes ( $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ), debido a la poca presencia de los microorganismos eficientes (EM) en este tipo de fertilizante, además que la mayor parte del nitrógeno es parte de la M.O.; para el  $K_2O$  los valores son menores por la relación directa con los EM, este macronutriente promueve el crecimiento de los EM (Microorganismos Eficientes se refiere a un cultivo mixto de microorganismos benéficos naturales, presentes en ecosistemas naturales, fisiológicamente compatibles unos con otros); y por último el pH está influenciado por los materiales del compostaje, debido a lo cual se presentan variaciones en el mismo, pero se mantiene en un rango neutro y mejora las características físico-químicas del suelo (Mejía y Ramos, 2019; Sosoranga, 2018)

Para el proceso de compostaje Takakura, según el estudio de Hernández et al. (2017) determinó para M.O. 37,3%, pH 9,1, (Ver Tabla 1). En comparación con la investigación realizada, se reportó: para M.O. 37,38%;  $P_2O_5$  fue de 0,87%; para el NT 1,39%;  $K_2O$  0,64%; y

por último el pH fue de 8,55. Para los resultados anteriores no existe una mayor diferencia a primera apreciación numérica, a excepción del NT el cual varía posiblemente por la presencia de los EM que se encuentran en el queso, el yogurt o los microorganismos de la hojarasca usado para elaborar el compostaje, así como la cantidad de M.O. degradada; además el  $K_2O$  es mayor en la presente investigación debido a la relación con los EM y por consiguiente a los niveles de NT. Por último, el pH se encuentra en un rango ligeramente alcalino en ambos estudios, el cual puede estar influenciado por los ingredientes usados para elaborar este compostaje. Con ello se demuestra que el compostaje Takakura tiene mejor calidad, debido a que los resultados de los parámetros evaluados son mayores en relación a los del compostaje mediante la lombricultura, razón por la cual la planta aprovecharía de mejor manera los elementos presentes en el compostaje con mejor calidad.

En lo referente al análisis fitopatológico para los procesos de compostaje Takakura y lombricultura se encontraron diferentes especies bacterianas y micológicas. En este sentido, para el compostaje mediante la lombricultura, en el análisis microbiológico se identificaron Coliformes totales y *Escherichia coli*, esto difiere con lo reportado por Quinatoa (2012) en la Asociación Santa Catalina del cantón Píllaro donde determinaron la presencia de *Pseudomonas sp.*, *Xantomonas sp.*, *Erwinia sp.* y *Bacillus mycoides* puesto que el tipo de residuos y los diferentes tratamientos (Compost Treet, Microorganismos Eficientes Autóctonos y suelo de páramo) aplicados influyen en la cantidad y formación de las colonias bacterianas. Por otro lado, para el compostaje Takakura se encontró la presencia de *Erwinia sp.*, estos resultados difieren del estudio de Maisincho (2015) que registró la ausencia de esta especie mientras que se evidenció la presencia de coliformes fecales, no obstante esta diferencia es debido a la “alimentación” que se le daba al compostaje, es decir a los diferentes tipos de residuos usados.

Finalmente, en la identificación micológica (hongos) del compostaje mediante la lombricultura, al cual no se le agregó algún componente para mejorarlo, se determinó la presencia de *Rhizopus sp.*, mientras que en el estudio realizado por Quinatoa (2012) se encontró *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, y *Fusarium sp.*, esto es debido a la adición de inóculos al compostaje realizado. Mientras que para el compostaje Takakura se identificaron *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Curvularia sp.* y *Fusarium sp.* La diferencia en la presencia de estos hongos puede ser producto de la descomposición de los residuos orgánicos por cada proceso de compostaje, el tipo de residuo y los ingredientes usados para el Takakura.

## 7. CONCLUSIONES

- El compostaje Takakura presentó una mayor emisión de aproximadamente 2 875,6 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup> (Dióxido de Carbono Equivalente), a diferencia del compostaje mediante la lombricultura el cual obtuvo una emisión menor de 1 528,8 kg CO<sub>2</sub><sup>-e</sup>, las emisiones están directamente relacionadas con la reducción de la masa de RSU orgánicos que son usados para elaborar los compostajes.
- La eficiencia del compost Takakura es del 2,34%, y para el compost mediante la lombricultura es del 4,40%. Esto se debe a la capacidad natural de los microorganismos para capturar carbono, pero éste es emitido en lo posterior debido a los procesos metabólicos de los microorganismos.
- En lo referente al análisis de calidad de los compostajes tanto Takakura como lombricultura, el compostaje con mejor calidad es el Takakura, debido a su mayor porcentaje de M.O. (37,38%) a diferencia del compostaje mediante la lombricultura (18,9%).
- En la identificación microbiológica de los compostajes se reconoció la presencia de *Escherichia coli* y Coliformes totales en el compostaje mediante la lombricultura, por otro lado, para el Takakura se encontró *Erwinia sp.*
- La presencia de *Escherichia coli* puede ser nociva para la salud de las personas que manipulan el compostaje mediante la lombricultura, mientras que *Erwinia sp.* son un género de bacterias patógenas para árboles frutales y tubérculos como la zanahoria.
- En la identificación micológica para el compostaje mediante la lombricultura se reconoció la presencia de *Rhizopus sp.*, así mismo para el compostaje Takakura se identificó *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Curvularia sp.* y *Fusarium sp.*

- La presencia de ciertos tipos hongos se debe a los procesos de descomposición así como el tipo de residuo usado, y los ingredientes utilizados para la elaboración del compostaje como el yogurt y la hojarasca obtenida de las áreas verdes.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Para estudios similares se recomienda realizar el “Análisis de Ciclo de Vida” de los residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de Loja, con el fin de conocer la tendencia de las emisiones de los gases de efecto invernadero producidas en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos.
- Realizar estudios sobre los mecanismos y tecnologías de captura de carbono, que estén enfocados en el uso de la biomasa, específicamente en los procesos de compostaje, que permitan realizar estimaciones más precisas respecto a la eficiencia de los mismos.
- Utilizar agentes fermentantes en la preparación de las soluciones para la elaboración del compostaje Takakura, con la finalidad de mantener altas temperaturas, lo cual favorece la proliferación de los microorganismos y con ello obtener una mayor degradación del abono.
- El compostaje Takakura tiene un mayor porcentaje de M.O. y éste se puede utilizar para mejorar el contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas, áreas verdes y jardines.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N. (2004). El Reciclado de papel y cartón. *Elementos: ciencia y cultura*, 11(053), 54-56. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/294/29405308.pdf>
- Aguilar, Q., Vega, C., Taboada, P., y Aguilar, X. (2010). Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario. *Revista de Ingeniería*, 32, 16-27. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n32/n32a3.pdf>
- Aguinaco, V. (2008). *Captura y almacenamiento de dióxido de carbono* (Academia de Ingeniería Mecánica). Recuperado de [http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/6/Captura\\_y\\_Almacenamiento\\_de\\_Dioxido\\_de\\_Carbono.pdf](http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/6/Captura_y_Almacenamiento_de_Dioxido_de_Carbono.pdf)
- Alcaldía de Loja. *Ordenanza que regula la Implementación de prácticas amigables para reducir el Índice de la Huella Ecológica en el cantón Loja*. (2017).
- Andrade, A., Defáz, S., y Portilla, J. (2014). *Reporte de la Huella Ecológica del Ecuador 2008 - 2011*. Quito-Ecuador.
- Area, M. (2018). El reciclado en la fabricación de papel y cartón. *La Revista del Corrugado*, (June 2017), 1-5. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/322916778>
- Asociación de Empresas Gestoras de Residuos y Recursos Especiales [ASEGRE]. (2010). *Protocolo para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos*. Madrid-España.
- Bonilla, M., y Núñez, D. (2012). *Plan de manejo ambiental de residuos sólidos de la ciudad de Logroño*. (Escuela Politécnica del Ejército). Recuperado de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6341/1/T-ESPE-031981.pdf>

- Cáceres, L., y Cáceres, N. (2011). *Inventario de Emisiones de Gases del Efecto de Invernadero en el Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado de [http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio\\_climatico/inventa\\_final\\_gei\\_dmq\\_2007.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio_climatico/inventa_final_gei_dmq_2007.pdf)
- Castillo, C., y Villalobos, C. (2015). *Huella ecológica y Gestión de residuos sólidos de la Universidad Autónoma de Occidente*. Recuperado de <https://campussostenible.org/wp-content/uploads/2017/04/anexo-11-huella-ecologica-2015.pdf>
- Cayambe, J., Iglesias, A., García, S., Chuquillanqui, C., y Riga, P. (2015). Evaluación económica de las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de patata. *ITEA Informacion Técnica Economica Agraria*, 111(2), 154-173. <https://doi.org/10.12706/itea.2015.011>
- Cervetto, A., y Molina, N. (2017). *Diagnóstico del Manejo del Residuos Sólidos en el Paque Histórico Guayaquil*. 26(2), 84-105. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.08>
- Código del Orgánico del Ambiente. *Código del Orgánico del Ambiente*. Registro Oficial Suplemento 983 de 12-abr-2017 (2017).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2013). *Metodología de cálculo de la huella de carbono y sus potenciales implicaciones para America Latina*. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37288/1/Methodologías\\_calculo\\_HC\\_AL.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37288/1/Methodologías_calculo_HC_AL.pdf)
- Elorsa, M. (2012). *Compostaje y Lombricultura. La Vision Ecológica de la basura*. Recuperado de [http://www.munistgo.info/medioambiente/wp-content/uploads/2016/10/Compostaje\\_y\\_Lombricultura.pdf](http://www.munistgo.info/medioambiente/wp-content/uploads/2016/10/Compostaje_y_Lombricultura.pdf)
- Espíndola, C., y Valderrama, J. O. (2011). *Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos*



de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, 23(1), 163-176.

<https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>

GEO-Loja. (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Loja*. Recuperado de [http://www.naturalezaycultura.org/docs/Geo Loja.pdf](http://www.naturalezaycultura.org/docs/Geo%20Loja.pdf)

Gómez, D., y Watterson, J. (2006). Combustión estacionaria. En *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1157/13083441>

Guamán, M., y Chamba, J. (2016). Estudio del impacto social, generado por el relleno sanitario de la ciudad de Loja y propuesta de remediación social en los barrios, Colinas Lojanas, Punzara, Carpinteros, Juan José Castillo y Manuel Gómez Álvarez. Universidad Nacional de Loja.

Hernández, R., Torres, R., y Ramírez, Y. (2017). Implementación del método de compostaje Takakura para el reciclaje de desechos en la ciudad de Loja, Ecuador. *Centro de Biotecnología*, 4(1), 1-7. Recuperado de <http://revistas.unl.edu.ec/index.php/biotecnologia/article/view/95>

Honobe, Y. (2013). *El Método Takakura, Herramienta para reducir residuos orgánicos y mejorar la calidad del suelo*. Recuperado de <http://www.fonag.org.ec/web/imagenes/paginas/fondoeditorial/17.pdf>

Hoorweg, D., y Bhada, P. (2012). A Global Review of Solid Waste Management. A Global Review of Solid Waste Management. *World Bank Urban Development Series Knowledge Papers*, 15(Marzo), 1-116. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/306201760>

- Institute for Global Environmental Strategies [IGES]. (2010). *Compostaje para la reducción de residuos*. Kitakyushu-Japon.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2002). Cambio Climático Y Biodiversidad. En *Documento Técnico V IPCC* (Vol. 284). <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2008.01186.x>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2013). *Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Francia.
- Izar, J., y Izar, J. (2014). Lombricultura , Una opción sustentable de producción de alimentos para el campo mexicano. *27 junio*, (Diciembre), 1-31. Recuperado de [www.researchgate.net/publication/263426152%0D](http://www.researchgate.net/publication/263426152%0D)
- Ludeña, C., y Wilk, D. (2012). Ecuador Mitigacion y Adaptación al Cambio Climaticio. En *Marco de la preparación de la Estrategia 2012-2017 del BID en Ecuador*. Recuperado de <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6027/Ecuador - IDB-TN-619.pdf?sequence=1>
- Maisincho, J. (2015). *Evaluación fisicoquímica e identificación microbiológica de Salmonella sp., Shigella sp., y Escherichia coli, de tres abonos orgánicos (lombricultura, Takakura y bioabono), producido por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de la provincia de Loja* (Universidad de las Fuerzas Armadas). Recuperado de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11582/1/T-ESPE-049542.pdf>
- Manaf, L., Samah, M., y Zukki, N. (2009). Municipal solid waste management in Malaysia: Practices and challenges. *Waste Management*, 29(11), 2902-2906. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.015>

- Manahan, S. (2007). *Introducción a la Química Ambiental* (1ra Edición; C. Durán, Ed.). Recuperado de <http://blog.utp.edu.co/lilianabueno/files/2015/08/Introduccion-a-la-Quimica-Ambiental-S.-E.-Manahan2.pdf>
- Martínez, E., Fuentes, J., y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, M., Pantoja, A., y Román, P. (2013). Manual de compostaje del agricultor, Experiencias en América Latina. En *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/10.1111/evo.12990>
- Martínez, R. (2007). Algunos aspectos de la huella ecológica. *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, VIII(14), 11-25. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66615071002>
- Masera, O., y Ordóñez, J. (2016). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 1-11. <https://doi.org/10.21829/myb.2001.711314>
- Mejía, E., y Ramos, S. (2019). *Mancomunada de aseo de los cantones Colta, Alausi y Guamote, mediante tratamientos biológicos, compostaje, co- compostaje, vermicompostaje y Takakura*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., y Meyer, L. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. En *Director* (Vol. 17). <https://doi.org/10.3145/epi.2008.jul.13>
- Ministerio del Ambiente [MAE]. (2015). Diagnóstico de la Cadena de Gestión Integral de Desechos. Recuperado 7 de septiembre de 2019, de Ministerio del Ambiente Ecuador

Recuperado de: <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>

Morata, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. En *Publicaciones en Línea de la Agencia Estatal de Meteorología. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*. Recuperado de [http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/publicaciones/Guia\\_IPCC/Guia\\_IPCC.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/publicaciones/Guia_IPCC/Guia_IPCC.pdf)

Municipio de Loja. *Recopilación Codificada de la Legislación Municipal Loja 2015*. Loja-Ecuador (2015).

Ocampo, M., y Restrepo, J. (2016). *Cálculo de la huella ecológica en el campus de la Universidad Tecnológica de Pereira* (Universidad Tecnológica de Pereira). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11059/6819>

Osuna, D., y Spendeler, L. (2013). *El compostaje: receta para reducir la huella de carbono en España*. Recuperado de [https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2016/01/compostaje\\_reducir\\_huella\\_carbono\\_estatal.pdf](https://www.tierra.org/wp-content/uploads/2016/01/compostaje_reducir_huella_carbono_estatal.pdf)

Palanivel, T., y Sulaiman, H. (2014). Generation and Composition of Municipal Solid Waste (MSW) in Muscat, Sultanate of Oman. *APCBEE Procedia*, 10, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2014.10.024>

Pérez, A. (2013). *Comparativa de la huella de carbono de los distintos sistemas de gestión de residuos de la comunidad de Madrid y la experiencia de compostaje descentralizado*. Zaragoza-España.

Quinatoa, M. (2012). *Estandarización del proceso de producción de compost con fines comerciales utilizando tres fuentes de inóculo con la Asociación Santa Catalina del cantón*

*Píllaro*. Universidad Técnica de Ambato.

Ramírez, N., Mendizábal, L., y Alba, J. (2012). Potencial de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en el valle de Perote. Estudio de caso - *Pinus cembroides*. *Foresta Veracruzana*, 14(1), 17-22.

Ríos, R., Arango, F., Acevedo, R., y Vera, L. (2013). Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el sector transporte. En *Banco Interamericano del Desarrollo*. Recuperado de [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3613/Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las emisiones de gases efecto invernadero. En el sector transporte..pdf?sequence=4](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/3613/Estrategias_de_mitigación_y_métodos_para_la_estimación_de_las_emisiones_de_gases_efecto_invernadero._En_el_sector_transporte..pdf?sequence=4)

Rodríguez, A. (2008). Gestión Local e Intergubernamental de los Residuos Sólidos Urbanos. Una evaluación de las “buenas prácticas” en los municipios mexicanos. (Centro de Investigación El Colegio de la Frontera Norte). Recuperado de [http://docencia.colef.mx/system/files/Tesis MDR\\_Ana Lucía Rodríguez Lepure\\_0.pdf](http://docencia.colef.mx/system/files/Tesis_MDR_Ana_Lucía_Rodríguez_Lepure_0.pdf)

Saldívar, S., Cabrera, J., y Reta, J. (2017). Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 4(12), 22-34.

Salmerón, Y., Cabrera, R., Juárez, A., Sampedro, M., Rosas, J., & Rolón, J. (2017). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(1), 69-79.

Samaniego, J. (2014). *Manejo y Caracterización de residuos sólidos urbanos de la provincia de Chimborazo – Ecuador y su potencial en la agricultura* (Escuela Superior Politécnica de Orihuela). Recuperado de [http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2003/1/TFM Jara Samaniego%2C Janneth.pdf](http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2003/1/TFM_Jara_Samaniego%2C_Janneth.pdf)

- Sanz, Í. (2013). La captura y almacenamiento de carbono: una novedosa técnica de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero regulada por la Unión Europea. *Carbon capture and storage: a novel technique for reducing greenhouse gas emissions regulated by the European Union.*, (70), 165-186. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=102935039&lang=es&site=ehost-live>
- Sharholly, M., Ahmad, K., Mahmood, G., & Trivedi, R. (2008). Municipal solid waste management in Indian cities – A review. *ELSEIVER*, 28, 459-467. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.008>
- Solans, X., & Gadea, E. (2015). Gestión de residuos : clasificación y tratamiento. En *Notas Técnicas de Prevención*. Madrid-España.
- Somarriba, R., & Guzmán, F. (2002). Guía de Lombricultura. En *Lombricultura una alternativa de producción*. Perú.
- Sosoranga, P. (2018). *Elaboración y Evaluación de tres tipos de Bocashi con aplicación de microorganismos eficaces (EM) en diferentes UPAs de la comunidad de la Matara, cantón Saraguro*. Universidad Nacional de Loja.
- Vaca, J., & Sánchez, J. (2007). Manejo de Residuos Sólidos. En *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (Vol. 8). <https://doi.org/10.18359/rcin.1501>
- Vazquez, A., & Velasco, M. (2016). Reciclaje de plásticos. *ANIPAC*, 3(04), 1-17. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4440.1527>
- Zhu, D., Asnani, P. U., Zurbrügg, C., Anapolsky, S., & Mani, S. (2008). *Improving Municipal Solid Waste Management in India: A Sourcebook for Policy Makers*.

<https://doi.org/10.1596/978-0-8213-7361-3>

Zúñiga, D. (2013). *Estimación de la Huella De Carbono del proceso de compostaje y lombricultura de la Dirección De Gestión Ambiental De La Ilustre Municipalidad de la Pintana*. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/151414/Estimacion-de-la-huella-de-carbono-del-proceso-de-compostaje-y-lombricultura-de-la-Direccion-de-Gestion-Ambiental-de-la-Ilustre-Municipalidad-de-La-Pintana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## 10. ANEXOS

**ANEXO 1.** Proceso de elaboración del compostaje mediante la lombricultura que se realiza en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

- Los residuos orgánicos ingresan a la Planta de lombricultura, en la zona de descarga los trabajadores depositan manualmente el material en una banda inclinada, que transporta los residuos hasta la criba tambor que posee en su interior algunas cuchillas que permiten esparcir los residuos orgánicos.
- En lo posterior, pasan por una banda transportadora horizontal donde los trabajadores retiran manualmente los residuos inorgánicos que se encuentren mezclados con los residuos orgánicos.
- Después de pasar por la banda horizontal son colocados en una carretilla y llevados a las camas de lombricultura, las camas tienen aproximadamente 20 metros de largo por uno de ancho y una profundidad entre 0,80 a 1,20 metros.
- Se llena las camas de lombricultura, además se procede a cubrirlas con una capa de hierba verde para impedir que vectores como la mosca común depositen sus huevos en la cama. Se mantienen en reposo por al menos un mes. Durante este mes la temperatura se eleva desde los 70 a 90 grados centígrados.
- Después se procede a darle movimiento a todo el material de la cama, a regarlo y a cubrirlo nuevamente con la hierba. Este proceso se repite cada mes hasta que el volumen de los residuos se haya reducido y la temperatura disminuya a un rango aproximado de 15 a 25 grados centígrados.
- Esta temperatura (15 - 25°C) es óptima para que la lombriz roja californiana se pueda incluir en la cama de lombricultura, las lombrices se mantienen aquí en un periodo de



tres a cuatro meses consumiendo los residuos orgánicos y producto de su digestión se produce el compost elaborado mediante la lombricultura.

- Cuando los residuos han sido completamente consumidos por las lombrices, adquieren un color y un olor muy similar a la tierra negra mojada. Este producto es transportado a la zona de secado donde se mantiene por una semana.
- Finalmente, el producto es tamizado o cernido, y ensaquillado; luego es transportado a la zona de bodega para su comercialización.

## ANEXO 2. Proceso de elaboración del compostaje Takakura en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos.

- Para realizar el método Takakura se elabora dos soluciones una salina y una azucarada. Estas soluciones fueron elaboradas usando canecas de 5 galones proporcionadas por el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos. La solución salina requiere residuos sólidos orgánicos (de preferencia cáscaras de frutas y verduras), agua para llenar completamente a la caneca y sal necesaria para que esta solución sea salobre. La solución azucarada requiere azúcar o melaza para que la solución sea lo más dulce posible, levadura seca 25 gramos, una botella de yogurt de un litro y agua hasta llenar la caneca.
- Las soluciones son mezcladas en sus respectivas canecas, este proceso debe repetirse cada dos días por una semana, además la solución azucarada no debe estar herméticamente sellada debido a que se corre el riesgo de explosión por acción de los organismos fermentativos (levadura).
- Pasada una semana se debe preparar la semilla del Takakura, ésta se elabora mezclando cascarilla de arroz, hojarasca (recoger aquella que se está descomponiendo no la seca), harina (es el alimento de los microorganismos por lo cual debe tener la misma cantidad que la cascarilla de arroz) y las soluciones salina u azucarada. Todos estos ingredientes son mezclados y acomodados a manera de una pila, de esta forma el calor producido por la semilla puede alcanzar el rango idóneo (60 – 80°C).
- Se debe comprobar si el nivel de humedad es adecuado, por lo cual se toma una cantidad de semilla con la mano y se aprieta de tal manera que si esta se mantiene compacta y no chorrea agua la semilla esta lista. Por el contrario, si necesita más humedad se puede agregar agua.

- Esta semilla, después de ser apilada, debe ser cubierta con una tela y dejarla reposar por una semana.
- Después de una semana de reposo se puede ir añadiendo residuos sólidos orgánicos y mezclarlos con la semilla para que sean transformados en compostaje. Se debe tener mucho cuidado en el nivel de humedad y la cantidad de oxígeno disponible por lo cual se debe voltear la semilla con los residuos cada dos días y comprobar su humedad diariamente.
- Se puede separar la semilla en dos partes iguales una de las cuales después de 2 semanas se convertirá en el producto final, es decir el compostaje Takakura, mientras que la otra parte se mantiene como semilla de Takakura siempre y cuando se le añada constantemente el alimento (en este caso los residuos sólidos orgánicos).

**ANEXO 3.** Aplicación de la Ec. 1 para los gases considerados en el estudio para el compostaje Takakura y lombricultura.

Para el compostaje mediante la lombricultura, de acuerdo a la (Ec.1) tenemos:

- Dióxido de carbono:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 0$	$E = 16,8 \text{ Kg} * 0$
$E = 0 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 0 \text{ kg CO}_2^{-e}$

- Metano:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 26$	$E = 16,8 \text{ Kg} * 26$
$E = 1\,747,2 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 436,8 \text{ kg CO}_2^{-e}$

- Óxido nitroso:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 65$	$E = 16,8 \text{ Kg} * 65$
$E = 4\,368 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 1\,092 \text{ kg CO}_2^{-e}$

Para el compostaje Takakura, siguiendo la misma metodología tenemos:

- Dióxido de carbono:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 0$	$E = 31,6 \text{ Kg} * 0$
$E = 0 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 0 \text{ kg CO}_2^{-e}$

- Metano:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 26$	$E = 31,6 \text{ Kg} * 26$
$E = 1\,747,2 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 821,6 \text{ kg CO}_2^{-e}$

- Óxido nitroso:

Peso inicial	Peso final
$E = 67,2 \text{ Kg} * 65$	$E = 31,6 \text{ Kg} * 65$
$E = 4\,368 \text{ kg CO}_2^{-e}$	$E = 2\,054 \text{ kg CO}_2^{-e}$

**ANEXO 4.** Aplicación de la Ec. 2 para los gases considerados en el estudio para el compostaje Takakura y lombricultura.

Para el compostaje mediante la lombricultura tenemos:

- Dióxido de carbono:

$$\text{CO}_2 * \text{FE} = 0 * 0 = 0 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

- Metano:

$$\text{CH}_4 * \text{FE} * \text{PCG} = 436,8 * 21 = 9\ 172,8 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

- Óxido nitroso:

$$\text{N}_2\text{O} * \text{FE} * \text{PCG} = 1\ 092 * 310 = 338\ 520 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

Para el compostaje Takakura tenemos:

- Dióxido de carbono:

$$\text{CO}_2 * \text{FE} = 0 * 0 = 0 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

- Metano:

$$\text{CH}_4 * \text{FE} * \text{PCG} = 821,6 * 21 = 17\ 253,6 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

- Óxido nitroso

$$\text{N}_2\text{O} * \text{FE} * \text{PCG} = 2\ 054 * 310 = 636\ 740 \text{ kg CO}_2^{-\text{e}}$$

**ANEXO 5.** Aplicación de la Ec. 3 para la emisión de dióxido de carbono equivalente según el peso de los residuos sólidos orgánicos ingresados del año 2014 al año 2018 en el Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos de la ciudad de Loja.

El Factor de emisión considerado para la aplicación de esta ecuación es  $57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}}$  Restos de plantas y jardinería (Ver Tabla 4), tenemos:

- Para el año 2014:

$$\text{BT} * \text{FE} = 942\ 642 \text{ kg} * 57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}} = 53\ 730\ 594 \text{ Kg CO}_2\text{-}^{\text{e}}/\text{año}$$

- Para el año 2015:

$$\text{BT} * \text{FE} = 1\ 020\ 313 \text{ kg} * 57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}} = 58\ 157\ 841 \text{ Kg CO}_2\text{-}^{\text{e}}/\text{año}$$

- Para el año 2016:

$$\text{BT} * \text{FE} = 1\ 110\ 440 \text{ kg} * 57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}} = 63\ 295\ 080 \text{ Kg CO}_2\text{-}^{\text{e}}/\text{año}$$

- Para el año 2017:

$$\text{BT} * \text{FE} = 1\ 292\ 899 \text{ kg} * 57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}} = 73\ 695\ 243 \text{ Kg CO}_2\text{-}^{\text{e}}/\text{año}$$

- Para el año 2018:

$$\text{BT} * \text{FE} = 1\ 318\ 065 \text{ kg} * 57 \text{ CO}_2\text{-}^{\text{e}} = 75\ 129\ 705 \text{ Kg CO}_2\text{-}^{\text{e}}/\text{año}$$

### ANEXO 6. Registro fotográfico

	
<p>Visita a la planta de lombricultura del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos</p>	<p>Pesaje inicial y final de los compostajes en la balanza del Centro Integral de Manejo de Residuos Sólidos.</p>
	
<p>Elaboración de las soluciones salinas y azucarada del compostaje Takakura.</p>	<p>Mezcla y aireación del compostaje Takakura</p>
	
<p>Tamizado del compostaje Takakura</p>	<p>Recolección de muestra para su análisis</p>