

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS Y EL
RELLENO SANITARIO DE PÓNGOR, DISTRITO DE
INDEPENDENCIA, HUARAZ, ANCASH PERIODO 2015 - 2018**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

Tesista: Br. GUIULIANA KARINA RIVERA JARA

Asesor: Dra. Ing. BHENY JANETT TUYA CERNA

Huaraz – Áncash - Perú

2021

**UNIVERSIDAD NACIONAL
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS Y EL
RELLENO SANITARIO DE PÓNGOR, DISTRITO DE
INDEPENDENCIA, HUARAZ, ANCASH PERIODO 2015 - 2018**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

Tesista: Br. GUIULIANA KARINA RIVERA JARA

Asesor: Dra. Ing. BHENY JANETT TUYA CERNA

Huaraz – Áncash - Perú

2021



FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, CONDUCENTES A OPTAR TÍTULOS PROFESIONALES Y GRADOS ACADÉMICOS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

1. Datos del autor:

Apellidos y Nombres: _____

Código de alumno: _____ Teléfono: _____

E-mail: _____ D.N.I. n°: _____

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Tipo de trabajo de investigación:

Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional

Trabajo Académico Trabajo de Investigación

Tesinas (presentadas antes de la publicación de la Nueva Ley Universitaria 30220 – 2014)

3. Para optar el Título Profesional de:

4. Título del trabajo de investigación:

5. Facultad de: _____

6. Escuela o Carrera: _____

7. Asesor:

Apellidos y nombres _____ D.N.I n°: _____

E-mail: _____ ID ORCID: _____

8. Referencia bibliográfica: _____

9. Tipo de acceso al Documento:

Acceso público* al contenido completo. Acceso

restringido** al contenido completo

Si el autor eligió el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo una licencia no exclusiva, para que se pueda hacer arreglos de forma en la obra y difundirlo en el Repositorio Institucional, respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso de que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:



10. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.



Firma del autor

11. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para las investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia Creative Commons, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.



El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12º del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI "Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Recolector Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA".

.....

12. Para ser verificado por la Dirección del Repositorio Institucional

Seleccione la
Fecha de Acto de sustentación:

Huaraz,

Firma:




Varillas William Eduardo
Asistente en Informática y Sistemas
- UNASAM -

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

**** Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.



"Año del Bicentenario del Perú: 200 años de independencia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditorio Virtual - Plataforma Microsoft Teams de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el **Acto Académico de Sustentación y Defensa virtual** de la Tesis "EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS Y EL RELLENO SANITARIO DE PONGOR, DISTRITO DE INDEPENDENCIA, HUARAZ, ANCASH PERIODO 2015 - 2018" que presenta **GUIULIANA KARINA RIVERA JARA** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

APROBADO CON DISTINCION

Con el calificativo de: **DIECISIETE** (**17**)

En consecuencia, **GUIULIANA KARINA RIVERA JARA** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° y 4ta. disposición complementaria del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 761-2017-UNASAM y Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 211-2020-UNASAM que incorpora la sustentación virtual), el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 232-2017-UNASAM) y el Instructivo para sustentación virtual de tesis (Resolución de Consejo de Facultad N° 051-2020-UNASAM- FCAM del 24/octubre/2020).

Huaraz, 04 de junio de 2021

Dr. Cesar Manuel G. Dávila Paredes
Presidente
Jurado de sustentación

Dr. Maximiliano Loarte Rubina
Primer miembro
Jurado de sustentación

MSc. Kiko Félix Depaz Celi
Segundo miembro
Jurado de sustentación

Dra. Bheny Janett Tuya Cerna
Asesora de tesista

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor infinito y apoyo incondicional: a Fernando por inspirarme con sus consejos, enseñarme sobre fortaleza, optimismo y reinención constante; a Elsa por brindarme su amor, dedicación, paciencia, enseñarme sobre valores y templanza.

A mi abuela Manzuela por mostrarme sabiduría, bondad, nobleza e integridad.

A mis hermanos Fernando y José, que con su buen humor y calidez me inspiran para seguir creciendo y aprendiendo juntos.

A familiares, amigos y a todos los que me apoyaron y motivaron para concluir con la elaboración de la presente tesis.

Guiuliana Karina Rivera Jara



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Facultad de Ciencias del Ambiente y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por la loable y desafiante labor de la educación pública de forjar a los futuros profesionales del país, porque desde el primer día de clases y a lo largo de toda mi formación recibí muchas lecciones y aprendizaje, la universidad se mostró como un espacio abierto para desarrollar pensamiento crítico, para valorar y desarrollar un vínculo de identidad con mi región Ancash. Así mismo, agradecer también a todos los docentes que dejaron huella en mi formación y memoria. A mi asesora, la Dra. Bheny Tuya Cerna, por su apoyo y motivación constante y por guiarme durante el desarrollo de la presente tesis.

Un agradecimiento especial a la Municipalidad Distrital de Independencia, así también a la Ing. Yrma Minaya, a Emily Arias y Beatriz Aguilar; por su colaboración, soporte y transparencia en la proporción de la información.

Y finalmente agradezco a todos aquellos que me acompañan e impulsan siempre a ser mejor ciudadana, ser humano; y sobre todo me inspiran para dejar al mundo mejor de como lo encontramos.



RESUMEN

El cambio climático originado por actividades humanas constituye actualmente uno de los mayores desafíos ambientales. Uno de los sectores que contribuyen con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es el sector de residuos sólidos. Por ello, con la finalidad de identificar y cuantificar las emisiones de GEI, se ha empleado la huella de carbono, que es una herramienta poderosa de gestión ambiental que promueve estrategias proactivas para alcanzar la sustentabilidad de las organizaciones.

La presente investigación aplica la metodología de la Norma ISO 14064-1:2016 para la evaluación de la huella de carbono de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos (PTRS) y el relleno sanitario de Póngor de la Municipalidad Distrital de Independencia para el periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.

Los principales resultados muestran que la huella de carbono más alta corresponde al año 2018 con 3107,789 toneladas de CO₂ equivalente (tn CO₂-eq), y la huella de carbono más baja fue en el año base 2015 con 1222,067 tn CO₂-eq. Así mismo; entre los años 2015 al 2018, las emisiones provenientes del relleno sanitario son las que generaron mayores emisiones de CO₂, con 14756,33 tn CO₂-eq; a diferencia de las emisiones evitadas provenientes del reciclaje y compostaje, que ahorraron el vertimiento de -4590,01 tn CO₂-eq hacia la atmósfera.

Finalmente, se concluye que: en primer lugar, existe una oportunidad de mejora en cuanto a las emisiones provenientes del relleno sanitario; mediante la minimización de residuos sólidos no aprovechables, a través de la educación, sensibilización e incentivo a la población en cuanto al manejo de residuos; así como el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de biogás del relleno sanitario de Póngor. En segundo lugar, actividades como el reciclaje o compostaje de la PTRS de Póngor, tienen el potencial para contribuir con la reducción de las emisiones de GEI dentro de la gestión sustentable de RSM de la Municipalidad Distrital de Independencia, siendo prácticas que coadyuvan con los esfuerzos para la mitigación del cambio climático. Por último, los resultados de la presente investigación marcan un precedente en cuanto al estudio de la huella de carbono de los residuos sólidos en la región, que deben considerarse para futuras investigaciones dentro del ámbito local, regional y nacional.

Palabras claves: Huella de carbono, residuos sólidos municipales, emisiones de CO₂, economía circular, cambio climático.

ABSTRACT

Climate change caused by human activities currently constitutes one of the greatest environmental challenges. And one of the sectors that contribute to greenhouse gas (GHG) emissions is the solid waste sector. Therefore, in order to identify and quantify GHG emissions, the carbon footprint has been used, which is a powerful environmental management tool that promotes proactive strategies to achieve the sustainability of organizations.

This research applies the methodology of the ISO 14064-1: 2016 Standard for the evaluation of the carbon footprint of the Solid Waste Treatment Plant (SWTP) and the sanitary landfill, in Póngor of the District Municipality of Independencia for the period included between the years 2015 to 2018.

The main results show that the highest carbon footprint corresponds to the year 2018 with 3107,789 tons of CO₂ equivalent (tn CO₂-eq), and the lowest carbon footprint was in the base year 2015 with 1,222,067 tn CO₂-eq. Likewise; between 2015 and 2018, the emissions from the sanitary landfill are the ones that generated the highest CO₂ emissions, with 14,756.33 tn CO₂-eq. Unlike to the emissions avoided from recycling and composting, which saved the discharge of -4590.01 tn CO₂-eq into the atmosphere.

Finally, it is concluded that; firstly, there is an opportunity for improvement in terms of emissions from the landfill; by minimizing unusable solid waste, through education, awareness and incentive to the population regarding waste management; as well as the maintenance of the biogas treatment systems of the Pongor landfill. Secondly, activities such as recycling or composting of the SWTP of Pongor, have the potential to contribute to the reduction of GHG emissions within the sustainable management of MSW of the District Municipality of Independencia, being practices that contribute to the efforts for climate change mitigation. Finally, the results of this research set a precedent regarding the study of the carbon footprint of solid waste in the region, which should be considered for future research at the local, regional and national levels.

Key words: Carbon footprint, municipal solid waste, CO₂ emissions, circular economy, climate change.

INDICE

| CONTENIDO | Pág. |
|-------------------------------------|-------------|
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| RESUMEN | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE TABLAS | xiv |
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| LISTA DE GRÁFICAS | xv |
| LISTA DE SIGLAS | xvi |
| CAPÍTULO I | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Objetivos | 2 |
| 1.1.1. Objetivo general | 2 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 2 |
| 1.2. Justificación | 3 |
| 1.2.1. Académico | 3 |
| 1.2.2. Ambiental | 3 |
| 1.2.3. Social | 4 |
| 1.2.4. Económica | 4 |
| 1.3. Hipótesis | 5 |
| 1.4. Variables | 5 |
| CAPÍTULO II | 7 |
| MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. Antecedentes | 7 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales | 7 |



| | | |
|----------|--|----|
| a. | Huella de carbono de los tratamientos de gestión de residuos municipales, comparación entre distintos escenarios de gestión en Madrid | 7 |
| b. | Emisiones de GEI y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica | 8 |
| c. | Evaluación de la huella de carbono del tratamiento y técnicas de eliminación de residuos sólidos en Jeram, Malasia | 8 |
| d. | Modelado de la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de GEI del sistema de gestión de RSM de Lahore, Pakistán | 9 |
| 2.1.2. | Antecedentes Nacionales | 10 |
| a. | Transición de botaderos abiertos a rellenos sanitarios en el Perú: beneficios y desafíos ambientales desde la perspectiva del ciclo de vida | 10 |
| 2.1.3. | Antecedentes regionales y locales | 10 |
| 2.2. | Bases teóricas | 11 |
| 2.2.1. | El cambio climático | 11 |
| 2.2.2. | Residuos sólidos | 14 |
| 2.2.2.1. | Situación global de los residuos sólidos | 14 |
| 2.2.2.2. | Gestión de RS bajo el enfoque de economía circular en el mundo | 15 |
| 2.2.2.3. | Composición de los residuos sólidos en América Latina y el Caribe | 19 |
| 2.2.2.4. | Contexto peruano en el sector de residuos sólidos | 22 |
| 2.2.3. | Marco normativo nacional en el sector de residuos sólidos en el Perú | 27 |
| 2.2.4. | La huella ecológica | 28 |
| 2.2.5. | La huella de carbono | 29 |
| 2.2.5.1. | La huella de carbono en residuos sólidos | 35 |
| 2.2.5.2. | La huella de carbono en el sector residuos sólidos en el Perú | 38 |
| 2.3. | Definición de términos básicos | 40 |
| 2.3.1. | Alcance | 40 |
| 2.3.2. | Análisis de ciclo de vida (ACV) | 40 |
| 2.3.3. | Año base | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.4. Cambio climático | 40 |
| 2.3.5. Combustión fija | 40 |
| 2.3.6. Combustión móvil | 41 |
| 2.3.7. Efecto invernadero | 41 |
| 2.3.8. Emisiones antropogénicas | 41 |
| 2.3.9. Emisión de GEI | 41 |
| 2.3.10. Emisión directa de GEI | 41 |
| 2.3.11. Emisión indirecta de GEI por energía | 41 |
| 2.3.12. Equivalente de dióxido de carbono (CO ₂ -e) | 42 |
| 2.3.13. Factor de emisión | 42 |
| 2.3.14. Fuente de GEI | 42 |
| 2.3.15. Gases de Efecto Invernadero (GEI) | 42 |
| 2.3.16. Inventario de GEI | 42 |
| 2.3.17. Incertidumbre | 43 |
| 2.3.18. Mecanismo para un desarrollo limpio | 43 |
| 2.3.19. Límite del inventario | 43 |
| 2.3.20. Límites operativos | 43 |
| 2.3.21. Organización | 43 |
| 2.3.22. Otras emisiones indirectas de GEI | 44 |
| 2.3.23. Poder calorífico | 44 |
| 2.3.24. Potencial de calentamiento global (PCG) | 44 |
| 2.3.25. Relleno Sanitario | 44 |
| 2.3.26. Remoción de GEI | 44 |
| 2.3.27. Reservorio de GEI | 45 |
| 2.3.28. Sumidero de GEI | 45 |
| CAPÍTULO III | 46 |
| MARCO METODOLÓGICO | 46 |
| 3.1. Tipo de investigación | 46 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.1. | Según el nivel de conocimiento | 46 |
| 3.1.2. | Según el tipo de información que se va a recopilar | 46 |
| 3.1.3. | Según la finalidad | 46 |
| 3.2. | Diseño de investigación | 46 |
| 3.2.1. | Definición de los límites | 48 |
| | a. Alcance I - Emisiones y remociones directas de GEI | 48 |
| | b. Alcance II – Emisiones indirectas de GEI por energía | 48 |
| | c. Alcance III – Otras emisiones indirectas de GEI | 48 |
| | d. Emisiones evitadas o remociones de GEI | 49 |
| 3.2.2. | Selección del año base | 49 |
| 3.2.3. | Identificación de emisiones | 50 |
| | a. Identificación de emisiones directas de GEIs | 50 |
| | b. Identificación de emisiones indirectas de GEIs por energía | 50 |
| | c. Identificación de otras emisiones indirectas de GEIs | 50 |
| | d. Identificación de emisiones evitadas o remociones de GEI | 50 |
| 3.2.4. | Cálculo de emisiones | 50 |
| 3.2.5. | Informe de emisiones | 50 |
| 3.3. | Descripción del lugar de estudio | 51 |
| 3.3.1. | Procesos Operativos de la PTRS de Póngor | 53 |
| | a. Recepción de RS | 53 |
| | b. Planta de segregación de RS | 53 |
| | c. Sistemas de fajas transportadoras | 53 |
| | d. Prensado de residuos sólidos | 53 |
| | e. Producción de compost y humus | 53 |
| | f. Relleno sanitario manual | 54 |
| 3.4. | Métodos o técnicas | 55 |
| 3.4.1. | Métodos | 55 |
| 3.4.2. | Técnicas | 56 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5. Población y muestra | 56 |
| 3.5.1. Población | 56 |
| 3.5.2. Muestra: | 56 |
| 3.6. Instrumentos validados de recolección de datos | 56 |
| 3.6.1. Fuentes Primarias | 57 |
| 3.6.2. Fuentes Secundarias | 57 |
| 3.7. Plan de procesamiento y análisis de la información | 57 |
| 3.7.1. Obtención de la emisión de GEI | 57 |
| 3.7.2. Conversión de los datos de emisión (de toneladas de GEI a unidades de toneladas de CO ₂ -e) | 58 |
| 3.8. Ética de la investigación | 60 |
| 3.9. Limitaciones | 60 |
| CAPÍTULO IV | 61 |
| RESULTADOS | 61 |
| 4.1. Delimitación del área de estudio | 61 |
| 4.1.1. Límites organizacionales | 61 |
| 4.1.2. Límites operacionales | 62 |
| 4.2. Cuantificación de consumo de recursos y disposición final de residuos | 62 |
| 4.2.1. Alcance I | 62 |
| 4.2.1.1. Consumo de combustible | 62 |
| 4.2.2. Alcance II | 64 |
| 4.2.2.1. Consumo de energía eléctrica | 64 |
| 4.2.3. Alcance III | 64 |
| 4.2.3.1. Disposición final de residuos sólidos no aprovechables | 64 |
| 4.2.4. Reciclaje y compostaje | 65 |
| 4.2.4.1. Reciclaje | 65 |
| 4.2.4.2. Compostaje | 66 |
| 4.2.5. Resumen del consumo de recursos y disposición final de residuos | 66 |

| | | |
|--------------------------------|---|-----------|
| 4.3. | Cuantificación de las emisiones de CO ₂ -eq | 67 |
| 4.3.1. | Alcance I | 67 |
| 4.3.1.1. | Factor de emisión de fuentes móviles (consumo de combustible) | 67 |
| 4.3.1.2. | Resultados del inventario de GEI del consumo de combustible | 70 |
| 4.3.2. | Alcance II | 71 |
| 4.3.2.1. | Factor de emisión del consumo de energía eléctrica | 71 |
| 4.3.2.2. | Resultados del inventario de GEI del consumo de energía eléctrica | 74 |
| 4.3.3. | Alcance III | 75 |
| 4.3.3.1. | Factor de emisión de la disposición final de RSM no aprovechables en un relleno sanitario | 75 |
| 4.3.3.2. | Resultados del inventario de GEI de la disposición final de RSM en el relleno sanitario | 78 |
| 4.3.4. | Emisiones evitadas | 79 |
| 4.3.4.1. | Factores de emisión del reciclaje y compostaje | 79 |
| 4.3.4.2. | Resultados del inventario de GEI del reciclaje | 81 |
| 4.3.4.3. | Resultados del inventario de GEI del compostaje | 84 |
| 4.3.5. | Resultados totales del inventario de emisiones de CO ₂ – eq. por alcance | 86 |
| 4.4. | Incertidumbre en la exactitud de datos de emisiones de GEI | 88 |
| 4.4.3.1. | Reciclaje y compostaje | 93 |
| CAPÍTULO V | | 95 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | | 95 |
| 5.1. | Alcance I | 95 |
| 5.1.1. | Fuentes móviles o consumo de combustible | 95 |
| 5.2. | Alcance II | 96 |
| 5.2.1. | Consumo de energía eléctrica | 96 |
| 5.3. | Alcance III | 96 |
| 5.3.1. | Disposición final de RSM no aprovechables en el relleno sanitario | 96 |
| 5.4. | Emisiones evitadas | 97 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.1. Reciclaje | 97 |
| 5.4.2. Compostaje | 97 |
| 5.5. Resultados totales del inventario de emisiones de CO ₂ – eq. | 97 |
| 5.6. Resultados totales anuales del inventario de emisiones de CO ₂ – eq. | 99 |
| CAPÍTULO VI | 100 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 100 |
| 6.1. Conclusiones | 100 |
| 6.2. Recomendaciones | 101 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 103 |
| ANEXO | 114 |

LISTA DE TABLAS

| CONTENIDO | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1: Operacionalización de variables | 5 |
| Tabla 2: Opciones de mitigación consideradas para el sector desechos. | 14 |
| Tabla 3: Acciones de la estrategia jerarquizada de residuos | 18 |
| Tabla 4: Composición de RSM de algunos países de Latinoamérica y el Caribe | 22 |
| Tabla 5: Disposición final de RSM por regiones | 25 |
| Tabla 6: Marco normativo en el sector de residuos sólidos | 27 |
| Tabla 7: Investigaciones realizadas sobre huella de carbono en el sector de RS | 36 |
| Tabla 8: Emisiones de dióxido de carbono en el sector residuos | 39 |
| Tabla 9: Composición de los RSM de la Municipalidad Distrital de Independencia | 52 |
| Tabla 10: Índice GWP para GEI | 59 |
| Tabla 11: Identificación de límites operacionales | 62 |
| Tabla 12: Cantidad de combustible consumido por vehículo | 63 |
| Tabla 13: Combustible al 95% diésel B5 | 64 |
| Tabla 14: Cantidad de energía eléctrica consumida | 64 |
| Tabla 15: Cantidad de residuos sólidos municipales no aprovechables | 65 |
| Tabla 16: Cantidad de residuos sólidos municipales reciclables | 66 |
| Tabla 17: Cantidad de residuos sólidos municipales orgánicos | 66 |
| Tabla 18: Resumen de los valores anuales del consumo de recursos y RSM | 67 |
| Tabla 19: Asignación de valores para el cálculo de emisiones | 69 |
| Tabla 20: Emisiones de toneladas de CO ₂ - eq. del consumo de combustible | 70 |
| Tabla 21: Asignación de valores para el cálculo de emisiones | 73 |
| Tabla 22: Emisiones de CO ₂ - eq. del consumo de energía eléctrica | 74 |
| Tabla 23: Asignación de valores para el cálculo de emisiones | 77 |
| Tabla 24: Emisiones de CO ₂ – eq. del relleno sanitario | 79 |
| Tabla 25: Emisiones de CO ₂ – eq. del relleno sanitario | 80 |
| Tabla 26: Emisiones de CO ₂ – eq. del reciclaje | 82 |
| Tabla 27: Emisiones evitadas de CO ₂ – eq. del reciclaje | 82 |
| Tabla 28: Emisiones totales netas del reciclaje | 83 |
| Tabla 29: Emisiones de CO ₂ – eq. del compostaje | 84 |
| Tabla 30: Emisiones evitadas de CO ₂ – eq. del compostaje | 85 |
| Tabla 31: Emisiones totales netas del compostaje | 86 |
| Tabla 32: Emisiones de CO ₂ – eq generados por alcance | 87 |
| Tabla 33: Incertidumbre asociados a los factores de emisión | 90 |
| Tabla 34: Incertidumbre asociados a los factores de emisión | 91 |

| | |
|--|----|
| Tabla 35: Incertidumbre asociados a los datos de actividad | 92 |
| Tabla 36: Matriz para determinar la incertidumbre resultante cualitativa | 92 |
| Tabla 37: Evaluación cualitativa de la Incertidumbre del inventario de GEI | 93 |
| Tabla 38: Emisiones anuales de la PTRS y relleno sanitario de Pongor | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| CONTENIDO | Pág. |
|--|------|
| Figura 1: Emisiones antropogénicas anuales de GEI totales (GtCO ₂ eq/año) | 12 |
| Figura 2: Medidas de mitigación de GEI | 13 |
| Figura 3: Esquema del sistema de la economía circular. | 16 |
| Figura 4: Tratamiento de RSM en países de la UE. | 17 |
| Figura 5: Índice de jerarquía de residuos Hertfordshire Waste Partnership. | 18 |
| Figura 6: Composición de los residuos en América Latina y el Caribe | 19 |
| Figura 7: Generación de RSM años 2014 - 2018 | 23 |
| Figura 8: Mapa de rellenos sanitarios a nivel nacional | 26 |
| Figura 9: La relación entre los tres enfoques | 30 |
| Figura 10: Forzamiento radiativo (RF) positivo del clima | 31 |
| Figura 11: Fuentes de emisiones en las ciudades. | 33 |
| Figura 12: Alternativas de aplicación de la huella de carbono. | 34 |
| Figura 13: Mapa de ubicación del distrito de Independencia | 51 |
| Figura 14: Vista satelital de la PTRS de Pongor y sus inmediaciones | 52 |

LISTA DE GRÁFICAS

| CONTENIDO | Pág. |
|--|------|
| Gráfica 1: Emisiones de dióxido de carbono en el sector residuos | 39 |
| Gráfica 2: Metodología para el cálculo de la huella de carbono | 47 |
| Gráfica 3: Estructura del sistema de disposición final de RSM | 54 |
| Gráfica 4: Diagrama de Flujo de Operación del Relleno Sanitario Manual | 55 |
| Gráfica 5: Diagrama de los límites organizacionales | 61 |
| Gráfica 6: Emisiones de CO ₂ – eq. del consumo de combustible | 70 |
| Gráfica 7: Emisiones de CO ₂ – eq. del consumo de combustible anual | 71 |
| Gráfica 8: Emisiones de CO ₂ – eq. del consumo de energía anual | 75 |
| Gráfica 9: Emisiones de CO ₂ – eq. del relleno sanitario del periodo 2015 al 2018 | 79 |
| Gráfica 10: Emisiones y emisiones evitadas de t CO ₂ – eq. del reciclaje | 83 |

| | |
|--|----|
| Gráfica 11: Emisiones totales netas de t CO ₂ – eq. del reciclaje | 84 |
| Gráfica 12: Emisiones y emisiones evitadas de t CO ₂ – eq. del compostaje | 85 |
| Gráfica 13: Emisiones totales netas de t CO ₂ – eq. del compostaje | 86 |
| Gráfica 14: Emisiones totales de CO ₂ – eq por alcance | 87 |
| Gráfica 15: Emisiones totales anuales de CO ₂ – eq del periodo 2015 al 2018 | 88 |
| Gráfica 16: Categorización de la incertidumbre | 89 |
| Gráfica 17: Emisiones anuales de la PTRS y relleno sanitario de Pongor | 99 |

LISTA DE SIGLAS

| SIGLA | DENOMINACIÓN |
|----------------------|---|
| ACV | Análisis de Ciclo de Vida |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| COP 21 | Conferencia sobre el cambio climático |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| GWP | Global warming potencial |
| IPCC | Panel intergubernamental de Cambio Climático |
| ISO | Organization for Standardization |
| MINAM | Ministerio del Medio Ambiente |
| NDC | Contribuciones Nacionalmente Determinadas |
| OCDE | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos |
| PTRS | Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos |
| RAGEI | Reporte anual de gases de efecto invernadero |
| RS | Residuos sólidos |
| RSM | Residuos sólidos municipales |
| SIGERSOL | Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos |
| tCO ₂ -eq | Tonelada de CO ₂ equivalente |
| UE | Unión Europea |
| UNFCC | Convención marco de naciones unidas sobre el cambio climático |
| VCN | Valor calorífico neto |
| WRI | World Resources Institute |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos municipales son aquellos que resultan de la eliminación de materiales de actividades domésticas, de comercios, oficinas y diversos servicios. El crecimiento poblacional, el desarrollo económico y los patrones de consumo de los habitantes han propiciado el incremento incesante en las tasas de generación de los residuos sólidos municipales y nuestro país no es ajeno a esta realidad. Según el informe del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, se sabe que un ciudadano latinoamericano genera un kilogramo de residuos diariamente, lo que representa el 10% de los residuos generados mundialmente y la perspectiva es que la cantidad de residuos sólidos que se genera continúe incrementándose debido a una endeble economía circular, la débil capacidad de reciclaje, entre otros. Para el caso de nuestro país, anualmente se generan más de 7 millones de toneladas de residuos sólidos municipales (RSM), aproximadamente 20 mil toneladas diariamente y mil toneladas por hora y casi el 70% de estos residuos son domiciliarios (Defensoría del Pueblo, 2019).

Como resultado de la generación de residuos, esta a su vez está vinculada a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, que según el “Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero” del año 2014, el sector desechos es el cuarto mayor aportante de emisiones a nivel nacional con el 5.8% o 9679.7 GgCO₂eq (MINAM, 2019); por lo que es importante atender a esta problemática relacionada con la gestión de RSM, como migrar de botaderos de cielo abierto a rellenos sanitarios, incorporar actividades de tratamiento de RSM como reciclaje y compostaje y sobre todo reducir el ingreso de RSM a los rellenos sanitarios; para reducir los impactos asociados, además de encaminar la gestión de RSM hacia la economía circular.

Adicionalmente el cambio climático es una de las más grandes preocupaciones en la actualidad. Desde la era preindustrial las concentraciones de CO₂ se han

incrementado en un 35% y las concentraciones de metano llegan a alcanzar más del doble. El consenso científico ha observado como consecuencia de esto el incremento promedio de la temperatura global desde mediados del siglo XX debido al incremento de las concentraciones de GE), producidos por la actividad humana, combustión de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural. El sector de desechos o residuos sólidos contribuye también a este incremento; también existe evidencia que, si se consideran las emisiones evitadas, por ahorros gracias al reciclaje o compostaje, se puede cambiar completamente este panorama. Mediante el uso de sistemas y tecnologías de gestión de RSM, se pueden reducir de forma significativa las emisiones de GEI (ISWA–International Solid Waste Association, 2009).

A lo largo de la presente investigación, se profundizará más sobre los temas anteriormente expuestos, para determinar las medidas y estrategias que hay que desarrollar en la gestión de los RSM en la etapa de disposición final es importante evaluar y medir para nuestro caso de estudio las emisiones de GEI generadas en la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos (PTRS) de Póngor de la Municipalidad distrital de Independencia, una herramienta que nos facilitará este cálculo es la huella de carbono, siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 14064-1:2016, la cual brinda las especificaciones para la cuantificación y reporte de las emisiones de GEI.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar la huella de carbono generada por el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos y el relleno sanitario de Póngor, del distrito de Independencia, provincia de Huaraz, en el periodo 2015 – 2018.

1.1.2. Objetivos específicos

- a. Calcular la huella de carbono de la PTRS de Póngor.
- b. Calcular la huella de carbono del relleno sanitario de Pongor.
- c. Comparación de escenarios para determinar la huella de carbono más alta.
- d. Determinar las opciones de mejora de la PTRS de Pongor para la disminución de la huella de carbono.

1.2. Justificación

Diversas investigaciones en la actualidad han determinado que el cambio climático es provocado por las emisiones de GEI, asimismo este fenómeno está estrechamente relacionado como consecuencia de las actividades productivas realizadas por el hombre tal como concluye el cuarto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC, (2006); en consecuencia, el problema no sólo abarca el sistema de producción mundial basado en la economía lineal; sino también debe considerarse el análisis respecto al impacto que tendrá sobre el clima. Este punto cobra mayor importancia en nuestro país y aún más en nuestra localidad, toda vez que al tener un país megadiverso y con altos índices de ocurrencia de fenómenos climáticos de relevancia, como el Fenómeno del Niño, existe una clara necesidad de enfocarnos en la gestión sostenible de estas emisiones; por lo tanto, el presente trabajo tiene la intención de analizar mediante un indicador ambiental como lo es la huella de carbono, el impacto que tendrán las emisiones en la gestión local de residuos sólidos.

1.2.1. Académico

Mediante el cálculo de la huella de carbono de la PTRS y el relleno sanitario de Pongor de la Municipalidad Distrital de Independencia, se pretende cuantificar y dar a conocer las emisiones de GEI, y de esta forma sentar las bases para investigaciones futuras respecto a la huella de carbono a nivel local y regional en el sector de residuos sólidos con la finalidad de estudiar más detalladamente los contextos locales de la gestión de RSM en el Perú, toda vez que este tipo de estudio no ha tenido ningún tipo de precedente. Con ello se espera que las actividades de la gestión de residuos sólidos, así como los rellenos sanitarios puedan contar con factores de emisión de acuerdo a sus propias características operativas.

1.2.2. Ambiental

A través del cálculo de la huella de carbono de la PTRS y el relleno sanitario de Pongor se evaluará el impacto ambiental de la gestión de residuos vinculando no sólo la disposición final, sino también el reaprovechamiento, el impacto positivo y/o negativo sobre el medio ambiente haciendo de esta herramienta un proceso de varias aristas que

permitirá identificar una solución integral. En consecuencia, la investigación se centra en emplear el indicador denominado “huella de carbono”, el cual es una herramienta de mitigación que facilitará como primer paso la evaluación y el cálculo de las emisiones de GEI, lo que nos permitirá identificar posteriormente cuáles de los procesos de la gestión y tratamiento de residuos sólidos son sostenibles y cumplen los estándares de gestión ambiental, para de esta forma evaluar nuevas oportunidades de mejora en el proceso y así reducir las emisiones hacia la atmósfera.

1.2.3. Social

A través del fomento de actividades como la segregación y minimización de residuos en la fuente, esta influye en la calidad de los residuos a ser reciclados y compostados; por ello es muy sustancial educar, incentivar y apoyar a la población de acuerdo con la metodología de la jerarquía del manejo de residuos; basándose en la prevención de la generación, el reúso, el incentivo de la segregación para reciclaje y compostaje y finalmente la disposición final. De tal forma que, al reducir los residuos ingresantes al relleno sanitario, se reducirá el impacto de las emisiones provenientes del mismo. También porque la gestión de RSM que hace énfasis en el uso de tecnologías limpias (como el reciclaje o compostaje), disminuye la acumulación de residuos en botaderos o rellenos sanitarios, reduciendo el riesgo por focos infecciosos, siendo favorable para la salud de la población

1.2.4. Económica

A través del cálculo de la huella de carbono, no solo se emplea para evaluar los impactos ambientales, sino que también se aplica para cuantificar la eficiencia energética y su impacto en los costos operacionales de una organización, lo cual podría contribuir con el margen de beneficios; lo que significa que esta herramienta además de favorecer a la sustentabilidad ambiental, también contribuye con la rentabilidad económica de una organización.

Así también, mediante una adecuada gestión de residuos sólidos que promueve el uso de tecnologías limpias como el reciclaje o compostaje, además de ser una excelente estrategia para reducir las emisiones de GEI

provenientes de la gestión de residuos sólidos municipales, también incentiva el crecimiento y desarrollo de la economía local vinculadas a la conservación ambiental, mediante el fomento de la formalización de recicladores y empresas operadoras de residuos sólidos.

La huella de carbono, por lo tanto, es una herramienta eficiente de gestión e incita a adoptar una estrategia proactiva para alcanzar la sustentabilidad de las organizaciones.

1.3. Hipótesis

El funcionamiento de la PTRS de Póngor de la Municipalidad Distrital de Independencia genera menor huella de carbono en comparación con el relleno sanitario de la misma Municipalidad. Distrital de Independencia.

1.4. Variables

La investigación asume como variable independiente la huella de carbono, que es la contabilidad de las emisiones de CO₂ equivalente, dentro del alcance de los límites operativos. Como variable dependiente se consideran las emisiones generadas en la PTRS y el relleno sanitario de Póngor.

La operacionalización de las variables, tanto independiente como dependiente se puede apreciar en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Operacionalización de variables

| Variable | Dimensiones | Indicador | Técnica | Instrumento |
|---|--|---|--|---|
| Variable independiente Huella de carbono | Identificar y definir los límites operativos y los límites del inventario de emisiones de GEI. | Fuentes de las emisiones, provenientes del: - Consumo de energía - Consumo de combustible - Disposición de RS en el relleno sanitario. - Compostaje y reciclaje. Salidas: - Emisiones de GEI. | Realizar un inventario de emisiones de GEI. | - Formato de inventario de emisiones de GEI. - Base de datos de gestión de RS (Mun. Distrital de Independencia, SIGERSOL). - Guías del IPCC. - Revisión bibliográfica (Estadísticas, antecedentes, entre otros). |
| Variable dependiente Emisiones generadas en | Identificación de emisiones: - Emisiones directas, | Toneladas de CO ₂ equivalente (tn de CO ₂ -eq). | Cuantificación de emisiones, expresadas en toneladas de CO ₂ -eq. | Herramientas informáticas - Hojas Excel - IPCC Inventory Software. |

| | |
|---|---|
| la PTRS y relleno sanitario de Pongor | <ul style="list-style-type: none">- Emisiones indirectas,- Otras emisiones indirectas.- Emisiones evitadas. |
|---|---|

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

a. Huella de carbono de los tratamientos de gestión de residuos municipales, comparación entre distintos escenarios de gestión en Madrid

El estudio se realizó con el objetivo de comparar, para el año 2013 la etapa de tratamiento de los residuos de la ciudad de Madrid con la situación de 10 escenarios de gestión de residuos sólidos para determinar la huella de carbono y evaluar si se lograba reducir el impacto ambiental. La metodología empleada fue el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la cuantificación de la huella de carbono, según las normas internacionales de ACV: ISO 14040/14044; y las normas específicas de huella de carbono: ISO/TS 14067, PAS 2070:2013 y 2050:2011, y Global Protocol for Community-Scale GHG Emission Inventories. De los resultados obtenidos, se identificó que la recuperación de materiales reciclables en combinación con: tratamientos biológicos, biometización, compostaje y reciclaje son las opciones que generaron una Huella de carbono inferior y de menor impacto, con $-249 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/tres}$. El escenario más desfavorable es en el que los residuos sólidos son llevados directamente a un relleno sanitario sin recuperación de biogás y sin contar con un proceso de reciclaje, generando un mayor impacto y una huella de carbono alta de $224 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/tres}$. La investigación concluye que el reciclaje en combinación con tratamientos biológicos y compostaje, son opciones

que generan una menor huella de carbono; por lo tanto, un menor impacto en el cambio climático (Pérez Rodríguez et al., 2016).

b. Emisiones de GEI y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica

La investigación se realizó con el objetivo de analizar 4 diferentes alternativas de disposición final de residuos sólidos: disposición en rellenos sanitarios, incineración, compostaje y tratamiento mecánico-biológico, para poder evaluar cuál de estas alternativas genera mayores emisiones de GEI. Cada alternativa fue evaluada desde el punto de vista ambiental, empleando como metodología para la estimación de emisiones mediante la huella de carbono, el ACV, flujo de materiales y energía. Como resultado se obtuvo que; el tratamiento con huella de carbono más alta es la disposición final en rellenos sanitarios con 532.5 t CO₂e/d, seguido por la incineración de residuos sólidos urbanos con 401.9 t CO₂e/d; en contraste con las emisiones más bajas generadas por el compostaje con 4.93 t CO₂e/d. Los investigadores concluyeron que, el compostaje y el tratamiento biomecánico como alternativas de disposición final de residuos en los rellenos sanitarios representa una oportunidad de reducción de emisiones desde un 24% a un 33%; adicionalmente se recomienda como medida de mitigación, el uso de los residuos como fuente renovable de energía, mediante la recuperación de biogás capturado en los rellenos sanitarios (Murillo et al., 2018).

c. Evaluación de la huella de carbono del tratamiento y técnicas de eliminación de residuos sólidos en Jeram, Malasia

La investigación estuvo a cargo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Tecnológica de PETRONAS en Malasia; cuyo objetivo fue evaluar la huella de carbono del relleno sanitario ubicado en la ciudad de Jeram en Malasia. Se propusieron y evaluaron 3 escenarios; el primer escenario fue el relleno sanitario con recuperación de biogás, el segundo escenario fue la digestión anaerobia de sustancias orgánicas y reciclaje de residuos (como plástico, vidrio y textiles) y, finalmente el tercer escenario fue la incineración de residuos. La metodología empleada para la investigación fueron los lineamientos

del año 2006 del IPCC. Los resultados obtenidos muestran que para el escenario 1 (Relleno sanitario con recuperación de biogás), la huella de carbono fue de 0.11 t CO₂ eq/t-neto; para el escenario 2 (digestión anaerobia y reciclaje de residuos) la huella de carbono fue de -0.490 t CO₂ eq/t-neto y para el caso del escenario 3 (incineración de residuos) la huella de carbono fue de 0.25 t CO₂ eq/t-neta. Se observa que de la misma cantidad de residuos sólidos genera diferentes emisiones de huella de carbono en función a varios factores de tratamiento aplicado, por lo que estas emisiones podrían reducirse al mínimo. Finalmente la investigación concluye que el escenario 2, es el tratamiento que generó una menor cantidad de huella de carbono; a diferencia de los otros dos escenarios; adicionalmente a ello, al integrar tratamientos como la digestión anaeróbica y el reciclaje, favorece el ahorro de recursos naturales, ya que el material reciclado podría ser remanufacturado; inclusive ambas prácticas requieren áreas relativamente pequeñas en comparación con las grandes áreas usadas para los rellenos sanitarios (Malakahmad et al., 2017).

d. Modelado de la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de GEI del sistema de gestión de RSM de Lahore, Pakistán

El objetivo del estudio fue evaluar la huella de carbono de los RSM, considerando diferentes escenarios: el escenario 1, donde todos los residuos se envían a una instalación de recuperación de material, se realiza reciclaje, compostaje y los desechos restantes se envían a un relleno sanitario; el escenario 2, donde se realizan los mismos procesos que el escenario 1, pero el único cambio introducido es el tratamiento de residuos orgánicos con recuperación de biogás en una planta de biogasificación; finalmente el escenario 3, el cual es similar al escenario 2, excepto que los residuos restantes se envían como combustible derivado de desperdicios a una planta de cemento para recuperación de energía. La metodología empleada fue el ACV, cuya modelación fue en base a los lineamientos del IPCC del año 2006. Según los resultados se demuestra que el proceso más favorable y con una menor huella de carbono es el escenario 2; ya que se realiza reciclaje y recuperación de biogás; en contraste con el escenario 1 ya que este tipo de sistema es el que contribuye a la generación de mayores emisiones de GEI por ende genera una huella de carbono más alta. De la investigación se

concluye que el escenario donde se emplea el reciclaje, compostaje y recuperación de biogás es el sistema más favorable y presenta la mínima cantidad de Huella de carbono entre todos los escenarios propuestos (Syeda et al., 2017).

2.1.2. Antecedentes Nacionales

a. Transición de botaderos abiertos a rellenos sanitarios en el Perú: beneficios y desafíos ambientales desde la perspectiva del ciclo de vida

El objetivo del estudio fue evaluar el desempeño ambiental de la disposición final de residuos en tres rellenos sanitarios ubicados en diferentes áreas geográficas del Perú: la costa hiper-árida en Lima, los andes en el Cusco y la selva en Nauta; empleando la metodología del ACV. Los resultados del estudio muestran que migrar del uso de botaderos abiertos hacia rellenos sanitarios han generado beneficios ambientales; sin embargo, la recuperación de biogás es un aspecto crítico que se debe atender para mitigar las emisiones de GEI en los rellenos sanitarios, esta mejora le facilitaría al Perú mitigar los efectos negativos que ocasiona el manejo inadecuado de residuos sólidos. Se concluye que una infraestructura apropiada es importante para abordar las condiciones locales que pueden modificar considerablemente el equilibrio del ecosistema, especialmente en entornos vulnerables como los de la cuenca del Amazonas, y también donde el Fenómeno del Niño tiene una influencia significativa; es fundamental que la planificación del sistema de gestión de RSM considere estos aspectos para proporcionar un mejor tratamiento (Ziegler-Rodriguez et al., 2019).

2.1.3. Antecedentes regionales y locales

De acuerdo a la revisión de la literatura en cuanto a investigaciones actuales y anteriores respecto a indicadores ambientales como huella ecológica o huella de carbono, se identificó una investigación local sobre la determinación de la huella de ecológica del campus universitario de la UNASAM a cargo de Esquivel Huerta & Popayán Valverde (2018). Sin embargo, respecto al cálculo de la huella de carbono de la disposición final de residuos sólidos municipales; no se han encontrado antecedentes sobre publicaciones o investigaciones regionales y/o locales al respecto. Por lo

cual se están considerando los antecedentes internacionales y nacionales para la presente investigación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El cambio climático

Se considera como uno de los problemas ambientales más importantes en la actualidad; la ciencia y los estudios sobre el clima, han abordado este problema a través de dos puntos importantes: la detección y la atribución. La detección busca demostrar que existe un cambio climático, mientras que la atribución trata de identificar las causas de este cambio (Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental | Gobierno Vasco, 2015).

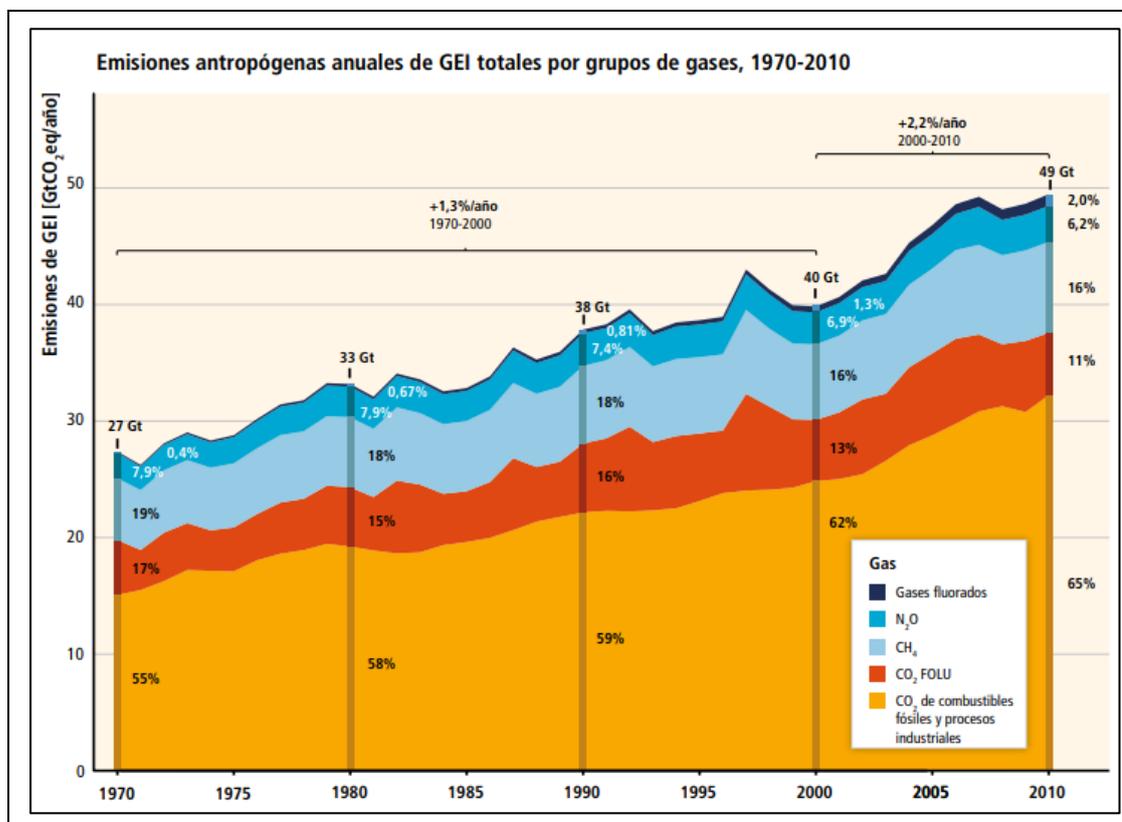
La convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC por sus siglas en inglés), en el año 1992 definió al cambio climático como: Un cambio del clima que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparable (UNFCCC, 1992).

No obstante, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en su cuarto informe de evaluación del año 2007 considera al cambio climático como: “Cualquier cambio en el clima sobre tiempo, el cual es debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana (p.6)” (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007)

Teniendo en cuenta ambas definiciones, se considera que el cambio climático se origina como consecuencia de las emisiones de GEI que incrementan la temperatura promedio de la superficie terrestre, debido a acontecimientos naturales o por causas antropogénicas directas o indirectas. Según el resumen de políticas en cambio climático del IPCC (2014) indica: “ Las emisiones antropogénicas de GEI totales han continuado en aumento de 1970 a 2010 y los mayores aumentos decenales absolutos se han producido al final de ese periodo” (p.6).

La **Figura 1** muestra las cifras del IPCC para el año 2010, las emisiones de GEI antropogénicas fueron de 49 GT GtCO₂ eq/año, por grupos de gases, procedentes de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales; CO₂ proveniente de la silvicultura y otros usos del suelo (FOLU); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); gases fluorados abarcados en el Protocolo de Kyoto.

Figura 1: Emisiones antropogénicas anuales de GEI totales (GtCO₂eq/año)

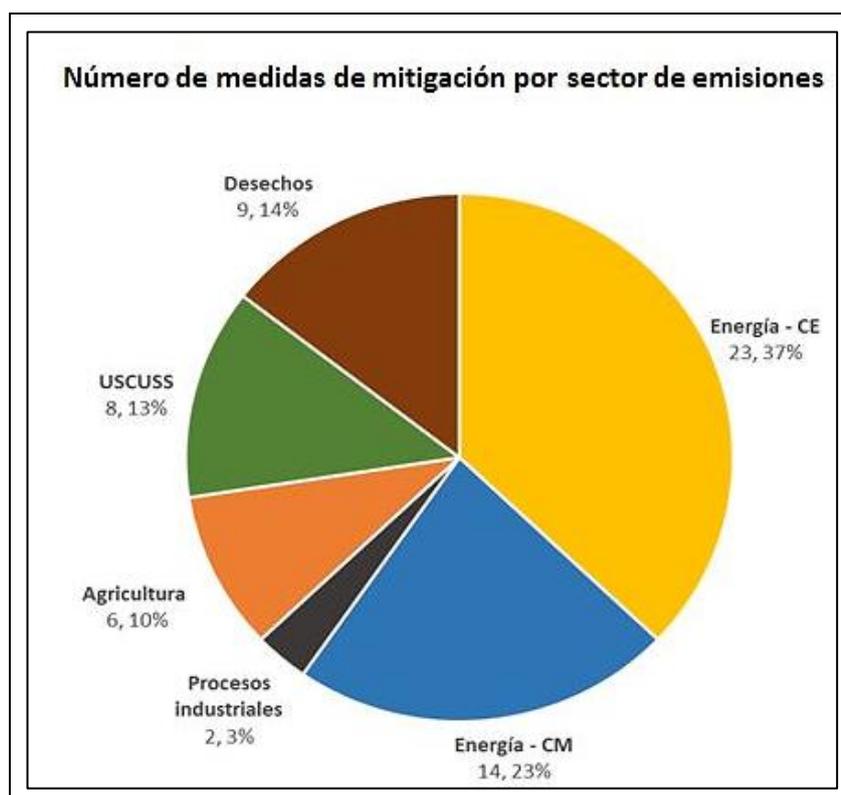


Fuente: Pachauri et al., 2014, p.7

En el año 2015 se celebró la XXI Conferencia sobre el cambio climático (COP 21) en París, en la conferencia 195 países y la Unión Europea aptaron un consenso llamado “El acuerdo de París”, como resultado proveniente desde el Protocolo de Kioto de 1997, donde muchos países del mundo asumieron su compromiso para mitigar sus emisiones de carbono. El acuerdo de París establece como meta, mantener la temperatura del planeta por debajo de los dos grados centígrados y hacer esfuerzos para evitar que la temperatura global se incremente en más de 1.5 grados centígrados. Cada país parte del acuerdo suscribió compromisos denominados “Contribuciones Nacionalmente Determinadas” (NDC, por sus siglas en inglés).

En la **Figura 2** se observan las medidas de mitigación de GEI, correspondientes a cinco sectores de emisiones definidos por el IPCC, distribuidas entre los sectores de la siguiente forma: Energía-combustión estacionaria, 23 medidas (37%); energía-combustión móvil, 14 medidas (23%); procesos industriales y uso de productos, 2 medidas (3%); agricultura, 6 medidas (10%); USCUS, 8 medidas (13%); y desechos, 9 medidas (14%).

Figura 2: Medidas de mitigación de GEI, correspondientes a cinco sectores de emisiones definidos por el IPCC.



Fuente: MINAM, 2018

El Perú se suma a este acuerdo frente al cambio climático proponiendo medidas de adaptación y mitigación expresadas en las NDC. Según el Ministerio del Medio Ambiente (MINAM) se ha involucrado a todos los sectores y actores de la sociedad en torno a los objetivos comunes para la sostenibilidad del país (2018). El mismo que fue ratificado por el Perú el 22 de julio de 2016 y que entró en vigencia el 4 de noviembre del mismo año y se tiene como objetivo alcanzar la meta de reducción de emisiones de un 20% para el año 2030, más un 10% adicional que está condicionado a la cooperación internacional. En total se definieron 62 medidas de mitigación de GEI para los cinco sectores de emisiones, definidos por el

IPCC: 1) Energía (Combustión estacionaria y Combustión móvil); 2) Procesos industriales y uso de productos; 3) Agricultura; 4) Uso de suelo, Cambio de uso de suelo y silvicultura; y 5) Desechos. Pulgar-Vidal (2016) menciona que la categorización de las medidas de mitigación es una estrategia para el monitoreo de las emisiones y reducciones GEI con miras a alcanzar las metas de las NDC.

Para el presente caso de estudio, nuestro campo de interés está enfocado en residuos sólidos o desechos. Se sabe que el 9.4% de las reducciones de emisiones propuestas se han considerado que provengan del sector desechos; a continuación, en la **Tabla 2** se muestran las iniciativas de reducción para el sector desechos, para la parte de residuos sólidos:

Tabla 2: Opciones de mitigación consideradas para el sector desechos.

| Sector | Nombre de iniciativa | Mitigación en MtCO ₂ eq en el año 2030 |
|----------|--|---|
| Desechos | Captura y quema de metano en rellenos sanitarios | 1.506 |
| Desechos | Captura y quema de metano en otros rellenos sanitarios | 0.289 |
| Desechos | Tecnología semiaeróbica en rellenos sanitarios | 0.442 |
| Desechos | Compostaje en rellenos sanitarios | 0.217 |
| Desechos | Reciclaje en rellenos sanitarios | 0.021 |
| Desechos | Construcción de rellenos sanitarios con captura y quema de metano y generación eléctrica | 1.347 |

Fuente: Adaptación del anexo 1 de La Contribución Nacional del Perú - iNDC: Agenda para un desarrollo climáticamente responsable (MINAM, 2016).

Nota: MtCO₂eq= Millones de Toneladas de CO₂ equivalente.

2.2.2. Residuos sólidos

2.2.2.1. Situación global de los residuos sólidos

A lo largo de diversas civilizaciones la generación de residuos y su disposición final ha sido una problemática constante. Soliz Torres & Acosta (2017) refieren que la interacción de la naturaleza con el metabolismo social se ha desarrollado en tres grandes grupos como: el modo primario de cazadores recolectores, el modo secundario

campesino y el metabolismo propio de las ciudades industriales; siendo así que el conflicto ambiental actual proviene de la cantidad (si sobrepasa la capacidad de reciclaje) y la calidad (si son asimilables o no por la naturaleza) de los residuos. Donde los mecanismos, el tipo de recursos apropiados, las características de los procesos de transformación y los patrones de consumo determinan el tipo de sociedad y por ello la calidad y cantidad de residuos. De esta forma, los residuos generados superan la capacidad de la tierra para reabsorberlos y su nocividad pone en riesgo el mantenimiento y regeneración de los ciclos vitales.

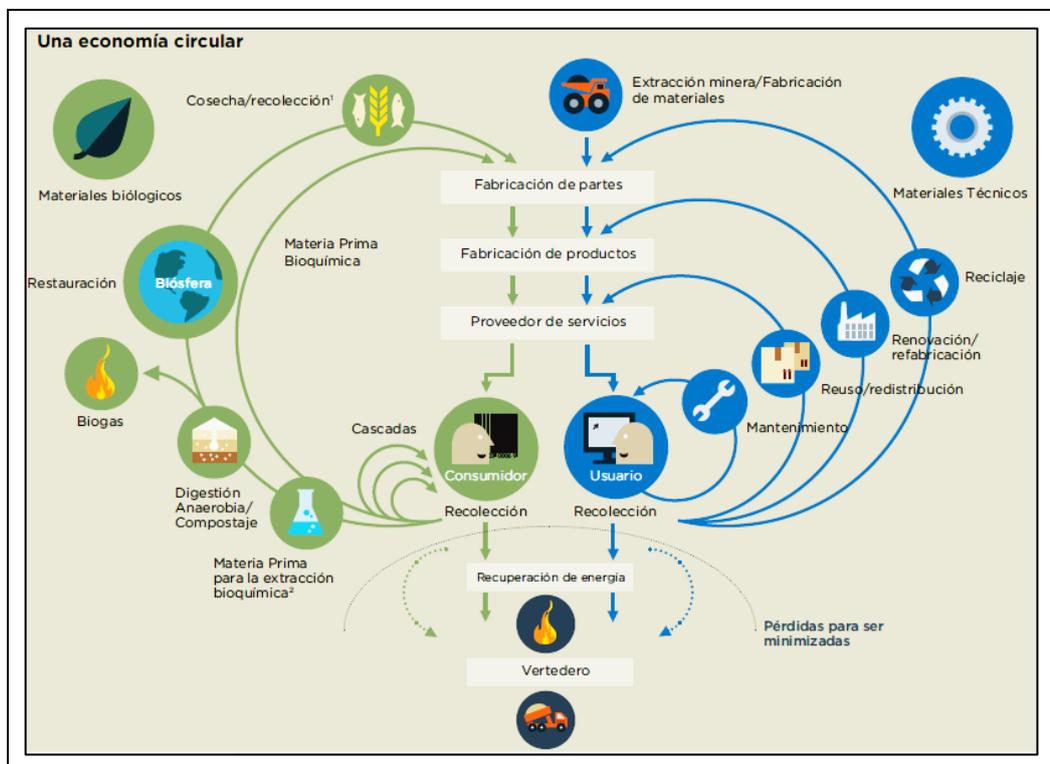
Las ciudades en el mundo generan alrededor de 1.3 mil millones de toneladas de residuos sólidos por año (1,2 kg/habitante/día); se estima que para el año 2025 el volumen crecerá a un 2.2 mil millones de toneladas (1,42 kg/habitante/día) y en 20 años las tasas de generación serán más del doble para los países en vías de desarrollo (Graziani, 2018). El incremento en la generación de residuos sólidos y los impactos ambientales que generan hace necesaria la implementación de tecnologías adecuadas para su manejo eficiente y sustentable. En este contexto en el año 1992 las Naciones Unidas estableció la Agenda 21, en los aspectos ambientales y en el capítulo 21 recomienda que los residuos sólidos se minimicen en su generación, reciclarlos, reutilizarlos, tratarlos y disponerlos adecuadamente (United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 1993).

2.2.2.2. Gestión de RS bajo el enfoque de economía circular en el mundo

Para manejar la gestión de residuos sólidos, se requiere de un cambio de paradigma, para priorizar opciones de conversión de residuos en recursos y energía, que en consideraciones económicas y sociales significaría construir un futuro donde la palabra “residuo” sea reemplazada por el término “materia prima secundaria”. Considerando la escasez de recursos naturales y el crecimiento poblacional, se necesita migrar desde el modelo de economía lineal que “extrae, produce y desecha” hacia el modelo de economía circular, donde el concepto de desecho no existe.

La **Figura 3** nos muestra el esquema del sistema de la economía circular, en la cual los desechos o residuos son reintroducidos a los procesos industriales y empleados como materia prima, lo cual permite disminuir la extracción de materia prima virgen y el consumo de recursos.

Figura 3: Esquema del sistema de la economía circular.



Fuente: Ellen MacArthur Foundation, 2013, p.30

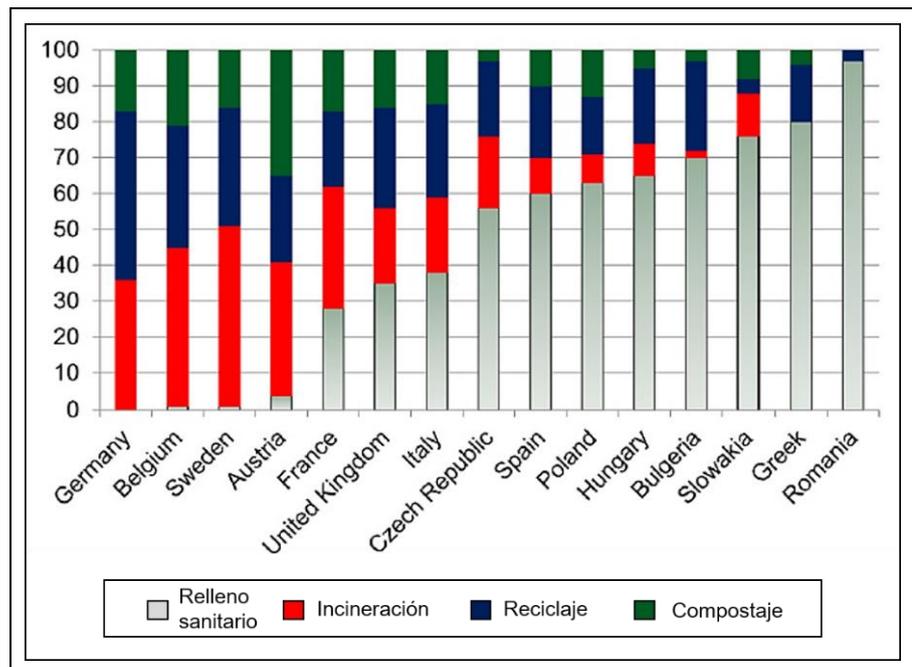
La tendencia actual tiene como objetivo el afianzamiento de la economía circular, países con economías más desarrolladas están migrando hacia ese camino, como en el caso de la Unión Europea (UE) o China; debido a que uno de los objetivos de la economía circular es impulsar el reciclaje y la disminución de aperturas de nuevos rellenos sanitarios, con el propósito de continuar aprovechando los recursos y alargar su tiempo de vida útil. Por el contrario, en países latinoamericanos, con economías emergentes como en el caso Peruano nos encontramos aún en la transición de migrar de la disposición final de residuos sólidos de botaderos hacia tratamientos de rellenos sanitarios (PELCAN, 2019).

Para la situación de los países pertenecientes a la Unión Europea la transición hacia una gestión de residuos sólidos bajo un enfoque de

economía circular no ha sido tan ardua debido a que desde los años 70's adoptaron políticas de tratamiento de residuos sólidos como el reúso, reciclaje, recuperación, entre otros; siendo una transformación radical en aquellos años. Hoy en día, por ejemplo, en países como Alemania los residuos domésticos y comerciales ya no pueden ser depositados en rellenos sanitarios sin antes haber sido tratados y existen políticas y disposiciones desde el año 1991 sobre la obligación de los productores y distribuidores de recuperación de empaques usados (vidrio, aluminio, hojalata, plástico, papel, cartón, madera, entre otros) todas ellas materias primas valiosas (secundarias) que con su reutilización o reciclaje ayudan a reducir la explotación de los recursos naturales, ahorrar energía y reducir las emisiones de GEI (Nelles et al., 2016).

La **Figura 4** ilustra que el tratamiento de los residuos sólidos en la Unión Europea en países como Alemania, Bélgica, Suecia y Austria son predominantes los tratamientos como incineración, reciclaje y compostaje; y, por el contrario, el uso del relleno sanitario como disposición final de residuos es mínimo.

Figura 4: Tratamiento de RSM en países de la UE.

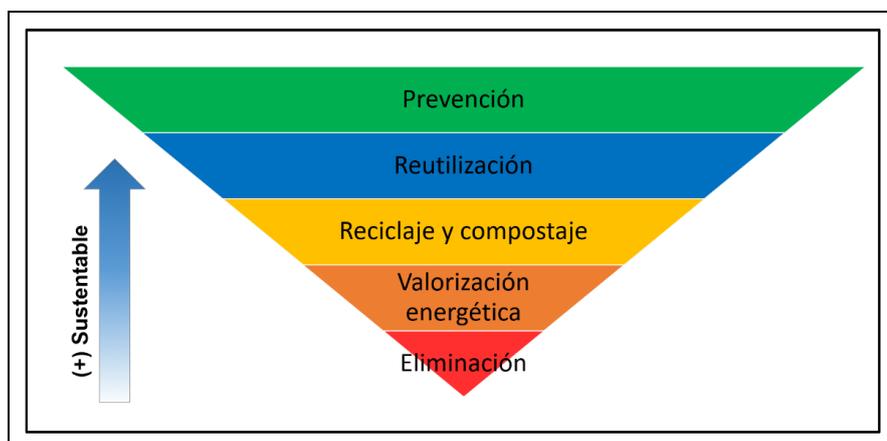


Fuente: Adaptación de la Fig. 2 de Nelles et al., 2016, p.8

En Inglaterra a inicios de la década el 2000 la asociación Hertfordshire Waste Partnership generó un plan para un condado para el fomento del tratamiento integral de residuos, de donde surgió la propuesta del índice de jerarquía de residuos para economía circular como un paso previo antes de la disposición final de los residuos; dicha propuesta fue tomada y replicada desde entonces por diversas organizaciones para plantear e implantar políticas y tratamientos de residuos bajo un enfoque de economía circular (Suazo Páez, 2017).

La **Figura 5** expone el índice de jerarquía de residuos, con acciones claras para hacer más sustentable la gestión de residuos sólidos, la estrategia consiste en que la gestión de residuos sólidos debe iniciar por la prevención de la generación de residuos sólidos (en la fuente, a través de campañas de educación y sensibilización ambiental), seguida por la reutilización, reciclaje y compostaje, valorización energética y finalmente la eliminación.

Figura 5: Índice de jerarquía de residuos Hertfordshire Waste Partnership



Fuente: Adaptación de la Fig. 3 de Suazo Páez, 2017, p.19

Las acciones de la estrategia jerarquizada de la gestión de residuos y la definición de cada uno de las cinco acciones se puede apreciar en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Acciones de la estrategia jerarquizada de residuos

| Concepto | Definición |
|----------------------|---|
| Prevenición | Generar campañas educativas para evitar el consumo y generación excesiva de residuos, como medida preventiva antes de pasar a las demás medidas de tratamiento de residuos. |
| Reutilización | Usar un material previamente usado como insumo en el mismo proceso productivo que lo originó. |

| | |
|--------------------------------|--|
| Reciclaje y compostaje | Proceso de valorización de residuos para la elaboración de un nuevo producto mediante un ciclo nuevo de producción. En el caso de los residuos orgánicos, se pueden emplear en compostaje, generando fertilizantes por procesos de descomposición aerobia. |
| Valorización energética | Valorización del residuo para funcionar como combustible bajo distintos tipos de procesamiento. |
| Eliminación | Disposición de residuos en lugares que cuenten con la autorización legal y sanitaria vigente para su disposición y descomposición en un relleno sanitario. |

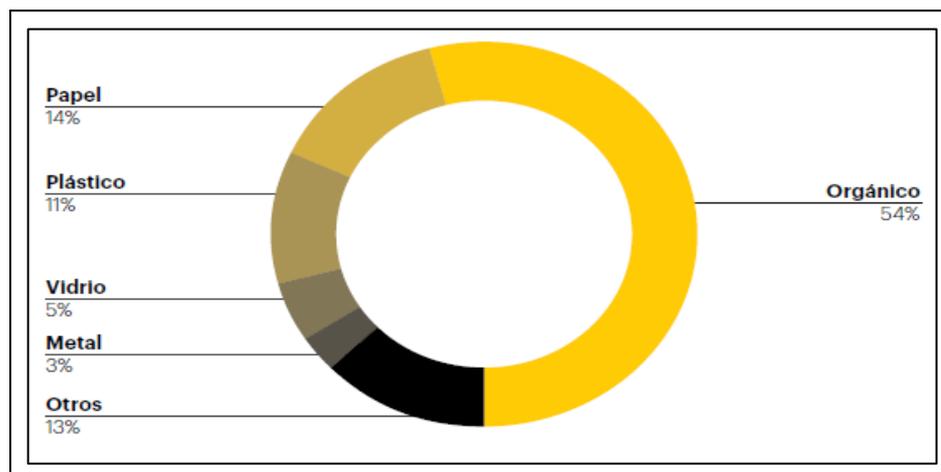
Fuente: Adaptación de Hertfordshire Waste Partnership, como se citó en la Tabla 2 de Suazo Páez, 2017, p.19

2.2.2.3. Composición de los residuos sólidos en América Latina y el Caribe

Para la situación de América Latina y el Caribe la generación de RSM corresponde casi al 12% de la generación global (160 millones de toneladas), donde la tasa total de generación y per cápita de residuos han visto incrementados debido al crecimiento urbano, al aumento del consumo y cambios en el estilo de vida de los ciudadanos.

La **Figura 6** muestra que en la región de América Latina y el Caribe la composición promedio de los residuos municipales tiene un porcentaje mayor en cuanto a los residuos orgánicos (54%), papel (16%) y plástico (12%) (Grau et al., 2015). Si embargo, también influirá el clima, la ubicación geográfica y el nivel socioeconómico en la generación de residuos. La precipitación y la humedad también influirá en la composición y características de los residuos.

Figura 6: Composición de los residuos en América Latina y el Caribe



Fuente: Según (Grau et al., 2015), (como se citó en Graziani, 2018, p.14)

Como contraste, los países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la generación de residuos sólidos presenta cifras diferentes, ya que además de tener la mayor generación per cápita, su generación de residuos sólidos orgánicos es más pequeña y con altos porcentajes de residuos reciclables. Una de las principales razones es debido a los patrones de consumo de la población perteneciente a la OCDE, ya que sus ciudadanos compran alimentos preenvasados y productos procesados generando una mayor cantidad de materiales reciclables provenientes de empaques y embalaje; mientras que los ciudadanos de países en vías de desarrollo como en América Latina tienden a comprar alimentos frescos y con bajas tasas de procesamiento (Mohee et al., 2015). Se sabe que el metano, generado a partir de la descomposición de materia orgánica, justamente proveniente de los residuos orgánicos; el cual es el mayor contribuyente de GEI. Los esfuerzos para formalizar la gestión de residuos e implantando la tecnología adecuada pueden reducir significativamente las emisiones de GEI. Por ejemplo, un estudio de Zero Waste Europe concluyó que la Unión Europea podría eliminar hasta 200 millones de toneladas de emisiones de GEI por año para 2030 con mejores prácticas de gestión tan solo proveniente de los residuos sólidos orgánicos. Las alternativas de tratamiento de residuos orgánicos son el compostaje y la digestión anaerobia, adicionalmente el gas metano puede capturarse y quemarse, convertirse en energía; otra propuesta es la incineración de conversión de residuos en energía, que son relativamente más complejos y costosos; sin embargo, la gran ventaja es que reduce las emisiones de GEI al mismo tiempo que generan electricidad o energía térmica. Un estudio del Banco Mundial en Indonesia muestra que incluso las mejoras básicas, como el aumento de las tasas de recolección de residuos del 65 % al 85 % y la introducción de vertederos controlados para la eliminación de desechos, reducen las emisiones de GEI en un 21% (Kaza et al., 2018).

La generación de RSM en Latinoamérica es distinta al caso europeo; debido a que el mayor porcentaje de generación corresponde a los residuos orgánicos; como se comentó anteriormente esto podría darse debido a los patrones socioeconómicos de los ciudadanos y los patrones de consumo, también debido a que los residuos reciclables

son recuperados en su mayoría por recicladores informales (Sáez & Urdaneta, 2014). Es por ello muy importante que para el caso de los residuos sólidos se considere la clasificación y composición física y química, las cuales resultan ser necesarias para el análisis y diseño de las instalaciones de tratamiento y disposición final, en la evaluación de la factibilidad de la recuperación de recursos y energía, así como en la selección y operación de equipos e instalaciones. Es por ello que, con la finalidad de gestionar un manejo eficiente de residuos sólidos bajo un enfoque de economía circular, conocer la cantidad generada y la composición de residuos sólidos de una región permitirá diseñar sistemas de recolección eficientes.

En muchos países de la región prevalecen el manejo de residuos sólidos mediante la recolección y disposición final, sin considerar aún la clasificación o separación en la fuente, el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos y se preserva el uso de botaderos o vertederos a cielo abierto. Adicionalmente a esta problemática no se cuenta con la infraestructura para el tratamiento de residuos orgánicos, lo cual intensifica la generación de lixiviados y GEI. Los impactos ambientales generados solo por la generación de residuos sólidos se van incrementando, generando consecuencias ambientales como degradación y pérdida de suelos, contaminación de cuerpos de agua y el incremento de emisiones de GEI, lo que contribuye al cambio climático y es por esta razón que la lucha frente al cambio climático necesita de acciones urgentes. Una propuesta ya implementada en muchos países es la economía circular, la cual presenta alternativas para producir y consumir, bajo la consideración de que en la naturaleza nada se desperdicia o pierde, todo se transforma.

Respecto a la generación de RSM en se observa que, el mayor porcentaje de generación corresponde a los residuos orgánicos; en contraste con la generación de residuos reciclables como papel, cartón, plástico, metales y vidrio, donde el porcentaje de generación es relativamente bajo; tal como se puede observar en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Composición de RSM de algunos países de Latinoamérica y el Caribe

| País/ Ciudad | Composición de RSM (%) | | | | | | |
|-----------------|------------------------|------------------|-----------|---------|--------|----------|-------------------|
| | Orgánicos | Papel/ Cartón | Plásticos | Metales | Vidrio | Textiles | Otros/ Inertes |
| Belice | 60 | 5 | 5 | 5 | 5 | - | 20 |
| Costa Rica | 49.8 | 20.7 | 17.7 | 2.1 | 2.3 | 4.1 | 3.3 |
| Perú | 54.5 | 7.5 | 4.3 | 2.3 | 3.4 | 1.5 | 25.9 |
| Caracas | 41.3 | 22.3 | 11.7 | 2.9 | 4.5 | 4.1 | 11.2 |
| Asunción | 19.9 | 10.2 | 4.2 | 1.3 | 3.5 | 1.2 | 19.9 |
| Ecuador | 71.4 | 9.6 | 4.5 | 0.7 | 3.7 | - | - |
| Guatemala | 63.3 | 13.9 | 8.1 | 1.8 | 3.2 | 0.9 | 8.8 |
| México | 44 | 20.9 | 8.4 | 3.1 | 7.6 | 4.5 | 11.5 |

Fuente: Adaptación de Sáez & Urdaneta, 2014

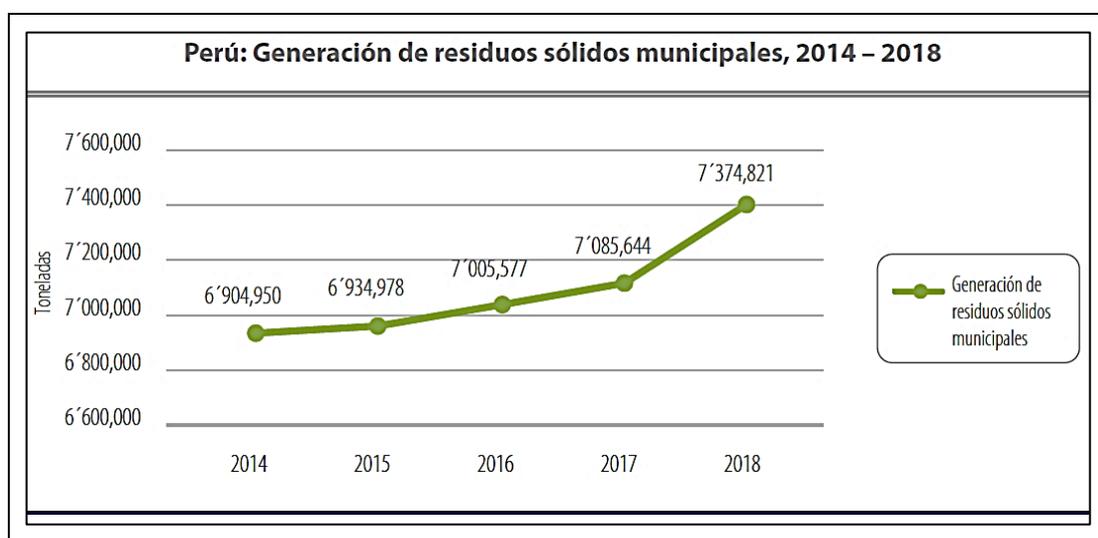
2.2.2.4. Contexto peruano en el sector de residuos sólidos

El continuo crecimiento demográfico y urbanístico en nuestro país, se ve reflejado también en el incremento de la generación de residuos. Ya en el año 2014 solo en Lima se generó más de 7400 toneladas de RSM, considerando que es la ciudad más poblada del país; según el OEFA dentro de 20 años la generación de RSM será el doble. Es por ello que este incremento en la generación de residuos crea mayores demandas de equipamiento e infraestructura. Según el INEI (Orihuela, 2018) en el año 2014 en el Perú se generó casi 7 millones de toneladas de RSM, siendo un 64% residuos domiciliarios y 26% residuos no domiciliarios. De acuerdo a la Defensoría del Pueblo - Perú (2019), las regiones que registraron un incremento en la generación de residuos fueron: Madre de Dios (33%), Ayacucho (20%), Apurímac (17%), Junín (15%), Lambayeque (13%), Piura (12%), Tumbes (11%), Lima y Ancash (10%), Moquegua y la Libertad (9%). Según las cifras mostradas, se evidencia el gran reto que enfrenta el estado peruano, el Ministerio del Ambiente y demás entidades sectoriales competentes como gobiernos locales, para adoptar las medidas para reducir los RSM bajo el enfoque de la economía circular en relación a lo establecido en la Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos, (Ley N° 27314 y D.L. N° 1278) y su aprovechamiento como materia prima.

Cuando las municipalidades no cumplen con brindar un servicio adecuado de limpieza pública, recolección y disposición final, trae como consecuencia la generación de puntos críticos denominados botaderos; los cuales son focos infecciosos, en que los efluentes de los lixiviados y las emisiones de GEI generan graves impactos en el ambiente.

La **Figura 7** ilustra que en los periodos comprendidos entre los años 2014 – 2018, se generaron un total de 35 305 971 toneladas de RSM en todo el país; mostrando un incremento del 7% al término del quinquenio, siendo equivalente a 7 061 194 toneladas de residuos al año, 19 346 toneladas al día y 806 toneladas por hora.

Figura 7: Generación de RSM años 2014 - 2018



Fuente: Defensoría del Pueblo - Perú, 2019, p. 28

En efecto en el año 2019 la Contraloría de la República reportó que el 83% de municipalidades supervisadas disponen sus residuos en botaderos y solo el 17% dispone los residuos en un relleno sanitario (Defensoría del Pueblo - Perú, 2019). Este problema, no solo impacta a nivel local o nacional; sino que también repercute a nivel internacional; es por eso que según el “Atlas de los residuos: Los 50 vertederos más grandes del mundo” (Waste Atlas: The world's 50 biggest dumpsites), refiere que dentro de los 50 botaderos más grandes del mundo en el Perú se encuentran 5 de ellos, los cuales son: Reque en Chiclayo con 235 ha, El Milagro en Trujillo con 58 ha, Jaquira en el Cusco con 10.5 ha, quebrada Honda en Arequipa con 10 ha y Cancharani en Puno con 4.5 ha. Para abordar esta problemática, en el año 2016 se necesitaban aproximadamente 190 infraestructuras, pero en ese año tan solo se contaba con 21 instalaciones de esa categoría. Ya para el año 2017 se contaba con 28 rellenos sanitarios y en el año 2020 se cuenta con 56 rellenos sanitarios y 6 rellenos de seguridad (MINAM, 2020). En la **Figura 8** se observan los rellenos sanitarios ubicados en el territorio nacional y la disposición final de residuos se observa que más del 80%

de municipalidades que recolectan los residuos sólidos en su jurisdicción (1484 de 1836), disponen todo o parte en botaderos, pese a que esta práctica se encuentra prohibida desde el año 2004. Según el INEI (2018) la región Áncash cuenta con el mayor número de municipalidades (118 municipios) que disponen sus residuos en botaderos, seguido por Puno (104), Cajamarca (102), Cusco (97) y Lima (93).

Como una opción tradicional para solucionar esta problemática se suele emplear infraestructuras como los rellenos sanitarios; los cuales son infraestructuras adecuadas para disposición final de residuos sólidos y según (OEFA, 2014): “Es la instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos de gestión municipal en la superficie o bajo tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental” (p.32). Como se vio anteriormente existen opciones más sustentables para el tratamiento de los residuos sólidos; entre estos se tienen: tecnologías que eliminan emisiones: quema de biogás, aprovechamiento de biogás (generación de electricidad con generadores de combustión interna, micro turbinas, turbinas, etc.) y tecnologías que evitan emisiones: compostaje, reciclaje, rellenos sanitarios aeróbicos, etc. (Dávila, 2017). En la actualidad el único relleno sanitario en el país que genera energía es el relleno sanitario de Huaycoloro; cuenta con una potencia instalada de 4.8 MW (Petramás, s. f.), esta opción para el tratamiento de residuos reduce las emisiones de GEI del relleno sanitario e inclusive podría contribuir a evitarlas (Manfredi et al., 2009). Para la situación de las demás infraestructuras de tratamiento final, solo 8 cuentan con quema de biogás y los demás rellenos sanitarios vierten gases de GEI directamente al ambiente (MINAM & NEFCO, 2013).

En la **Tabla 5** se observa de forma alarmante que entre el 65% y 70% de residuos son enviados a botaderos y que tan solo el 20% de los residuos tiene como destino final los rellenos sanitarios, el 5% son reciclados y el 0.5% son compostados (D-Waste, 2014).

Tabla 5: Disposición final de RSM por regiones

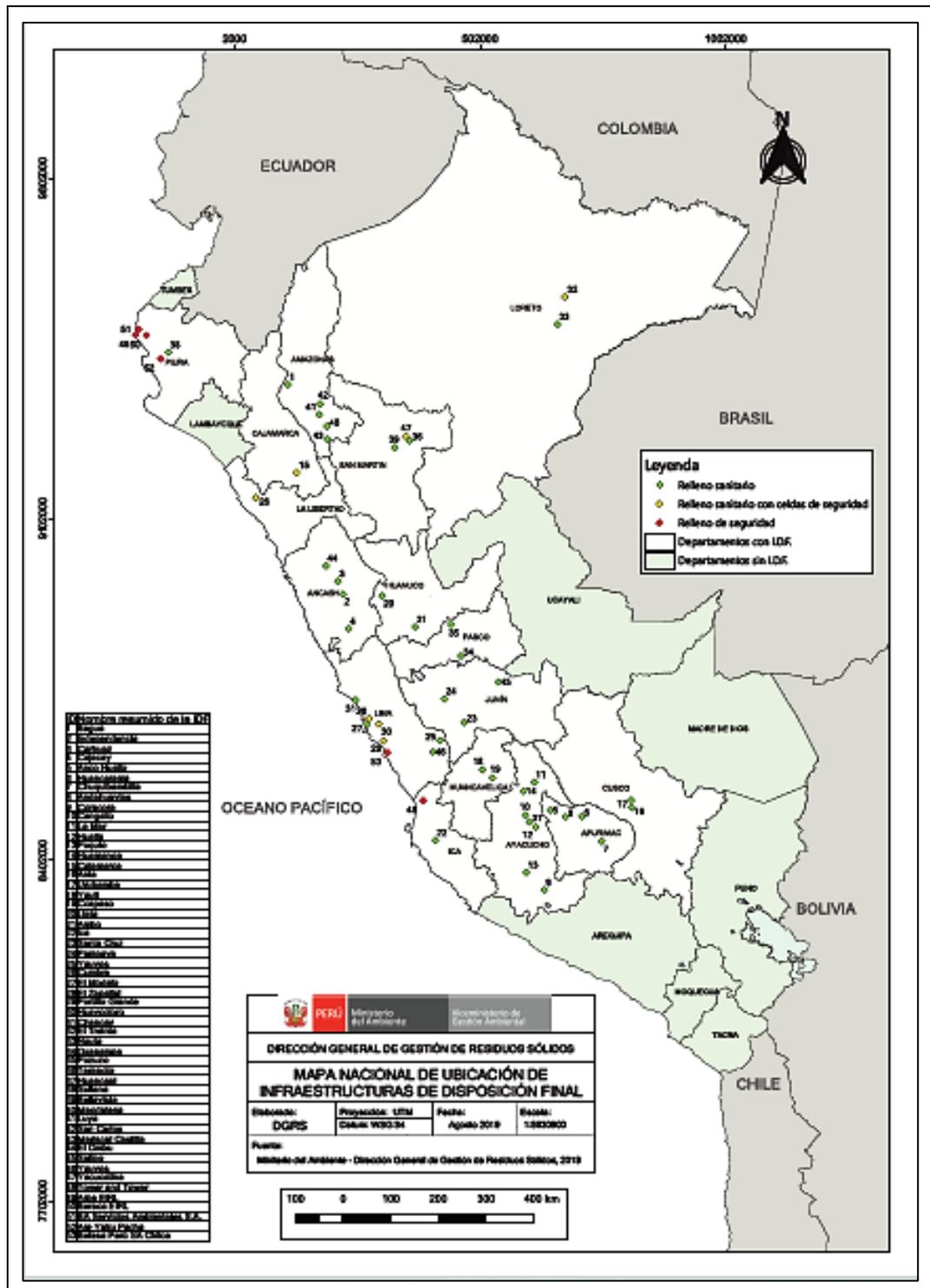
| Categoría | Disposición final de RS por regiones (%) | | | | | | | | | |
|---------------|--|----------|------------|----------|------------|-------------------|----------|------------|----------|------------|
| | Distrital | | | | | Provincial | | | | |
| Región | Relleno Sanitario | Botadero | Reciclados | Quemados | Compostaje | Relleno Sanitario | Botadero | Reciclados | Quemados | Compostaje |
| Amazonas | 18,10 | 62,10 | 4,00 | 4,10 | 0,00 | 14,30 | 74,00 | 5,00 | 0,30 | 6,40 |
| Áncash | 22,10 | 60,50 | 9,00 | 6,00 | 0,40 | 18,00 | 62,00 | 17,50 | 2,50 | 0,00 |
| Apurímac | 16,80 | 66,10 | 5,90 | 8,30 | 0,10 | 10,00 | 77,10 | 11,00 | 0,40 | 1,40 |
| Arequipa | 22,50 | 64,80 | 4,10 | 5,60 | 0,00 | 12,50 | 75,00 | 6,30 | 6,30 | 0,00 |
| Ayacucho | 29,50 | 60,40 | 3,50 | 3,50 | 0,30 | 26,60 | 65,50 | 6,10 | 1,80 | 0,00 |
| Cajamarca | 26,60 | 61,40 | 4,30 | 3,80 | 1,20 | 22,60 | 71,50 | 5,50 | 0,40 | 0,00 |
| Callao | 96,70 | 0,00 | 3,30 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cusco | 14,50 | 76,70 | 5,70 | 1,30 | 0,70 | 27,30 | 65,10 | 5,70 | 1,20 | 0,80 |
| Huancavelica | 25,90 | 60,80 | 7,40 | 5,70 | 0,20 | 11,40 | 69,70 | 17,90 | 1,00 | 0,00 |
| Huánuco | 25,20 | 63,60 | 4,10 | 7,20 | 0,00 | 39,10 | 50,00 | 8,60 | 0,00 | 2,30 |
| Ica | 3,40 | 79,20 | 9,50 | 5,30 | 0,00 | 20,00 | 77,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 |
| Junín | 35,40 | 41,40 | 9,60 | 8,00 | 2,10 | 40,30 | 51,30 | 7,00 | 1,30 | 0,00 |
| La Libertad | 14,60 | 78,10 | 4,00 | 2,90 | 0,40 | 0,00 | 92,00 | 5,70 | 2,30 | 0,00 |
| Lambayeque | 3,10 | 91,40 | 3,80 | 1,70 | 0,00 | 0,00 | 92,70 | 6,70 | 0,70 | 0,00 |
| Lima | 41,90 | 44,70 | 5,80 | 5,50 | 0,20 | 19,00 | 77,00 | 3,70 | 0,30 | 0,00 |
| Loreto | 16,30 | 67,10 | 2,10 | 7,80 | 0,00 | 22,90 | 69,00 | 2,50 | 0,00 | 5,60 |
| Madre de Dios | 0,00 | 97,50 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 0,00 | 99,30 | 0,70 | 0,00 | 0,00 |
| Moquegua | 4,70 | 83,50 | 5,60 | 6,20 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Pasco | 23,80 | 61,40 | 14,30 | 0,40 | 0,00 | 28,30 | 66,70 | 0,00 | 5,00 | 0,00 |
| Piura | 15,80 | 70,50 | 7,60 | 5,50 | 0,70 | 14,90 | 70,60 | 13,10 | 0,00 | 1,40 |
| Puno | 18,90 | 60,10 | 4,50 | 15,50 | 0,00 | 23,80 | 65,20 | 10,20 | 0,80 | 0,00 |
| San Martín | 11,40 | 75,30 | 6,90 | 1,10 | 2,40 | 0,00 | 88,90 | 10,80 | 0,30 | 0,00 |
| Tacna | 18,50 | 60,00 | 0,40 | 21,10 | 0,00 | 0,00 | 99,80 | 0,30 | 0,00 | 0,00 |
| Tumbes | 1,50 | 96,80 | 1,50 | 0,20 | 0,00 | 0,00 | 80,00 | 13,30 | 6,70 | 0,00 |
| Ucayali | 0,00 | 97,30 | 2,70 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 98,80 | 1,30 | 0,00 | 0,00 |
| Total | 22,80 | 63,00 | 5,80 | 5,70 | 0,50 | 18,00 | 72,00 | 8,00 | 1,30 | 0,70 |

Fuente: Adaptación de Orihuela, 2018, p. 54



La **Figura 8** nos muestra la ubicación de infraestructuras de disposición final de RSM ubicadas a nivel nacional.

Figura 8: Mapa de rellenos sanitarios a nivel nacional



Fuente: Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (MINAM, 2019)

2.2.3. Marco normativo nacional en el sector de residuos sólidos en el Perú

Para el adecuado manejo de residuos sólidos en nuestro país existe un marco normativo y legal que debe ser cumplido para realizar su adecuada gestión a lo largo de todo su proceso.

En la **Tabla 6**, se observa un resumen del marco normativo relacionado al sector residuos sólidos, de acuerdo a la interpretación del tesista.

Tabla 6: Marco normativo en el sector de residuos sólidos

| Norma Oficial Peruana | Descripción |
|--|--|
| Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N° 28245-2004) | Establece que debe asegurarse el cumplimiento de los objetivos ambientales de organizaciones públicas; fortalecer los mecanismos sectoriales de la gestión ambiental. |
| Ley que regula el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (Ley N° 28256-2004) | Tiene el objetivo de regular las actividades, procesos y operaciones del transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos, con la finalidad de prevenir y proteger el medio ambiente, las personas y la propiedad. |
| Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos (D.S. N° 057-2004-PCM) | Tiene como propósito establecer la gestión y manejo adecuado de los residuos sólidos, con la finalidad de prevenir riesgos de carácter sanitario, promover y preservar la calidad ambiental, salud y bienestar de la persona. En el Art. 8 de la norma, las municipalidades provinciales y distritales, son responsables de la gestión y manejo de los residuos domiciliarios, comercial y similares. |
| Ley General del Ambiente (Ley N° 28611-2005) | Tiene como finalidad establecer principios y normas básicas para asegurar un ambiente sano, equilibrado y adecuado de la vida; también velar por el cumplimiento de una efectiva gestión ambiental y protección al ambiente, con el propósito de mejorar la calidad de vida y velar por el desarrollo sustentable. En el Art. 67 de la norma asigna la responsabilidad a las autoridades nacionales, regionales, y locales priorizar y garantizar las medidas necesarias para una adecuada gestión y manejo de los residuos sólidos. En el Art. 119 indica que los residuos de origen doméstico, comercial o con características similares están bajo la responsabilidad de los gobiernos locales. |
| Reglamento de la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (D.S. N° 008-2005-PCM) | Reglamenta el funcionamiento del Sistema Nacional de Gestión Ambiental – SNGA, el cual se constituye sobre la base de las instituciones públicas, organismos públicos descentralizados, todos ellos a nivel nacional, regional y local. |
| Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (D.S. N° 021-2008-MTC) | Tiene como finalidad establecer lineamientos para regular todas las actividades del transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos y establece las contingencias para situaciones de contingencia, para prevenir y minimizar riesgos, daños al ambiente, las personas o a la propiedad. |

| | |
|---|--|
| <p>Modificatoria de la Ley de Residuos Sólidos (D. L. N° 1065-2008)</p> | <p>La modificatoria impulsa el desarrollo de infraestructura para la disposición final de residuos sólidos. Así también se indican derechos, obligaciones y competencias para sancionar, por parte de la sociedad civil y se consideran mecanismos de participación ciudadana.</p> |
| <p>Ley que modifica diversos artículos del Código Penal y de la Ley General del Ambiente (Ley N° 29263-2008)</p> | <p>Establece la sanción con penas más estrictas los delitos ambientales, como por ejemplo en el Art. 306, a las prácticas donde sin autorización o aprobación de la autoridad competente vierte residuos de forma ilegal afectando la calidad del ambiente la salud humana. En el Art. 307 menciona que se dará pena privativa de libertad el tráfico ilegal de residuos peligrosos.</p> |
| <p>Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (D. S. N° 001-2012-MINAM)</p> | <p>Tiene como objetivo establecer derechos y obligaciones para una gestión y manejo idóneo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en todas sus etapas, con la finalidad de prevenir, controlar, mitigar y evitar daños al ambiente y a la salud humana.</p> |
| <p>Nueva Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos Ley N° 1278 Decreto Supremo N° 0142017 MINAM que aprueba el reglamento del Decreto Legislativo N° 1278</p> | <p>La nueva Ley plantea la prevención y minimización de los residuos en el lugar de origen, por lo cual según la norma la disposición final de los residuos sólidos en la infraestructura será la última alternativa de manejo. También se sabe que la legislación plantea la gestión integral de residuos sólidos en base a tres ejes: Los residuos como materia prima, la industrialización del reciclaje y el involucramiento de actores. Por otro lado, la norma establece tres pilares fundamentales: Reducir los residuos como primera prioridad, eficiencia en el uso de materiales y finalmente los residuos vistos como recursos y no como amenaza.</p> |
| <p>Ley Marco sobre Cambio Climático N° 30754</p> | <p>La ley propone incorporar el cambio climático dentro de la planificación del gobierno nacional, regional y local. Adicionalmente se propone una comisión de alto nivel que plantea medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático. Así también se designa al Ministerio del Ambiente como Autoridad Nacional como ente gestor frente al cambio climático.</p> |

2.2.4. La huella ecológica

Desde el origen de la idea de “desarrollo sostenible” propuesta por la comisión Brundtland y su reporte Nuestro Futuro Común en 1987 plantearon dos desafíos: el sobreconsumo por un lado y del otro lado la extrema pobreza; y es así que el desarrollo sostenible surge como una alternativa de solución propuesta para abordar ambas problemáticas. Para evaluar cuánto puede soportar el medio ambiente respecto al consumo de sus recursos por determinada población surgió una forma de poder evaluarla, a través de “la capacidad de carga”; pero esta forma de medir los impactos generados por la población es poco certera; debido a que surgen muchas interacciones sociales y junto a ellas diversas actividades como la aparición de nuevas necesidades que luego generarán consumo,

extracción y transformación de recursos, así como las diversas dinámicas de intercambio de materia y energía, así como el acceso a los recursos en un mundo globalizado donde la obtención de estos provienen de diversas partes del mundo que no solo se obtienen de forma local; debido a ello no podemos estudiar los impactos generados en un área determinada solo localmente, ya que ninguna región y la población subsisten de forma aislada. Es por ello, que surge la huella ecológica como propuesta para analizar algunas de estas dificultades (Wackernagel & Rees, 1998). Entonces la huella ecológica de una población específica o economía puede ser definida como el área terrestre (o acuática) ecológicamente productiva en varias clases, como tierras de cultivo, pastos, bosques, etc., que pueden ser requeridos de forma continua para: a) proveer toda la energía y/o recursos materiales consumidos; y b) para absorber todas las descargas de desechos. El consumo por parte de los hogares, negocios y gobiernos se considera en los cálculos y es importante considerar que la huella ecológica está basada en los flujos de ingresos naturales, también provee una estimación basada en los requisitos del área natural de la población en cuestión.

2.2.5. La huella de carbono

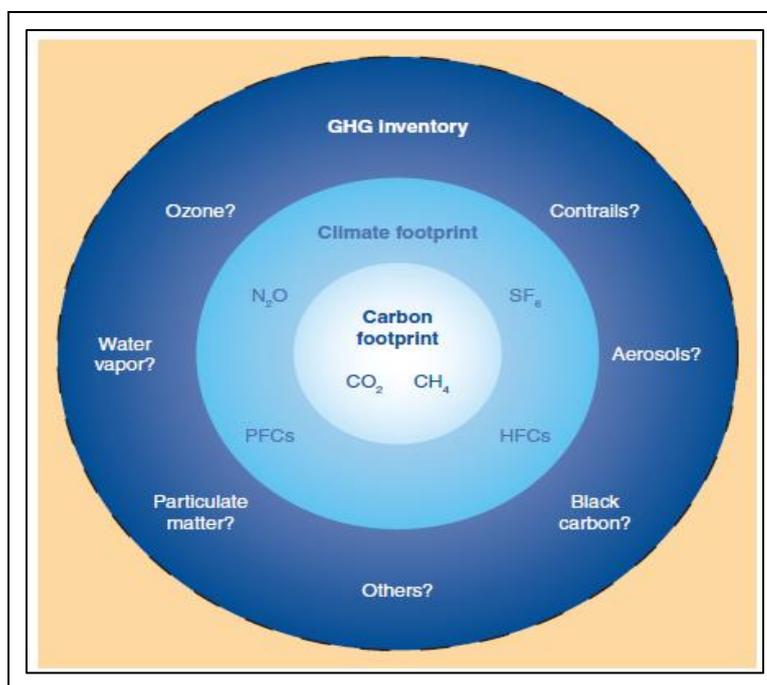
La huella de carbono es uno de los principales métodos disponibles para cuantificar los impactos antropogénicos al medio ambiente y para ayudar a abordar la amenaza del cambio climático (Williams et al., 2012). En años recientes la necesidad de hacerle frente a las emisiones de los GEI se ha vuelto más urgente a medida que nuestro entendimiento sobre los riesgos del cambio climático ha avanzado. Por esta razón mecanismos para la reducción de las emisiones de GEI se han ideado y perfeccionado y desde su implementación se ha convertido una herramienta para relacionar una actividad humana con una determinada cantidad de emisiones de GEI. El origen del término proviene del concepto anteriormente planteado sobre “la huella ecológica” y el término “huella” es empleada como medida del impacto humano hacia el medio ambiente; es por ello que a lo largo de estos últimos años se han generado muchas definiciones para la huella de carbono, de las cuales algunas incluyen solo las emisiones de CO₂, otras incluyen todos los GEI, también las emisiones directas e indirectas de GEI, mientras que otras consideran que solo el

combustible y energía usadas directamente deberían ser incluidos. Para reducir esta confusión generada en torno a todas estas definiciones sobre la huella de carbono, se propuso una definición que ayudaría en recopilar la información de manera práctica.

En ese orden de ideas, se entiende a la huella de carbono como la medida de la cantidad total de las emisiones de CO₂ y CH₄ de una determinada población, sistema o actividad, dentro de los límites espaciales y temporales; esto se realizará calculando el CO₂ equivalente empleando el potencial de calentamiento global relevante de 100 años. Cuando exista la necesidad de valorar el riesgo climático de forma más precisa se propone evaluar y cuantificar los GEI considerado en el Protocolo de Kioto; algunos autores como Wright, Kemp, et al., (2011) sugieren llamar a esta medida como “huella climática” y finalmente para todas estas situaciones que requieren la cuantificación de un conjunto aún más amplio de GEI, llegando más allá del alcance de la huella climática, un “inventario de GEI” podría ser calculado.

La Figura 9 muestra la relación entre la huella de carbono, la huella climática y el inventario de GEI, que puede aplicarse para cuantificar las emisiones de GEI de una población, sistema o actividad.

Figura 9: La relación entre los tres enfoques, la huella de carbono, la huella climática y el inventario de GEI.



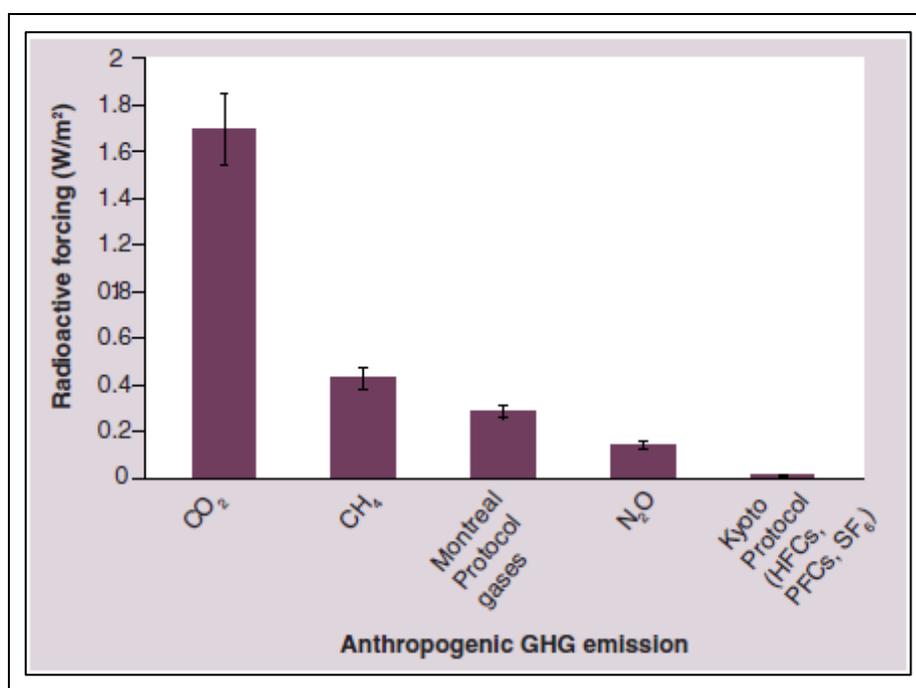
Fuente: Williams et al., 2012, p.57

Por lo tanto, nos encontramos ante una definición que parte del análisis de aspectos generales de lo que es la huella de carbono para identificar valores más precisos que pueden servirnos como indicadores de medida del impacto que desarrolla una sociedad en relación al consumo de energía o a la emisión de desperdicios.

Considerando el contexto de todos los GEIs, se estima que el forzamiento radiativo antropogénico global (RF) o forzamiento climático, que es la diferencia entre la insolación absorbida por el planeta y la energía irradiada de regreso al espacio, es de $+1.6 \text{ W m}^{-2}$. Es por eso que, bajo este esquema, la cuantificación de CO_2 es clave en el desarrollo de una definición pragmática y utilizable de la huella de carbono. Para su uso práctico, la huella de carbono podría ser un indicador de la contribución antropogénica al cambio climático de un proceso, producto o área terrestre; y también es considerado como una herramienta que nos ayudará a tomar decisiones.

La **Figura 10** muestra la RF global, causada por las emisiones antropogénicas de GEI, donde el CO_2 es el GEI más importante, con una RF estimada de $+1.66 \text{ W/m}_2$, seguido de CH_4 con 0.48 W/m_2 , con los GEI antropogénicos restantes que contribuyen con 0.497 W/m_2 .

Figura 10: Forzamiento radiativo (RF) positivo del clima entre 1750 y 2005 debido a las emisiones antropogénicas de GEI.

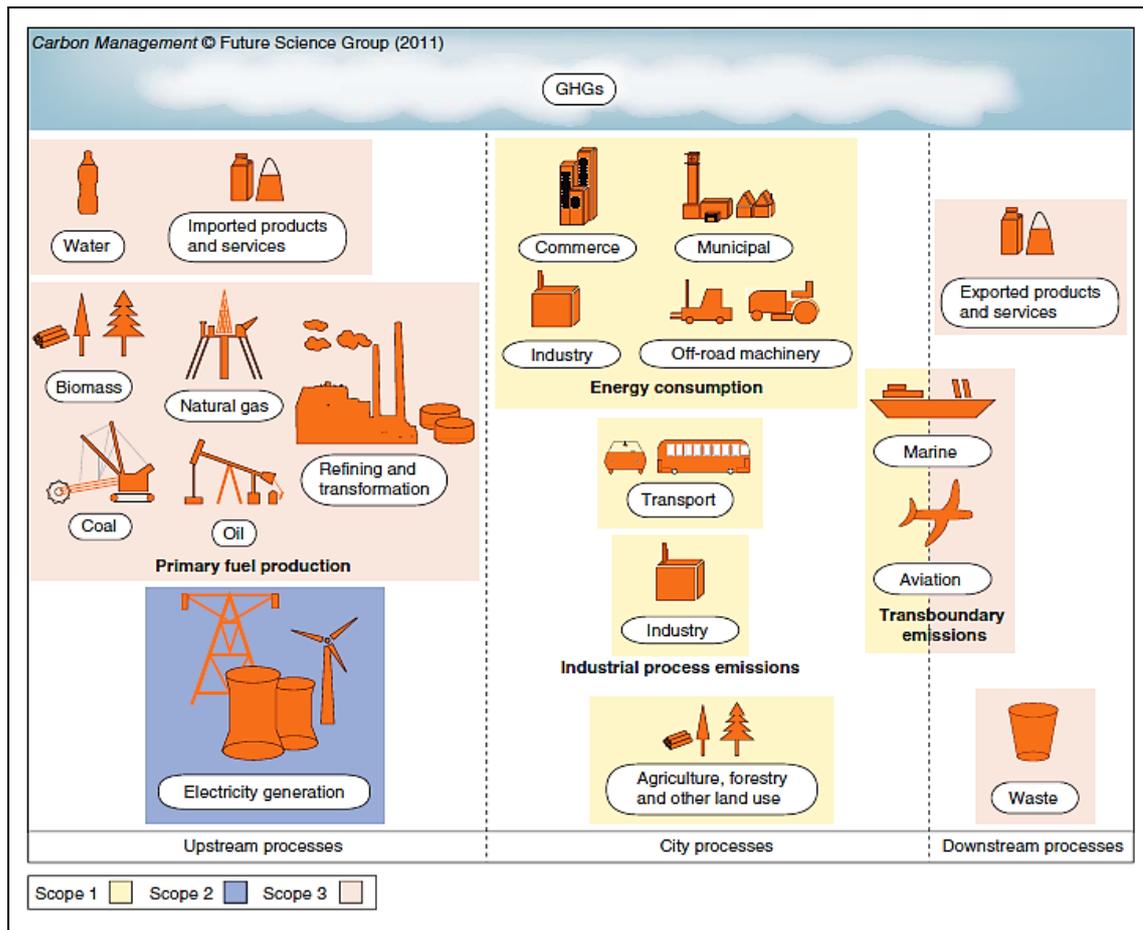


Fuente: Wright, Kemp, et al., 2011, p.65

Entonces a partir de estos enfoques se sabe que el calentamiento global y las reducciones de las emisiones de carbono constituyen una de las principales prioridades de la agenda de política ambiental de hoy. Considerando también que las ciudades generan emisiones de GEI, como resultado de actividades y procesos, dentro y fuera de sus límites geográficos; según algunos autores (Wright, Coello, et al., 2011), el Instituto de Recursos Mundiales (WRI por las siglas en inglés de World Resources Institute), diferencia las fuentes de emisión en términos de “alcances” los cuales son 3 y se relacionan con el límite espacial de la actividad o proceso. El alcance 1, está definido como emisiones directas dentro del límite geográfico o administrativo; por ejemplo, emisiones de combustión directa provenientes de combustibles para calefacción doméstica o emisiones de procesos industriales. El alcance 2 considera emisiones de generación de electricidad a nivel de red, distribuidas a los usuarios finales a nivel de la ciudad. El alcance 3 considera otras fuentes de emisiones no eléctricas indirectas fuera de los límites; por ejemplo, emisiones asociadas con cadenas de producción de energía, o importaciones y exportaciones. Las fuentes de emisiones pueden clasificarse adicionalmente bajo la perspectiva del concepto de “ciclo de vida”, ya sea de la proveniente de la cadena de producción o emisiones de procesos individuales. Las emisiones “upstream” son los ingresos o inputs que provienen del resultado de servicios, energía y productos suministrados a una ciudad. Las emisiones “downstream” surgen como resultado de salidas u outputs provenientes de los procesos dentro de los límites, incluyendo residuos y productos de exportación y servicios. Algunos procesos transfronterizos, por ejemplo, transporte interoceánico o la aviación, son complicados de categorizar.

En la **Figura 11** podemos observar estos conceptos, aunque en términos de los límites más amplios del proceso; en relación con el alcance (una forma de diferenciar las fuentes de emisiones empleadas por el World Resource Institute) y la perspectiva del ciclo de vida, desde el enfoque del límite más amplio del proceso.

Figura 11: Fuentes de emisiones en las ciudades.



Fuente: Wright, Coello, et al., 2011, p.54

Según Wiedmann y Minx, (como se citó en Valderrama et al., 2011) la huella de carbono, surge entonces como una herramienta para evaluar los impactos ambientales provocados por las actividades antropogénicas y su aplicación inclusive para cuantificar la eficiencia energética y su impacto en costos operacionales de una organización, lo cual podría favorecer el margen de beneficios, contribuyendo no solo a la sustentabilidad ambiental sino también a la rentabilidad económica; por lo cual se presenta como una herramienta poderosa de gestión y un estímulo para adoptar una estrategia proactiva para alcanzar la sustentabilidad de las organizaciones.

Para la situación de los países latinoamericanos, se está iniciando con la cuantificación de emisiones de los sectores productivos para la disminución de los efectos climáticos; no obstante, previamente se debería explorar las complejidades metodológicas de los principales enfoques para el cálculo de la huella de carbono, con la finalidad de reducir la incertidumbre de cálculo y determinar de una forma más próxima de los

reales impactos ambientales. Bajo este contexto, esta herramienta es empleada para tomar decisiones, inclusive ya está siendo incorporada en regulaciones ambientales locales e internacionales, repercutiendo de forma positiva en las organizaciones como en sus productos o servicios, lo cual influye en la percepción por parte de la población y los consumidores.

La **Figura 12** muestra algunas aplicaciones de la huella de carbono en algunas políticas nacionales o internacionales sobre desarrollo sustentable como: la economía del cambio climático, consumo sostenible, enfoques regionales y locales de desarrollo, entre otros.

Figura 12: Alternativas de aplicación de la huella de carbono.

| Ámbito | HdC de: | Trabajo |
|----------------------------|---------------------------------------|---|
| Ámbito de la Macroeconomía | Las naciones | <ul style="list-style-type: none"> Balanza comercial o fugas de carbono Huella de Carbono de un país específico |
| | Sub nacionales, regionales o locales | <ul style="list-style-type: none"> Programas de cambio climático para las ciudades y gobiernos locales de las organizaciones internacionales Estandarizar la construcción de la producción local y los inventarios de GEI basados en el consumo Métodos de cálculo de HdC para las pequeñas áreas espaciales (en fase incipiente de desarrollo) Notables excepciones de esta aplicación del método <i>Input Output</i> generalizado |
| | Sectores y productos | <ul style="list-style-type: none"> Determinación de emisiones de GEI directos e indirectos asociados con la producción sectorial y actividades de consumo Análisis de puntos críticos de carbono sectoriales Identificación de áreas prioritarias de investigación de cambio climático y política Modelos híbridos de enfoque (<i>ACV- Input- Output</i>) para análisis del ciclo de vida de los productos individuales o la evaluación comparativa de las empresas individuales en contra de la media del sector |
| | Cadenas de suministro | <ul style="list-style-type: none"> Rastreo de fuentes de fuentes de emisión asociados a una cadena de suministro particular de una demanda final sectorial de 57 sectores y 87 regiones del mundo |
| Ámbito de Microeconomía | Organizaciones | <ul style="list-style-type: none"> Contabilidad de las organizaciones La vinculación de entrada y salida modelos generalizados con las cuentas financieras de una organización en un marco híbrido |
| | Patrones de consumo y estilos de vida | <ul style="list-style-type: none"> Patrón de gastos de un grupo de personas u hogares con un conjunto bien definido de características socio demográficas Estudios comparativos para identificar el consumo de paquetes y/o grupos de estilo de vida con el potencial de ahorro de carbono Estudios para identificar los factores subyacentes que afectan las emisiones Estudios sobre las presiones generado por cambiar estilos de vida o la demografía Detalles metodológicos necesarios para una cabal comprensión de los estudios de Huella de Carbono de estilos de vida y patrones de consumo |

Fuente: Espíndola & Valderrama, 2012, p.169

El análisis de la huella de carbono ha proporcionado importantes aportes, que han ayudado a dar forma a las políticas climáticas. La agudeza con la que fueron elaborados como en las categorías de consumo, han contribuido a la focalización en la formulación de políticas para la reducción de emisiones (Kanemoto et al., 2016).

2.2.5.1. La huella de carbono en residuos solidos

La herramienta de la huella de carbono es empleada para cuantificar las emisiones de CO₂ a la atmósfera, está estandarizada y normada por la International Organization for Standardization (ISO) 14064-1.

Respecto a la huella de carbono en el sector de residuos sólidos, los aportes de las investigaciones realizadas en diversos países y los escenarios que aportan la mayor cantidad de emisiones, así como aquellos escenarios que contribuyen a reducir las emisiones de GEI, según la literatura revisada se pueden observar en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Investigaciones realizadas sobre huella de carbono en el sector de residuos sólidos, de acuerdo al análisis del tesista.

| Nº | Descripción | País | Año |
|----|---|------------|------|
| 1 | Se evaluaron las emisiones de GEI asociadas con la gestión de residuos y por el tipo de desperdicio alimentario; para el escenario de relleno sanitario las emisiones más altas corresponden a los residuos de alimentos del pollo (3.1 kg CO ₂ e/kg), carne roja (2.1 kg CO ₂ e/kg), pan (1.9 kg CO ₂ e/kg) y plátano (1.4 kg CO ₂ e/kg); mientras que para el escenario de digestión anaerobia los resultados son pollo (-0.26 kg CO ₂ e/kg), carne roja (-0.67 kg CO ₂ e/kg), pan (-0.67 kg CO ₂ e/kg) y plátano (-0.38 kg CO ₂ e/kg), para el estudio este tipo de tratamiento tiene un alto potencial para reducir emisiones de GEI (Eriksson et al., 2015). | Suecia | 2014 |
| 2 | En el estudio se evaluó la huella de carbono de los residuos de la poda y cuatro escenarios de eliminación; el proceso que generó la huella de carbono más alta fue la disposición final en un relleno sanitario (136.34 kg CO ₂ eq.), seguida del relleno sanitario con colección de metano (113.43 kg CO ₂ eq.), seguido del proceso de incineración (71.31 kg CO ₂ eq.) y el proceso que evitó una mayor generación de emisiones fue la reutilización de los residuos de la poda para transformarlos en briquetas (27.82 kg CO ₂ eq.) (Araújo et al., 2018). | Brasil | 2017 |
| 3 | En esta investigación se comparó la huella de carbono de dos escenarios, en la recolección de residuos: el primer escenario es el uso de diésel para los vehículos y el segundo escenario es sustituir el uso de diésel por GNC (Gas natural comprimido). Los resultados del estudio muestran que el uso de GNC comparado con el uso de diésel puede ser una alternativa ambientalmente sustentable, reduciendo casi en un 80% las emisiones (Zabeo et al., 2017). | Italia | 2017 |
| 4 | En la investigación se evaluó la huella de carbono del sistema de gestión de RSM, diferentes escenarios fueron evaluados para identificar aquellos que tienen mayores y menores emisiones; la investigación muestra que el relleno sanitario genera la mayor cantidad de emisiones, y estas podrían ser reducidas en un 62.8% si los residuos se usaran para generar energía (Mohsen et al., 2019). | Canadá | 2019 |
| 5 | En el estudio del cálculo de emisiones de GEI del manejo de residuos se identificó que el tratamiento mecánico biológico y anaerobio, conduce a un ahorro de más de 18.000 t CO ₂ -eq. por año, el reciclaje de materiales genera ahorros de más de 36.000 t CO ₂ - eq por año y finalmente la combinación del tratamiento anaeróbico con el tratamiento mecánico/biológico en planta permite ahorros de más de 40.000 t CO ₂ -eq. por año (Berechet et al., 2019). | Rumania | 2019 |
| 6 | Se realizó una evaluación de las emisiones provenientes del sector de residuos en la municipalidad San José de Costa Rica; de acuerdo con los resultados obtenidos la disposición final en rellenos sanitarios es el tratamiento que más emisiones de gases efecto invernadero origina con 532,5 t CO ₂ e/d, seguido por la incineración de RSU con 401,9 t/d. Es importante mencionar que para ambos escenarios se asume que al menos un 3 % de los residuos se reciclan y un 5 % de estos se utilizan para compostaje, de forma tal que el flujo de entrada de materiales parte de 408,4 t de RSU/d (Murillo et al., 2018). | Costa Rica | 2018 |
| 7 | La investigación de las emisiones de los RSM en Malasia concluyeron que la misma cantidad de residuos generan diferentes emisiones de carbono, debido a las diferentes tecnologías empleadas; por ejemplo la integración del tratamientos de digestión anaeróbica de residuos orgánicos y reciclaje de plástico, vidrio y textiles reducen la huella de carbono e inclusive necesitan menos espacio, ya que para el caso de rellenos sanitarios generan mayor huella de carbono y se requiere de áreas extensas (Malakahmad et al., 2017). | Malasia | 2017 |
| 8 | En el estudio desarrollado en la Municipalidad de eThekweni en Sudáfrica para evaluar las emisiones actuales y futuras de GEI del manejo de RSM, se consideró una evaluación de ciclo de vida y se calculó que durante el año 2012 se evitaron emitir 161780 toneladas de CO ₂ eq. Esto se dio principalmente por mecanismos de desarrollo limpio (MDL), donde aprovecharon el gas del relleno sanitario para generar | Sudáfrica | 2016 |



| | | | |
|----|---|------------------|------|
| | electricidad y el reciclaje. Concluyeron que la ausencia de sistemas de recolección y uso del gas del relleno sanitario para generar energía y el reciclaje, que es típico en la mayoría de sistemas de manejo de RSM registran importantes emisiones de GEI provenientes de la degradación anaeróbica, que equivalen casi a 294.670 toneladas de CO ₂ eq., solo en un relleno sanitario (Friedrich & Trois, 2016). | | |
| 9 | En la investigación realizada por Pérez et al., (2018), se evaluó la huella de carbono del tratamiento de RSM de Madrid, donde en el año 2013 se generaron 344 kg de RSM por habitante y estos residuos fueron recolectados de forma separada por fracciones (empaques, vidrio, papel/cartón y residuos mixtos incluido material orgánico). Los resultados que obtuvieron evidencian que la huella de carbono más alta se da en el escenario en el que todos los residuos son enviados al relleno sanitario sin recuperación y/o captura de biogás con 1821.11 kg de CO ₂ eq.; en comparación con el escenario actual de tratamiento de residuos sólidos donde se recupera biogás y se realiza reciclaje, se obtuvo una huella de carbono de 224kg de CO ₂ eq.; y la huella de carbono más baja fue en el escenario de biometanización, compostaje y reciclaje con -249 kg de CO ₂ eq. | España | 2018 |
| 10 | Se realizó una investigación para evaluar y comparar la huella de carbono del manejo convencional de residuos sólidos y la huella de carbono del manejo integrado de residuos sólidos, en Muangklang en Tailandia. Como resultado obtuvieron que el manejo tradicional de residuos (relleno sanitario sin recuperación de gas) genera 717 kg de CO ₂ -eq por tonelada de residuo; mientras que en el manejo integrado de residuos sólidos se genera 287 kg de CO ₂ -eq por tonelada de residuo, lo cual muestra que se ha reducido en un 60% las emisiones de GEI. Los investigadores concluyen que con este estudio se demuestra que es posible para las municipalidades asiáticas en desarrollo reducir significativamente las emisiones de GEI adoptando un apropiado manejo integrado de residuos sólidos (Menikpura et al., 2013). | Tailandia | 2013 |
| 11 | En un estudio realizado para evaluar la huella de carbono en el Reino Unido de los RSM y su tratamiento entre los escenarios de incineración con co-generación de calor y electricidad en comparación con un escenario de relleno sanitario con recuperación de biogás. Los resultados indican que la incineración ofrece ahorros significantes de GEI obteniendo un -0.179 t CO ₂ eq./t, mientras que para el caso del relleno sanitario es 0.395 t CO ₂ eq./t MSW. Los investigadores concluyen que una mejor opción para reducir la huella de carbono es la incineración (Jeswani et al., 2013). | Reino Unido - UK | 2013 |
| 12 | En la investigación realizada en China sobre el cálculo de las emisiones de GEI de RSM, en los siguientes escenarios: 0) Relleno sanitario; 1) relleno sanitario con recuperación de biogás y 2) incineración de residuos sólidos. Los resultados del estudio muestran que el escenario 0 presenta el peor desempeño ambiental con emisiones de carbono de 1150 kg de CO ₂ -eq.; toda vez que el gas sea colectado y tratado (como en el escenario 1) todos los impactos ambientales se reducen significativamente y sus emisiones de carbono son de 307 kg de CO ₂ -eq.; y el escenario 2 que es la incineración es el que menos impactos ambientales genera con 205 kg de CO ₂ -eq. Y se concluye que el mecanismo más adecuado para reducir emisiones es la incineración de residuos y la cogeneración de energía (Dong et al., 2014). | China | 2014 |



2.2.5.2. La huella de carbono en el sector residuos sólidos en el Perú

En Perú, al día de hoy no existen investigaciones sobre la huella de carbono orientadas hacia los sistemas de manejo de RSM. Sin embargo, se ha publicado un estudio sobre el ACV para evaluar el desempeño ambiental de la disposición final de residuos en tres rellenos sanitarios ubicados en diferentes áreas geográficas del Perú: la costa hiper-árida en Lima, los andes en el Cusco y la selva en Nauta; los resultados del estudio muestran que migrar del uso de botaderos abiertos hacia rellenos sanitarios han generado beneficios ambientales; sin embargo la recuperación de biogás es un aspecto crítico que se debe atender para mitigar las emisiones de GEI, está mejora le facilitará al Perú mitigar los efectos negativos que ocasiona el manejo inadecuado de residuos sólidos (Ziegler-Rodriguez et al., 2019).

Por parte del MINAM en el año 2016 publicó una guía para la elaboración del Reporte Anual de GEI (RAGEI) del sector Desechos, correspondiente a la categoría disposición de residuos sólidos, la información obtenida a partir de este reporte será empleada para elaborar el "Inventario Nacional de GEI (INFOCARBONO)", el cual servirá como insumo para generar el Inventario Nacional de GEI (INGEI) (MINAM, 2016a). Los resultados del INGEI con año base del 2014 se presentaron en el segundo informe bienal de actualización del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Según este inventario el total de emisiones de GEI fueron 167.630 Gigagramos de dióxido de carbono equivalente (Gg CO₂eq), durante el 2014 (MINAM, 2019).

Se observan los resultados del inventario nacional, las emisiones de dióxido de carbono en el sector residuos sólidos, correspondientes a los años 2000, 2005, 2010 y 2012; tal como se puede observar en la **Tabla 8**.

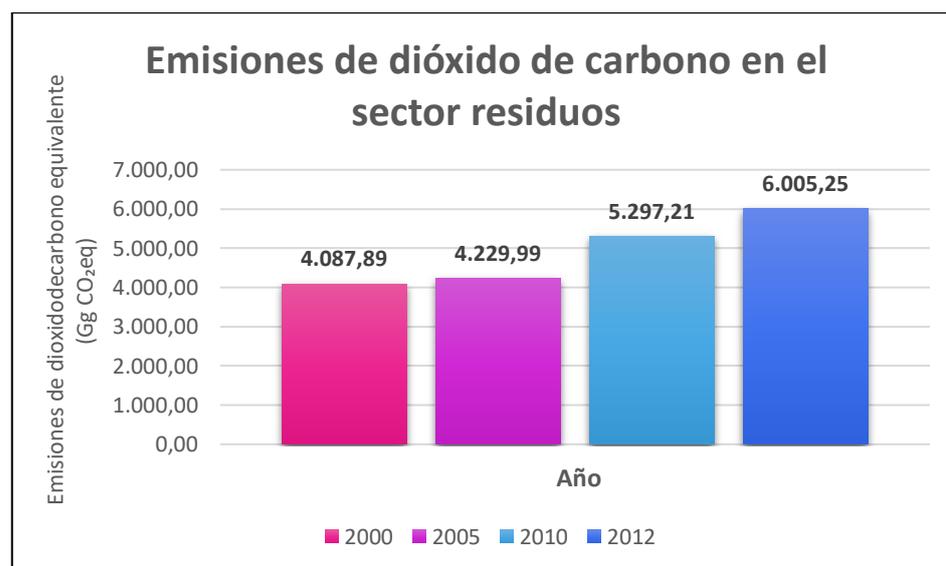
Tabla 8: Emisiones de dióxido de carbono en el sector residuos

| Categoría | Emisiones de dióxido de carbono equivalente en gigagramos (Gg CO ₂ eq) | | | |
|------------------|--|---------|---------|---------|
| | Año | | | |
| | 2000 | 2005 | 2010 | 2012 |
| Residuos sólidos | 4087.89 | 4229.99 | 5297.21 | 6005.25 |

Fuente: Adaptado de MINAM, 2019

Asimismo, en la **Gráfica 1** se observa las emisiones de CO₂ eq respecto al año 2000 en contraste con: el año 2005 se incrementaron en un 3%, en un 30% para el año 2010 y en un 47% para el año 2012. Esta información se encuentra consolidada como un recuento único de emisiones de GEI a nivel nacional para el sector residuos sólidos en la plataforma INFOCARBONO del MINAM, sin embargo no se cuenta con la información específica por región, municipalidad provincial o distrital, dicha información sería una base de datos sustancial a futuro para evaluar la huella de carbono de RSM e identificar oportunidades de mejora para reducir las emisiones de GEI del sector y contribuir con propuestas de mitigación del cambio climático.

Gráfica 1: Emisiones de dióxido de carbono en el sector residuos



Fuente: Adaptación de MINAM, 2012a

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Alcance

Define los límites operativos en relación a las emisiones directas e indirectas de GEI (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.2. Análisis de ciclo de vida (ACV)

Valoración de la suma de impactos (como emisiones de GEI) provocados por algún producto o servicio en cada una de las etapas de su ciclo de vida, incluyendo la extracción de insumos o materias primas, producción, uso y disposición final como residuo (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.3. Año base

Periodo histórico especificado, para propósitos de comparar emisiones o remociones de GEI u otra información relacionada con los GEI en un periodo de tiempo. Este periodo puede ser un año específico, como un año o promediar a partir de varios periodos o varios años (Instituto Nacional de la Calidad - INACAL, 2016).

2.3.4. Cambio climático

Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (IPCC, 2007).

2.3.5. Combustión fija

Quema de combustibles para generar electricidad, vapor, calor o energía en equipos estacionarios o fijos, como calderas, hornos, etc.(Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.6. Combustión móvil

Quema de combustibles por parte de vehículos automotores, ferrocarriles, aeronaves, embarcaciones u otro equipo móvil (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.7. Efecto invernadero

Los GEI absorben eficazmente la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a esos mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica es emitida en todas direcciones, en particular hacia la superficie de la Tierra. Por ello, los GEI retienen calor en el sistema superficie-tropósfera. Este fenómeno se denomina efecto invernadero (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007).

2.3.8. Emisiones antropogénicas

Emisiones de GEI, de precursores de GEI y de aerosoles aparejadas a actividades humanas, como la combustión de combustibles de origen fósil, la deforestación, los cambios de uso de la tierra, la ganadería, la fertilización, etc. (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007)

2.3.9. Emisión de GEI

Masa total de un GEI liberado a la atmósfera en un determinado periodo (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.10. Emisión directa de GEI

Emisión de GEI, proveniente de fuentes de GEI que pertenecen o son controladas por la organización (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.11. Emisión indirecta de GEI por energía

Emisión de GEI que proviene de la generación de electricidad, calor o vapor de origen externo consumidos por la organización (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.12. Equivalente de dióxido de carbono (CO₂-e)

Unidad para comparar la fuerza de radiación de un GEI con el dióxido de carbono. El dióxido de carbono equivalente se calcula utilizando la masa de un GEI determinado, multiplicado por su potencial de calentamiento global (los potenciales de calentamiento global son difundidos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.13. Factor de emisión

Coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico que constituye la fuente de las últimas emisiones. Los factores de emisión se basan a menudo en una muestra de datos sobre mediciones, calculados como promedio para determinar una tasa representativa de las emisiones correspondientes a un determinado nivel de actividad en un conjunto dado de condiciones de funcionamiento (United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC), s. f.).

2.3.14. Fuente de GEI

Unidad o proceso físico que libera un GEI hacia la atmósfera (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.15. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Algunos de los GEI son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.16. Inventario de GEI

Identificación y clasificación de las fuentes de GEI, sumideros de GEI y estimación de las emisiones y remociones de GEI de una organización (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.17. Incertidumbre

Parámetro asociado con el resultado de la cuantificación que caracteriza la dispersión de los valores que se podría atribuir razonablemente a la cantidad cuantificada (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.18. Mecanismo para un desarrollo limpio

Definido en el Artículo 12 del Protocolo de Kyoto, el mecanismo para un desarrollo limpio persigue dos objetivos: 1) ayudar a las Partes no incluidas a lograr un desarrollo sostenible y a contribuir al objetivo último de la Convención; y 2) ayudar a las Partes del Anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos de limitación y reducción de emisiones cuantificados (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2007).

2.3.19. Límite del inventario

Línea imaginaria que limita las emisiones directas e indirectas incluidas en el inventario. Resulta de los límites organizacionales y operativos de una empresa (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.20. Límites operativos

Los límites que determinan las emisiones directas e indirectas asociadas a operaciones que son propiedad o están bajo control de la empresa a cargo del inventario y el reporte (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.21. Organización

Compañía, corporación, firma, empresa, autoridad o institución, o una parte o combinación de ellas, ya esté constituida formalmente o no, sea pública o privada, que tiene sus propias funciones o administración (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.22. Otras emisiones indirectas de GEI

Emisión de GEI diferente de la emisión indirecta de GEI por energía, que es una consecuencia de las actividades de la organización, pero que se origina en fuentes de GEI que pertenecen o son controladas por otras organizaciones (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.23. Poder calorífico

La cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema completamente. El combustible consumido puede estar expresado en unidades energéticas o en unidades físicas (de volumen o masa). Puesto que se dispone de los datos de consumo en unidades físicas y los factores de emisión están expresados en unidades energéticas, es necesario realizar una conversión. El contenido energético de un combustible se mide a través del Poder Calorífico, que determina la cantidad de calor liberado durante la quema del mismo; este valor, indica la relación entre unidades energéticas y físicas (Ministerio para la Transición Ecológica, 2018).

2.3.24. Potencial de calentamiento global (PCG)

Factor que describe el impacto de la fuerza de la radiación (grado de daño a la atmósfera) de una unidad de un determinado GEI en relación con una unidad de CO₂ (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.25. Relleno Sanitario

Infraestructura cuya finalidad es la disposición sanitaria y con parámetros ambientales de seguridad de los residuos sólidos. Estos pueden ubicarse sobre la superficie o bajo esta; las cuales deben cumplir con los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental (OEFA, 2014).

2.3.26. Remoción de GEI

Masa total de un GEI removido de la atmósfera en un determinado periodo (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.27. Reservorio de GEI

Unidad física o componente de la biosfera, la geosfera o la hidrosfera, con la capacidad para almacenar o acumular un GEI removido de la atmósfera por un sumidero de GEI o un GEI capturado de una fuente de GEI (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

2.3.28. Sumidero de GEI

Unidad o proceso físico que remueve un GEI de la atmósfera (Norma Técnica Peruana - NTP ISO 14064-1:2016, 2016).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación desarrollada en el presente estudio corresponde a:

3.1.1. Según el nivel de conocimiento

Descriptiva – explicativa; porque se realiza un análisis y se identifica aquel proceso que genere la huella de carbono más alta.

3.1.2. Según el tipo de información que se va a recopilar

Cuantitativa; porque se emplea el análisis de datos numéricos, usando herramientas informáticas, estadísticas, y matemáticas para obtener los resultados.

3.1.3. Según la finalidad

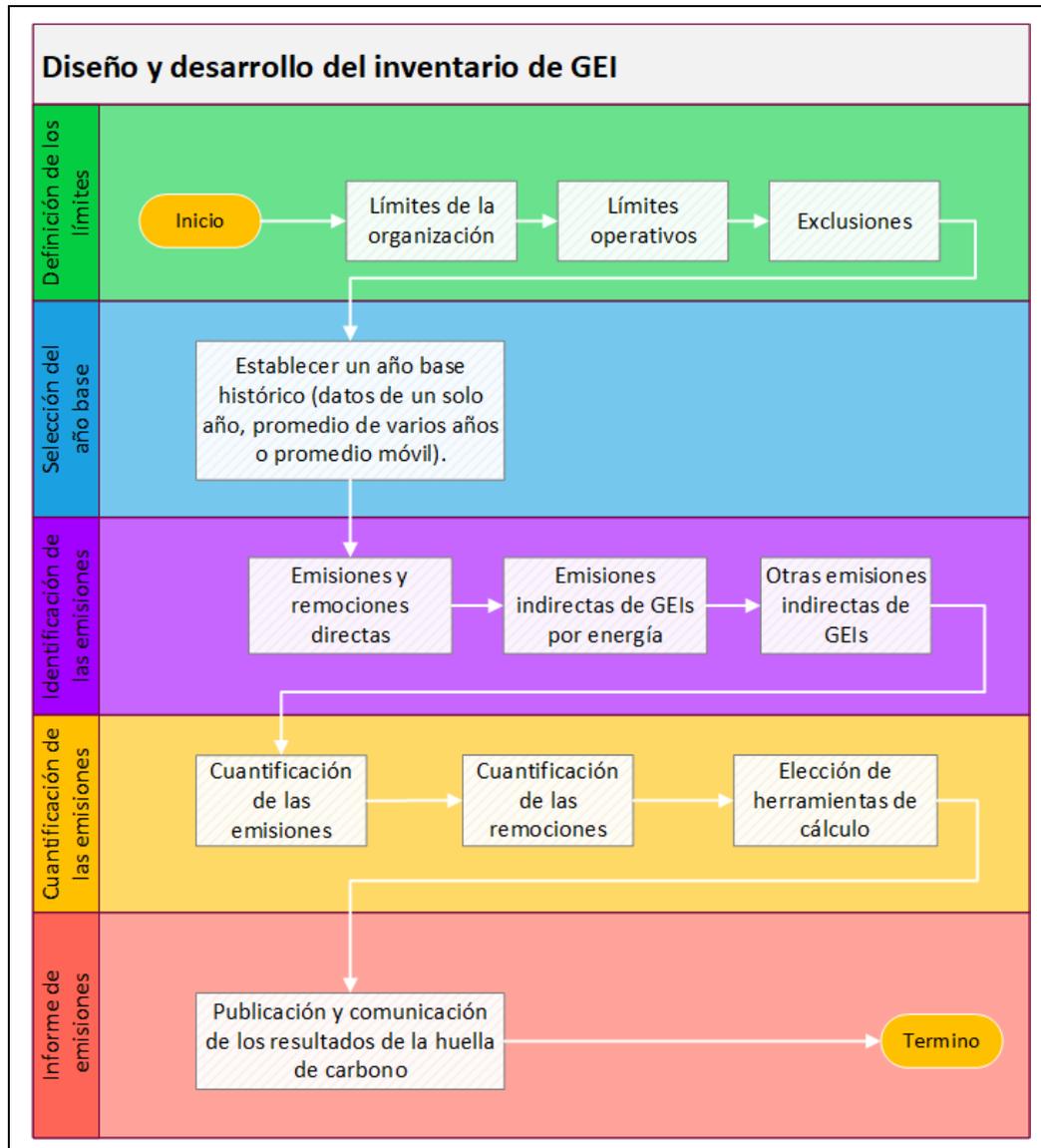
Aplicada; debido a que se emplea los conocimientos adquiridos para realizar el cálculo de la huella de carbono e identificar las áreas que generan menores y mayores emisiones de CO₂ eq.

3.2. Diseño de investigación

La presente investigación se desarrolla para determinar la huella de carbono de los procesos de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos de Póngor en base a la aplicación de la metodología y enfoque de la Norma ISO 14064-1:2016 “Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero”, la cual es la más empleada para el cálculo de la huella de carbono.

La **Gráfica 2** muestra los pasos generales para la implantación de la norma ISO 1464-1 y el cálculo de la huella de carbono.

Gráfica 2: Metodología para el cálculo de la huella de carbono



Fuente: Adaptación de Ihobe, 2015

3.2.1. Definición de los límites

Al establecer los límites operativos se definen las fuentes de emisión/sumideros de GEI que se incluirán en el inventario. De acuerdo a la norma las emisiones/remociones que se identifiquen se pueden clasificar en 3 categorías:

a. Alcance I - Emisiones y remociones directas de GEI

Aquellas emisiones directas que proceden de fuentes que controla la actividad. Las emisiones directas incluyen aquellas emisiones derivadas de la combustión de combustibles, el transporte de flota dentro de la organización y otro tipo de combustión fija o móvil.

a.1. Consumo de combustible

Se considera el consumo de combustible de los vehículos empleados dentro de los límites operativos de la PTRS – Pongor.

b. Alcance II – Emisiones indirectas de GEI por energía

Se deben identificar aquellas emisiones derivadas del consumo eléctrico; por ello es necesario identificar equipos que consuman electricidad, se deben considerar las boletas de consumo por este servicio.

b.1. Consumo de energía eléctrica

Relacionado a la demanda de electricidad, con la finalidad del funcionamiento de la PTRS de Póngor. La energía es suministrada por la “Empresa de Servicio Público de Electricidad Electro Norte Medio S.A – HIDRANDINA”. La información de la demanda de energía activa total (kWh) se obtuvo de los recibos de pago.

c. Alcance III – Otras emisiones indirectas de GEI

Son aquellas emisiones indirectas derivadas de la adquisición de materiales o combustibles, el tratamiento de residuos (por descomposición de materia orgánica).

c.1. Emisiones provenientes de la descomposición de residuos

Se consideran las emisiones provenientes de los residuos sólidos municipales no aprovechables que ingresan al relleno sanitario, la información de las cantidades dispuestas anualmente se obtuvo de los informes anuales de la Municipalidad Distrital de Independencia de los años 2015, 2016, 2017 y 2018 del “Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos” (SIGERSOL).

d. Emisiones evitadas o remociones de GEI

Son aquellas emisiones o masa total de GEI que se evitaron liberar o se removieron en un determinado periodo.

d.1. Emisiones evitadas provenientes de reciclaje y/o compostaje

Existen actividades de gestión de residuos sólidos que contribuyen a reducir las emisiones de GEI como el reciclaje o compostaje. El reciclaje contribuye a reducir las emisiones de GEI, ya que desplaza el uso de materias primas vírgenes y evita generar emisiones ambientales relacionadas con la extracción de materias primas y la producción de materiales. También, el reciclaje y compostaje evitan que se generen emisiones de GEI, ya que se desvía la eliminación de estos materiales hacia los rellenos sanitarios o vertederos que producen CH₄ y otros GEI (Weitz et al., 2002).

3.2.2. Selección del año base

Según la norma se debe comparar las emisiones con un año en específico, el cual es un periodo histórico específico. Para seleccionar el año base este debe ser representativo de la operación en condiciones normales de la organización y se debe contar con disponibilidad de datos

que nos permita una comparación significativa y consistente. Por lo cual, para el presente estudio, se define como año base al periodo anual 2015.

3.2.3. Identificación de emisiones

a. Identificación de emisiones directas de GEIs

Incluye emisiones directas que proceden de fuentes de combustión fija o móvil, emisiones fugitivas de GEIs y emisiones por descomposición de materia orgánica.

b. Identificación de emisiones indirectas de GEIs por energía

Incluyen las emisiones provenientes por el consumo eléctrico dentro de los alcances de la organización.

c. Identificación de otras emisiones indirectas de GEIs

Incluyen el resto de emisiones indirectas provenientes de emisiones indirectas como: combustión fija o móvil de materiales con base de carbono, emisiones fugitivas, emisiones por tratamiento de residuos, etc.

d. Identificación de emisiones evitadas o remociones de GEI

Se consideran las emisiones evitadas provenientes de actividades como compostaje o reciclaje, dentro de los alcances de la organización.

3.2.4. Cálculo de emisiones

La cuantificación de emisiones se plantea en dos pasos, según la Norma ISO 14064-1:2016, la obtención de la emisión de GEI (En toneladas) y posteriormente la conversión de los datos de emisión (En toneladas de GEI a unidades de toneladas de CO₂-eq).

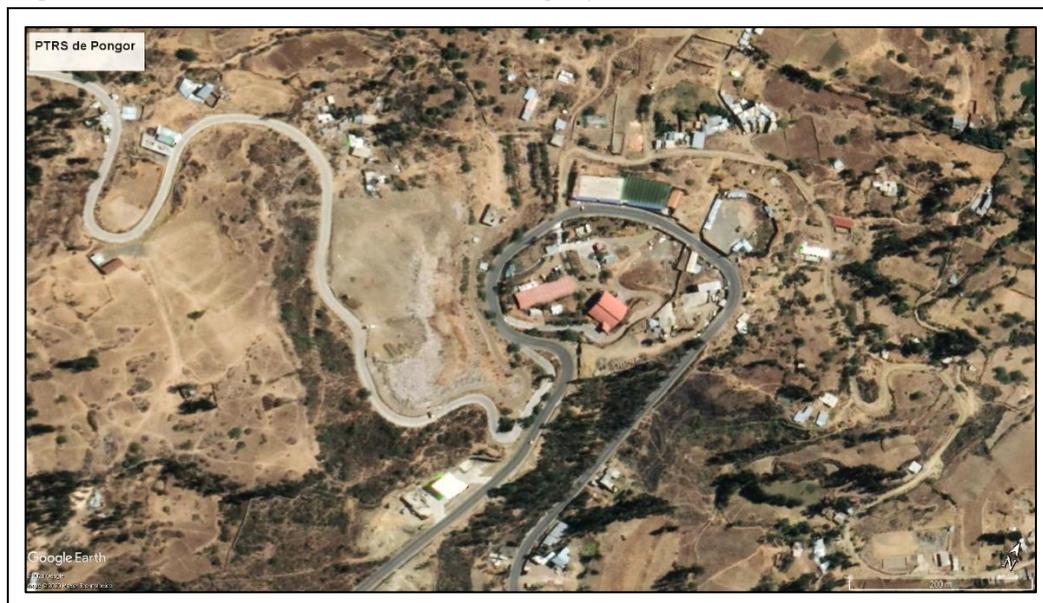
3.2.5. Informe de emisiones

La comunicación de resultados se llevará a cabo mediante el informe final donde se mostrarán los resultados de la cuantificación de GEI o determinación de huella de carbono de acuerdo a cada proceso operativo evaluado.

Actualmente las instalaciones de la PTRS poseen un área de 1.5 ha y cuenta con infraestructura y áreas disponibles para operar volúmenes entre 50 y 90 ton/día de residuos sólidos. La PTRS de Póngor entró en operación en el año 2003 y es operada por la Municipalidad Distrital de Independencia; con la implementación de esta planta se logró clausurar un botadero a cielo abierto donde se vertían 20,000 toneladas de residuos; reduciendo de esta forma la contaminación ambiental y los riesgos a la salud de la población (Municipalidad Distrital de Independencia, 2014).

La **Figura 14** ilustra la vista de la imagen satelital de la ubicación de la PTRS de Pongor y el relleno sanitario de la Municipalidad Distrital de Independencia.

Figura 14: Vista satelital de la PTRS de Pongor y sus inmediaciones



Fuente: Google Earth, 2020

Respecto a la composición de los residuos sólidos municipales en el Distrito de Independencia, se puede observar la caracterización de estos; así como el porcentaje correspondiente, tal como se observa en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Composición de los RSM de la Municipalidad distrital de Independencia

| Tipo de residuo | Composición de RS | |
|--------------------------|-------------------|-------|
| | Kg | % |
| Orgánico | 189.16 | 62.26 |
| Residuos inertes | 35.91 | 11.82 |
| Residuos sanitarios | 24.68 | 8.12 |
| Plásticos de un solo uso | 8.23 | 2.71 |
| Latas | 6.01 | 1.98 |
| Vidrio | 5.30 | 1.74 |
| Plástico PET | 4.76 | 1.57 |

| | | |
|-----------------|------|------|
| Cartón | 4.35 | 1.43 |
| Telas, textiles | 3.67 | 1.21 |
| Papel | 3.49 | 1.15 |
| Tecnopor | 3.29 | 1.08 |
| RAEE | 2.24 | 0.74 |
| Metal | 0.08 | 0.03 |

Fuente: Adaptado de Municipalidad Distrital de Independencia, 2016

3.3.1. Procesos Operativos de la PTRS de Póngor

a. Recepción de RS

Los vehículos de recolección de RSM depositan aproximadamente 41.77 toneladas de residuos sobre una plataforma de descarga de 120 m², posteriormente los residuos se trasladan hacia una rampa de descarga y por gravedad se depositan en las fajas transportadoras.

b. Planta de segregación de RS

Se encuentra en una instalación de 650 m², está equipada con máquinas y equipos para el manejo y segregación de RS.

c. Sistemas de fajas transportadoras

Se cuenta con 5 fajas transportadoras y se realiza la segunda segregación de residuos sólidos reciclables, residuos sólidos orgánicos que se envían para el compostaje y residuos no aprovechables que se envían al relleno sanitario.

d. Prensado de residuos sólidos

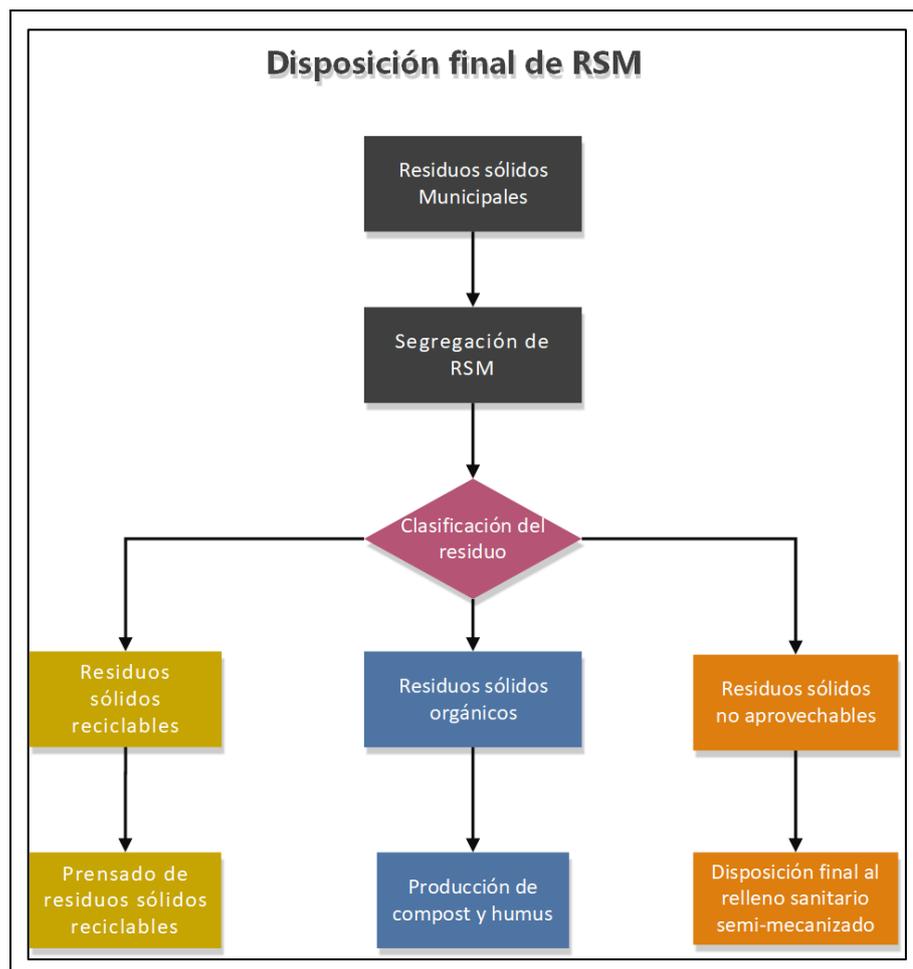
Se cuenta con dos prensas hidráulicas las cuales se emplean para compactar los residuos sólidos reciclables, lo que permite reducir el volumen de estos de 7 a 1.

e. Producción de compost y humus

Los residuos sólidos orgánicos son empleados como materia prima para la producción de compost y humus.

La **Gráfica 3** muestra la estructura del sistema de disposición final de RSM en la PTRS de Pongor y sus procesos operativos.

Gráfica 3: Estructura del sistema de disposición final de RSM



Fuente: Adaptado de Municipalidad Distrital de Independencia, 2014

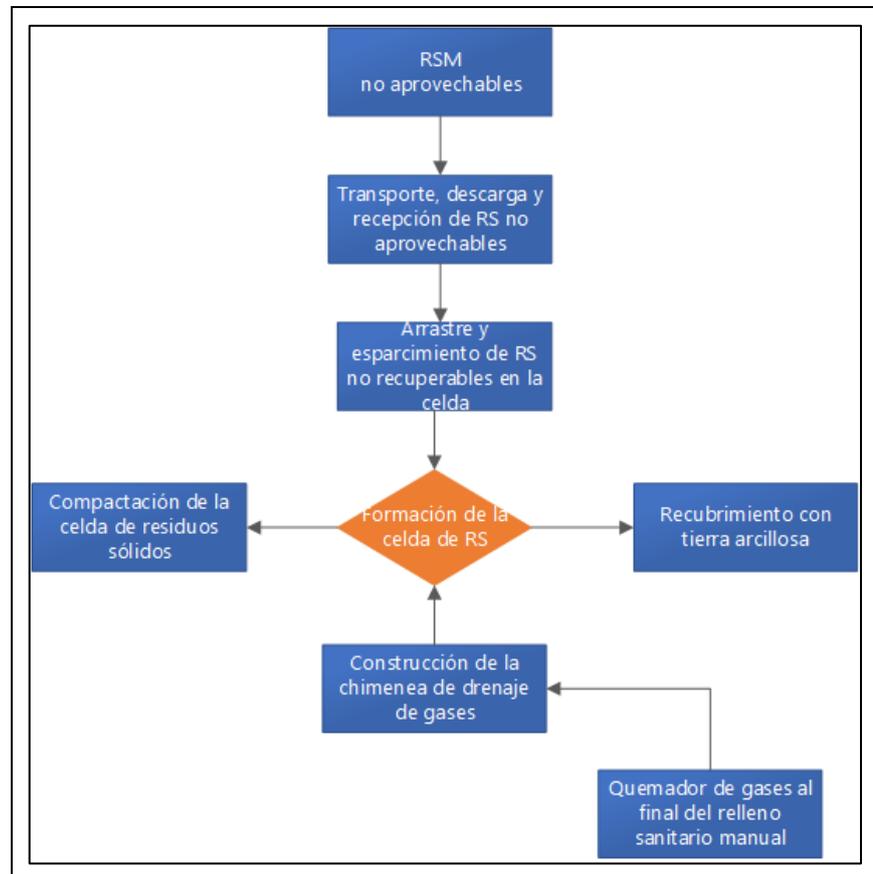
f. Relleno sanitario manual

El 30% de los residuos segregados en la planta de segregación son residuos no aprovechables y se trasladan con un camión compactador o con un tractor-remolque hacia el relleno sanitario. La disposición final en el relleno sanitario se da mediante la descarga de los residuos, luego se forma la celda según la cantidad que se va a depositar, posteriormente se esparcen los residuos dentro, se compacta y cubre la celda con un sustrato de 20 a 30 cm. El relleno sanitario tiene chimeneas para la evacuación y quema de gases, ubicadas cada 30 metros. Se cuenta con una electro bomba sumergible trituradora, la cual automáticamente evacúa los lixiviados hacia el relleno sanitario, realizando un proceso de recirculación de los mismos.

La **Gráfica 4** nos ilustra el flujo de operaciones desarrolladas en el relleno sanitario de Pongor, así como los subprocesos desarrollados

a lo largo de toda esta operación hasta la disposición final de los residuos no aprovechables.

Gráfica 4: Diagrama de Flujo de Operación del Relleno Sanitario Manual



Fuente: Municipalidad Distrital de Independencia, 2016

3.4. Métodos o técnicas

3.4.1. Métodos

Se empleó la metodología de la Norma ISO de la serie 14000:

- ISO 14064-1:2016 Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.

Adicionalmente, se emplearon las Directrices del IPCC del año 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero:

- Volumen 2: Energía.

- Volumen 5: Desechos.

3.4.2. Técnicas

Se emplearon las siguientes técnicas de campo y documentarias:

- Ficha de registro de campo
- Checklist
- Ficha de recopilación de datos
- Cámara fotográfica
- Laptop

A su vez, se emplearon las siguientes herramientas informáticas:

- **IPCC Inventory Software:** De acuerdo a las guías del IPCC del año 2006.
- **Microsoft Excel:** Hoja de cálculo para analizar datos.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

Respecto a la población de la presente investigación se consideran a los sitios de disposición final o rellenos sanitarios de la región Ancash.

3.5.2. Muestra:

La unidad de análisis y muestra corresponde a la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos de Póngor de la Municipalidad Distrital de Independencia, donde se realiza la disposición final de los residuos sólidos municipales generados en el distrito de Independencia.

3.6. Instrumentos validados de recolección de datos

La información empleada es de carácter cuantitativo, con la finalidad de calcular y determinar las emisiones de GEI o huella de carbono de cada proceso; y también es de carácter cualitativo, para el procesamiento y análisis de los resultados. De acuerdo a ello se emplearán fuentes primarias y secundarias para la recolección de información.

3.6.1. Fuentes Primarias

Para recopilar información, los instrumentos empleados son los siguientes: Visitas a la PTRS de Póngor, entrevistas con los trabajadores de la PTRS, emplear la guía metodológica de la huella de carbono para identificar procesos y alcances, registros de las observaciones realizadas; emplear el checklist de los requerimientos de la Norma ISO 14064-1:2016, usar fuentes de datos de la actividad, archivos y registros, etc.

3.6.2. Fuentes Secundarias

Mediante la documentación de información bibliográfica y estadística sobre las emisiones de CO₂ proveniente de las actividades de la disposición final de RSM.

3.7. Plan de procesamiento y análisis de la información

De acuerdo a las recomendaciones de la norma, las técnicas de análisis de datos para calcular las emisiones de GEI, es mediante la cuantificación de emisiones. Para cuantificar estas emisiones, la norma ISO 14604-1 emplea la metodología de las directrices del IPCC del año 2006. Para realizar el cálculo, se realiza en base a dos metodologías secuenciales:

3.7.1. Obtención de la emisión de GEI

Este cálculo de emisiones de GEI es en base a la unidad de medida de toneladas de GEI (t GEI). Se genera a partir de un dato de la actividad que produce la emisión, aplicable a fuentes de emisión; en las que existe un proceso de transformación química, electricidad consumida y emisiones asociadas al ciclo de vida de los materiales, se obtiene mediante la siguiente formula:

$$\text{Emisiones de GEIs (t GEI)} = \text{Dato de la actividad} \times \text{Factor de medición}$$

Siendo:

- **Dato de la actividad:** Medida cuantitativa de la actividad que produce la emisión. Suele expresarse en unidades de energía (TJ), unidades de volumen (m³, ft³, etc.), unidades de masa (kg, t,

etc.), para la combustión de fuentes móviles se usan datos de la actividad o datos de los kilómetros recorridos por el vehículo (KRV) y para el consumo eléctrico en MWh. Toda fuente de emisión debe tener un dato de actividad expresado en unidades de masa, volumen, energía o distancia.

- **Factor de emisión:** Expresado en toneladas de GEI/unidad. El factor de emisión depende del tipo y características del proceso de transformación química y del tipo de combustible.

3.7.2. Conversión de los datos de emisión (de toneladas de GEI a unidades de toneladas de CO₂-e)

Además de las emisiones calculadas en el paso anterior mediante factores de emisión, se aplica también a fuentes donde no existe un proceso de transformación química o de donde la fuente de emisión provenga de una medida directa de masa y volumen de GEI.

Ya que existen seis tipos de GEI (metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre), las cuantificaciones pueden generar hasta seis reportes por cada gas detectado en las fuentes de emisión; según la Norma ISO 14064-1:2016 indica que se debe presentar el inventario de emisiones en función a un solo parámetro de gas de efecto invernadero de referencia, esta unidad es en toneladas de CO₂ (tCO₂), por esta razón todas las cuantificaciones realizadas se deben expresar en función de tCO₂; el cual debe tener la distinción de que ya ha sido convertido mediante la nomenclatura de tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂-e). Este factor de conversión es denominado “potencial de calentamiento global”.

$$\text{Emisiones de GEI (t CO}_2\text{ - e)} = \text{Dato de emisión} \times \text{Potencial de calentamiento global}$$

Siendo:

- **Dato de emisión:** Medida cuantitativa de la emisión producida.
- **Potencial de calentamiento global:** en inglés “global warming potencial” (GWP), es un factor de conversión usado para cuantificar los GEI en función de CO₂-e, es el impacto de la fuerza

de radiación de una unidad con base a la masa de un GEI, con relación a la unidad equivalente de CO₂ (CO₂-e), expresado en toneladas de CO₂-e/t GEI (existe un factor para cada tipo de GEI). El índice GWP es comparado con un gas de referencia, el cual es dióxido de carbono. Este índice puede ser calculado para periodos de 20 o 100 años, siendo 100 el valor más frecuente y empleado para el inventario de GEI (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007).

La **Tabla 10** nos muestra los índices de GWP para los diferentes GEI, según el horizonte temporal de 100 años.

Tabla 10: Índice GWP para GEI

| Gas de efecto invernadero | Formula química | GWP (Valores para un horizonte temporal de 100 años) | |
|---------------------------|---|---|--------------------------|
| | | GWP ₁₉₉₅ | GWP ₂₀₁₃ |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 1 | 1 |
| Metano | CH ₄ | 21 | 28 |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 310 | 265 |
| Hidrofluorocarbonos | CHCl ₂ F CHClF ₂ CHCl ₂ CF ₂ Cl | 140 – 11 700 | <1 – 12 400 ^a |
| | ... | | |
| Perfluorocarbonos (PFC) | CF ₄ | 6 500 – 9 200 | <1 – 11 100 ^b |
| | C ₂ F ₆ | | |
| | C ₃ F ₈ | | |
| Hexafluoruro de azufre | SF ₆ | 23 900 | 23 500 |

Fuente: IPCC, 2013 y Houghton, 1996

Nota:

a = Valores comprendidos entre <1 (como el HFC-1141) y 12 400 (como el HFC-23)

b = Valores comprendidos entre <1 (como el PFC-1114) y 11 100 (como el PFC-116)

Como se observa con el índice GWP se puede concluir que, una unidad de metano provoca 28 veces más impacto climático que una unidad de dióxido de carbono y el hexafluoruro de azufre es el gas con mayor impacto en la lista ya que una sola unidad de este gas, provoca 23500 veces más impacto climático que una unidad de dióxido de carbono.

3.8. Ética de la investigación

La huella de carbono es uno de los principales métodos disponibles para cuantificar las emisiones de GEI generados por los impactos antropogénicos; también es considerada como una herramienta que nos ayudará a tomar decisiones; por lo que se presenta como una herramienta eficaz de gestión y contribuye para adoptar estrategias a fin de alcanzar la sustentabilidad de las organizaciones.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, esta herramienta es empleada para tomar decisiones; por ejemplo, ha aportado en dar forma a las políticas climáticas con la finalidad de reducir emisiones en diversos sectores, también se está incorporando en normas nacionales e internacionales vinculadas estrechamente con la economía circular, consumo sostenible, enfoques regionales y locales de desarrollo, entre otros.

Consecuentemente, el objetivo general de la presente investigación será evaluar la huella de carbono en la gestión del tratamiento de residuos sólidos, tanto en escenarios que aportan la mayor cantidad de emisiones, así como aquellos escenarios que contribuyen a reducir las emisiones de GEI; lo que nos permitirá identificar cuáles de los procesos son sostenibles y cumplen los estándares de la gestión ambiental que favorezcan la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

3.9. Limitaciones

La presente investigación presenta limitaciones en relación a los factores de emisión, ya que en la actualidad los estudios para determinar estos no se han realizado en nuestro país, es por ello que se han considerado factores de emisión de estudios de residuos sólidos municipales provenientes de Europa y del IPCC (2006), debido a la complejidad de cálculo de estos factores, específicamente de los factores de emisión para actividades como reciclaje o compostaje; es decir, no contamos con factores de emisión nacionales enfocados en contextos locales de la gestión de residuos sólidos municipales de acuerdo a sus propias características operativas.

CAPÍTULO IV

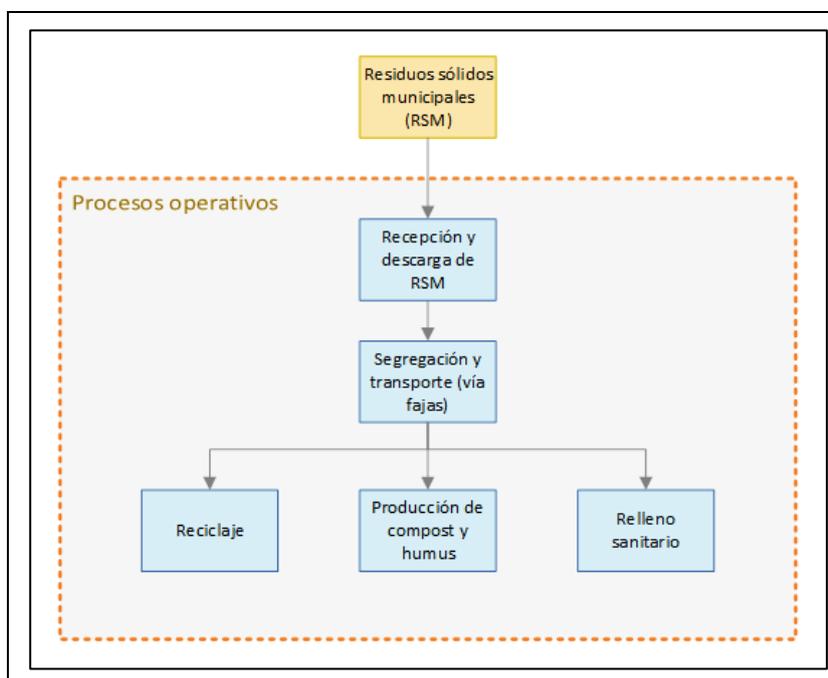
RESULTADOS

4.1. Delimitación del área de estudio

4.1.1. Límites organizacionales

Se han identificado los límites organizacionales de la PTRS de Póngor. En la **Gráfica 5** se observan los límites organizacionales de la PTRS de Póngor, así como los procesos operativos que están considerados para la investigación, tales como la recepción y descarga de los RSM, la segregación y transporte vía fajas, reciclaje, producción de compost y humus y la disposición final en el relleno sanitario.

Gráfica 5: Diagrama de los límites organizacionales



4.1.2. Límites operacionales

Se establecen los límites operativos, las fuentes de emisión, emisiones evitadas que se incluyen en el inventario. Para determinar si una fuente de emisión es directa o indirecta es necesario analizar estas emisiones dentro de los límites operativos.

Se observa la identificación de los límites operacionales de acuerdo al tipo de alcance, emisión, aspecto ambiental y el factor de análisis del proceso; así como los datos necesarios para la evaluación, tal como se puede apreciar en la **Tabla 11**.

Tabla 11: Identificación de límites operacionales

| Alcance | Emisión | Aspecto | Factor de análisis / Proceso | Datos necesarios |
|---------|--------------------|------------------------------|--|---|
| I | Directa | Consumo de combustible | Unidades vehiculares | Cantidad y tipo de combustible utilizado. |
| II | Indirecta | Consumo de energía eléctrica | Planta de tratamiento de RSM de Pongor | Registro de recibos de energía eléctrica consumida en la PTRS de Pongor. |
| III | Otras emisiones | Disposición final de RSM | Relleno sanitario | Registro de la cantidad de residuos sólidos vertidos en el relleno sanitario. |
| | Emisiones evitadas | Reciclaje Compostaje | Planta de tratamiento de RSM de Pongor | Registro de la cantidad de residuos sólidos reciclados y compostados. |

Fuente: Adaptación de Saavedra, 2017

4.2. Cuantificación de consumo de recursos y disposición final de residuos

4.2.1. Alcance I

4.2.1.1. Consumo de combustible

De acuerdo a la definición del alcance 1 en la huella de carbono, las emisiones directas generadas por las actividades de la organización se deben contabilizar como emisiones de alcance I (directas).

Para el caso de la PTRS de Póngor, la Municipalidad Distrital de Independencia tiene vehículos de su propiedad que se han asignado

para su operación dentro de la planta de tratamiento y que son operados por el personal de la institución.

La información del consumo de combustible ha sido facilitada por la Sub gerencia de Gestión Ambiental de la Municipalidad Distrital de Independencia, en un reporte consolidado en formato digital. Los datos recopilados se pueden apreciar en la **Tabla 12**.

Tabla 12: Cantidad de combustible consumido por vehículo

| Unidades vehiculares | Cantidad de combustible consumido anualmente (gal) | | | |
|----------------------|--|----------------|----------------|----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Tractor Agrícola | 1362,44 | 156,60 | 1015,00 | 1060,00 |
| Tractor Oruga DG7 | 2891,00 | 3152,33 | 3190,00 | 3150,00 |
| Mini Cargador | 680,00 | 510,00 | 745,00 | 660,00 |
| Volquete Volvo | 0 | 405,00 | 510,00 | 605,00 |
| Total | 4933,44 | 4223,93 | 5460,00 | 5475,00 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

El tipo de combustible empleado por los vehículos de la PTRS de Pongor es diésel B5, el cual se comercializa en nuestro país desde enero de 2011 en reemplazo del diésel B2. El diésel B5 es un combustible constituido por una mezcla de diésel N°2 y 5% en volumen de biodiésel (B100) (PETROPERÚ, 2019). Es por ello que se tiene que realizar un ajuste para nuestro cálculo; a partir de valores por defecto del IPCC y las propiedades de combustibles según el MINEM (MINAM, 2012b).

$$C_{combustible\ 95\%} = C_{combustibleDB5} - (5\% \times (C_{combustibleDB5}))$$

Donde:

- C_{Combustible95%}:** Combustible consumido al 95% de diésel B5.
- C_{CombustibleDB5}:** Consumo bruto de combustible diésel B5.
- 5% \times (C_{CombustibleDB5}):** 5% del consumo bruto de combustible diésel B5.

En la **Tabla 13**, tenemos los valores del consumo anual de combustible al 95% de diésel B5.

Tabla 13: Combustible al 95% diésel B5

| Unidades vehiculares | Consumo de combustible (gal) | | | |
|-------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Tractor Agrícola | 1294,32 | 148,77 | 964,25 | 1007,00 |
| Tractor Oruga DG7 | 2746,45 | 2994,72 | 3030,50 | 2992,50 |
| Mini Cargador | 646,00 | 484,50 | 707,75 | 627,00 |
| Volquete Volvo | 00,00 | 384,75 | 484,50 | 574,75 |
| Total | 4686,77 | 4012,74 | 5187,00 | 5201,25 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

4.2.2. Alcance II

4.2.2.1. Consumo de energía eléctrica

De acuerdo a la definición del alcance 2, se considera a las emisiones indirectas provenientes de la energía de tipo eléctrica, vapor o calor que es producida por un tercero, la cual es empleada dentro de los límites de la organización.

La energía eléctrica es suministrada por Hidrandina S.A. (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad Electronortemedio Sociedad Anónima), la cual se emplea para las operaciones de la PTRS de Pongor. Los registros de consumo de energía eléctrica (kWh) se obtuvieron por los recibos de pago del consumo mensual. La información del consumo de energía eléctrica se observa en la **Tabla 14** y fue facilitada por la Sub gerencia de Gestión Ambiental de la Municipalidad Distrital de Independencia.

Tabla 14: Cantidad de energía eléctrica consumida

| Instalación | Energía eléctrica consumida (kWh) | | | |
|----------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| PTRS de Pongor | 1495,39 | 1667,59 | 1624,63 | 1663,65 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

4.2.3. Alcance III

4.2.3.1. Disposición final de residuos sólidos no aprovechables

Según la definición del alcance 3, la identificación de otras emisiones indirectas de GEI, se incluyen emisiones derivadas

provenientes del tratamiento de residuos, donde existe un proceso de transformación química donde se genera y liberan GEI.

La información de la cantidad de la disposición final de residuos sólidos municipales no aprovechables (kg) se obtuvo de los informes anuales de la Municipalidad Distrital de Independencia del “Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos” (SIGERSOL), tal como se puede apreciar en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Cantidad de residuos sólidos municipales no aprovechables

| Tipo de residuo | Residuos sólidos municipales no aprovechables (kg) | | | |
|----------------------|--|------------|------------|------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| RSM no aprovechables | 2705240,88 | 3619307,82 | 3658548,35 | 3696640,10 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Municipalidad Distrital de Independencia, 2018

4.2.4. Reciclaje y compostaje

4.2.4.1. Reciclaje

Según Pour l’Environnement (2010) las actividades de gestión de residuos como el reciclaje contribuyen a la reducción de emisiones; materiales como papel/cartón, vidrio, metales, plástico, chatarra, etc.; se reciclan y son reintroducidos al ciclo de producción, evitando la extracción de materias primas. Las emisiones evitadas se obtienen de la diferencia entre las emisiones de CO₂ asociadas al reciclaje de residuos y las que se hubieran generado si estas no se reciclaban y eran destinadas al relleno sanitario como destino final.

Los datos de la cantidad de residuos reciclables se obtuvieron de los informes anuales de la Municipalidad Distrital de Independencia del “Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos” (SIGERSOL), como se puede observar en la **Tabla 16**.

Tabla 16: Cantidad de residuos sólidos municipales reciclables

| Tipo de residuo | Residuos sólidos municipales reciclables (kg) | | | |
|-----------------|---|------------------|------------------|-------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Papel y cartón | 1491160,00 | 234313,37 | 236855,15 | 239322,51 |
| Vidrio | 346874,12 | 220381,22 | 222771,87 | 225092,52 |
| Plástico | 260487,84 | 369835,16 | 373847,04 | 377741,48 |
| Metal | 220617,25 | 3799,68 | 3840,89 | 3880,91 |
| Telas, textiles | 55818,82 | 153253,61 | 154916,07 | 156529,86 |
| Total | 2374958,03 | 981583,04 | 992231,02 | 1002567,27 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

4.2.4.2. Compostaje

Las emisiones evitadas provenientes del compostaje, resultan de la diferencia entre el secuestro de carbono que se da a partir de la retención de carbono en el suelo de la materia orgánica, que se transforma en carbono biogénico (Pour l'Environnement, 2010) y las emisiones de CO₂ que se hubieran generado si los residuos orgánicos se hubieran vertido directamente al rellano sanitario.

La información de la cantidad de residuos orgánicos se obtuvo de los informes anuales de la Municipalidad Distrital de Independencia del “Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos” (SIGERSOL) desde los años 2015 al 2018, como se puede observar en la **Tabla 17**.

Tabla 17: Cantidad de residuos sólidos municipales orgánicos

| Tipo de residuo | Residuos sólidos municipales orgánicos (kg) | | | |
|------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Materia orgánica | 8051200,76 | 7885594,84 | 7971135,91 | 8054172,69 |
| Follaje | 606032,94 | 108924,05 | 110105,64 | 111252,63 |
| Total | 8657233,70 | 7994518,89 | 8081241,54 | 8165425,32 |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

4.2.5. Resumen del consumo de recursos y disposición final de residuos

En la **tabla 18** se puede observar el resumen del consumo de recursos y disposición final de RSM del periodo 2015 al 2018.

Tabla 18: Resumen de los valores anuales del consumo de recursos y disposición final de RSM

| Alcance | Aspecto | Valores anuales | | | | Unidad |
|----------|---|-----------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | |
| I | Consumo de combustible | 4933,4 | 4223,9 | 5460,0 | 5475,0 | gal |
| II | Consumo de energía eléctrica | 1495,4 | 1667,6 | 1624,6 | 1663,7 | kWh |
| III | Disposición final de RSM no aprovechables | 2705240,9 | 3619307,8 | 3658548,4 | 3696640,1 | kg |
| E. | Reciclaje | 2374958,0 | 981583,0 | 992231,0 | 1002567,3 | kg |
| evitadas | Compostaje | 8657233,7 | 7994518,9 | 8081241,5 | 8165425,3 | kg |

Fuente: Adaptación de la SGA – Muni. Distr. de Independencia, 2018

4.3. Cuantificación de las emisiones de CO₂-eq

Según la Norma ISO 14064-1:2016 se emplea las directrices del 2006 del IPCC para cuantificar las emisiones del GEI; sin embargo, existen 6 tipos de GEI, por lo cual la norma considera un paso adicional para cuantificar estas emisiones de GEI, en función de solo una medida de contabilidad.

4.3.1. Alcance I

4.3.1.1. Factor de emisión de fuentes móviles (consumo de combustible)

Los factores de emisión de las fuentes móviles, los que corresponden para el consumo de combustible de vehículos propios de la PTRS de Pongor, se han considerado de las directrices del IPCC del 2006, del capítulo 3: combustión móvil – Vol. 2: energía, donde se sustentan los fundamentos científicos respecto a los valores asignados para los factores de emisión; dentro de esta categoría se han considerado las fuentes móviles del transporte terrestre donde se incluye todos los tipos de vehículos para servicio pesado, como camiones y tractores.

Según las directrices del IPCC, las emisiones de CO₂ se calculan sobre la base de la cantidad y el tipo de combustible quemado (que es igual al combustible vendido); para las emisiones de CH₄ y N₂O se

basan de forma similar en los factores de emisión basados en el tipo de combustible (Directrices del 2006 del IPCC, 2006, volumen 2: Energía, capítulo 3: Combustión móvil, p. 3.10) (IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006b).

Como primer paso, Para calcular el dato del combustible, consideramos la siguiente ecuación:

$$Combustible_a = \frac{Consumo\ 95\%_a \times \rho_a \times VCN}{10^6}$$

Donde:

- Combustible_a:** Combustible consumido (TJ).
- Consumo 95%_a:** Cantidad de combustible al 95% de diésel B5 consumido (gal).
- ρ:** Densidad del combustible (kg/gal)
- VCN:** Valor calorífico neto (TJ/kg)
- a:** Tipo de combustible (p. ej., gasolina, diésel, gas natural, GLP, etc.).

Como segundo paso, para calcular las emisiones de CO₂ empleamos la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ GEI = \sum_a (Combustible_a \times FE_a)$$

Donde:

- Emisiones de GEI:** Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (tn de GEI).
- Combustible:** Combustible consumido (TJ).
- FE_a:** Factor de emisión del combustible (kg/TJ).

a: Tipo de combustible (p. ej., gasolina, diésel, gas natural, GLP, etc.).

En la **Tabla 19** se observa la asignación de valores para el cálculo de emisiones de fuentes móviles.

Tabla 19: Asignación de valores para el cálculo de emisiones

| Variable | Descripción | Unidad | Valor |
|----------|---|------------------------|------------|
| ρ | Densidad (Diesel B5) | kg/gal | 3,22138363 |
| VCN | Valor calorífico neto (Diesel B5) | TJ/kg | 0,0000422 |
| FE | Factor de emisión de CO ₂ (Diesel B5) | Kg/TJ | 74100 |
| | Factor de emisión de CH ₄ (Diesel B5) | kg/TJ | 3,90 |
| | Factor de emisión de N ₂ O (Diesel B5) | kg/TJ | 3,900 |
| GWP | "Global warming potential" o potencial de calentamiento global (IPCC 1996 - Potencial de calentamiento global para un horizonte de 100 años). | GWP - CH ₄ | 21 |
| | | GWP - N ₂ O | 310 |

Fuente: Inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) 2012 - Combustión móvil (MINAM, 2012b)

Finalmente, para calcular la huella de carbono o las emisiones de CO₂ – equivalente (CO₂-eq), multiplicamos “Emisiones de GEI” por el potencial de calentamiento global (GWP); del GEI para realizar la conversión de los datos de emisión a unidades de toneladas de CO₂-eq:

$$\text{Emisiones (t CO}_2\text{-eq)} = \text{Emisiones de GEI} \times \text{GWP}$$

Donde:

Emisiones (t CO₂-eq): Emisiones de toneladas de CO₂-eq

Emisiones de GEI: Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (tn de GEI).

GWP: Potencial de calentamiento global (a 100 años), factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una unidad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de CO₂ en un período de 100 años. Expresado en toneladas de CO₂-e

/t GEI (existe un factor para cada tipo de GEI) (Ihobe, 2015).

4.3.1.2. Resultados del inventario de GEI del consumo de combustible

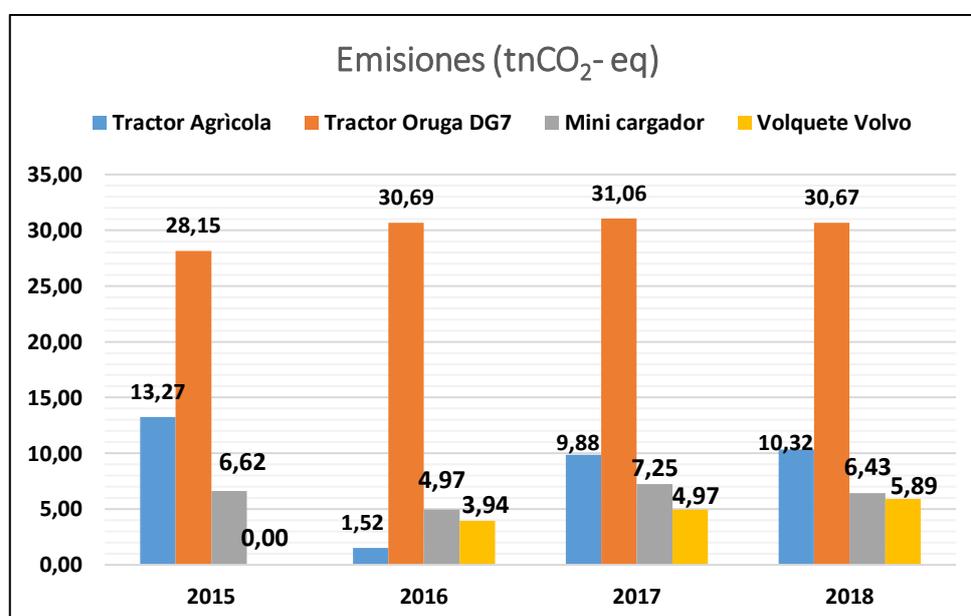
Luego de calcular el factor de emisión de fuentes móviles (consumo de combustible), calculamos las emisiones en toneladas de CO₂ – eq. de esta actividad, de lo cual se obtuvieron los resultados que se observan en la **Tabla 20** a continuación:

Tabla 20: Emisiones de toneladas de CO₂ - eq. del consumo de combustible por tipo de vehículo

| Unidades vehiculares | Emisiones anuales (tn CO ₂ eq) | | | |
|----------------------|---|--------------|--------------|--------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Tractor agrícola | 13,27 | 1,52 | 9,88 | 10,32 |
| Tractor Oruga DG7 | 28,15 | 30,69 | 31,06 | 30,67 |
| Mini cargador | 6,62 | 4,97 | 7,25 | 6,43 |
| Volquete Volvo | 0,00 | 3,94 | 4,97 | 5,89 |
| Total | 48,03 | 41,13 | 53,16 | 53,31 |

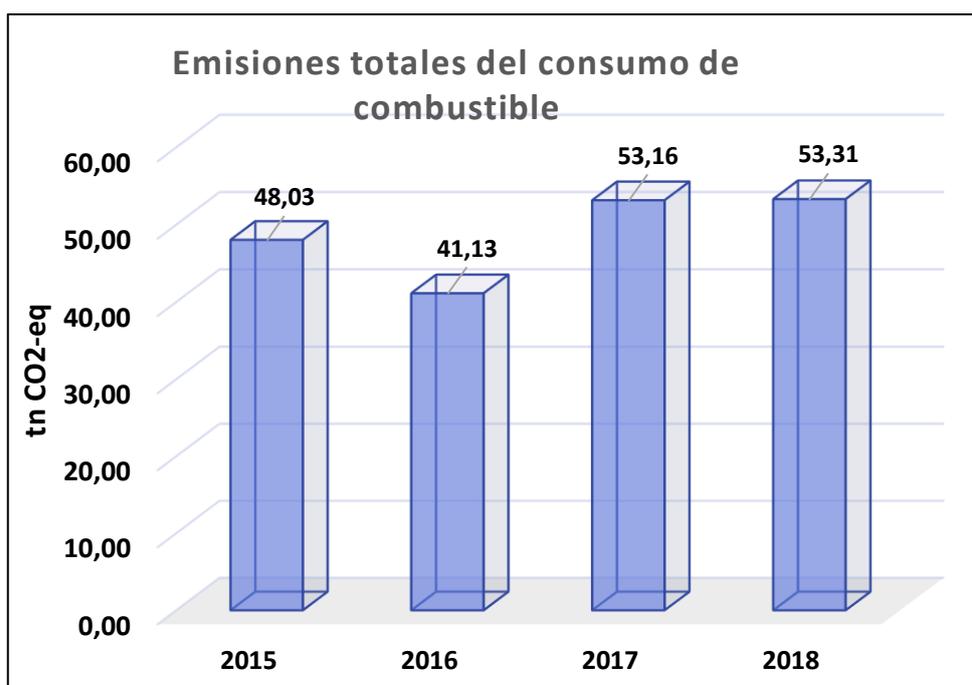
La **Gráfica 6** nos muestra las emisiones provenientes del consumo de combustible de acuerdo al tipo de vehículo en los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 6: Emisiones de CO₂ – eq. del consumo de combustible por tipo de vehículo del periodo 2015 al 2018



La **Gráfica 7** nos muestra las emisiones provenientes del consumo de combustible anuales, en los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 7: Emisiones de CO₂ – eq. del consumo de combustible anuales del periodo 2015 al 2018



4.3.2. Alcance II

4.3.2.1. Factor de emisión del consumo de energía eléctrica

Los factores de emisión de las actividades como la generación de energía eléctrica (kWh) utilizada por la organización (PTRS de Pongor) es producida por una tercera parte, que para este caso sería la empresa de comercialización y distribución eléctrica: Hidrandina S.A. (Empresa Regional de Servicio Público de Electricidad Electronortemedio Sociedad Anónima).

Otra variable importante es la cantidad neta promedio de electricidad generada y enviada a la red por unidad de potencia; según el informe de Hidrandina S.A. fue de 43949 MWh (Grupo DISTRILUZ, 2020).

Primero, para calcular el factor de emisión de la energía eléctrica, consideramos la siguiente ecuación:

$$FE_e = \frac{FC_c \times VCN \times ef_c}{EG}$$

Donde:

| | |
|------------------------|---|
| FE_e: | Factor de emisión de la energía eléctrica (kg CO ₂ /MWh o kg CH ₄ /MWh o kg N ₂ O/MWh). |
| FC_c: | Cantidad de combustible consumido (gal) en un año para generar energía. |
| VCN: | Valor calorífico neto (TJ/kg) |
| ef_c: | Factor de emisión de CO ₂ o CH ₄ o N ₂ O del tipo de combustible empleado para producir la energía (kg CO ₂ /TJ o kg CH ₄ /TJ o kg N ₂ O/TJ). |
| EG: | Cantidad neta de electricidad generada y enviada a la red (MWh). |

Segundo, para calcular las emisiones de GEI, empleamos la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Consumo anual de energía} \times FE_e$$

Donde:

| | |
|----------------------------------|--|
| Emisiones de GEI: | Emisiones de Kg CO ₂ , ó kg CH ₄ , ó kg N ₂ O. |
| Consumo anual de energía: | Energía consumida (MWh) |
| FE_e: | Factor de emisión de la energía eléctrica (kg CO ₂ /MWh ó kg CH ₄ /MWh ó kg N ₂ O/MWh). |

Los factores de emisión de CO₂, CH₄ y N₂O del consumo de electricidad; así como el gasto promedio de combustible diésel consumido para la generación de energía eléctrica han sido considerados del “Inventario Nacional de gases de efecto invernadero - 2010” (MINAM, 2010a), los cuales serán empleados para el presente estudio, como se observa en la **Tabla 21**.

Tabla 21: Asignación de valores para el cálculo de emisiones

| Variable | Descripción | Unidad | Valor |
|--------------------|---|-------------------------|----------|
| FC _c | Cantidad de combustible consumido en un año para generar energía. | gal | 2139 |
| VCN | Valor calorífico neto | TJ/kg | 0,0001 |
| ef _c | Factor de emisión de CO ₂ | Kg CO ₂ /TJ | 72618,00 |
| | Factor de emisión de CH ₄ | Kg CH ₄ /TJ | 2,90 |
| | Factor de emisión de N ₂ O | Kg N ₂ O /TJ | 0,588 |
| EG | Cantidad neta de electricidad generada y enviada a la red. | MWh | 1,323 |
| GWP _{CO2} | "Global warming potential" o potencial de calentamiento global (IPCC 1996 - Potencial de calentamiento global para un horizonte de 100 años). | GWP - CO ₂ | 1 |
| GWP _{CH4} | | GWP - CH ₄ | 21 |
| GWP _{N2O} | | GWP - N ₂ O | 310 |

Fuente: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero – 2010, MINAM, 2010

Para calcular las emisiones de CO₂ – equivalente (CO₂-eq), multiplicamos “Emisiones de GEI” por el potencial de calentamiento global del GEI; para realizar la conversión de los datos de emisión a unidades de toneladas de CO₂-eq:

$$Emisiones (t CO_2\text{-eq}) = Emisiones de GEI \times GWP$$

Donde:

Emisiones (t CO₂-eq): Emisiones de toneladas de CO₂-eq

Emisiones de GEI: Emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (tn de GEI).

GWP: Potencial de calentamiento global (a 100 años), factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una unidad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de CO₂ en un período de 100 años. Expresado en toneladas de CO₂-e /t GEI (existe un factor para cada tipo de GEI) (Ihobe, 2015).

Aplicamos la anterior fórmula para hallar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O:

$$Emisiones\ CO_2\ (t\ CO_2\text{-}eq) = Emisiones\ de\ CO_2 \times GWP - CO_2$$

$$Emisiones\ CH_4\ (t\ CO_2\text{-}eq) = Emisiones\ de\ CH_4 \times GWP - CH_4$$

$$Emisiones\ N_2O\ (t\ CO_2\text{-}eq) = Emisiones\ de\ N_2O \times GWP - N_2O$$

Finalmente calculamos la huella de carbono o las emisiones totales de CO₂ – eq, aplicando la siguiente formula:

$$Emisiones\ totales = Emisiones\ CO_2 + Emisiones\ CH_4 + Emisiones\ N_2O$$

4.3.2.2. Resultados del inventario de GEI del consumo de energía eléctrica

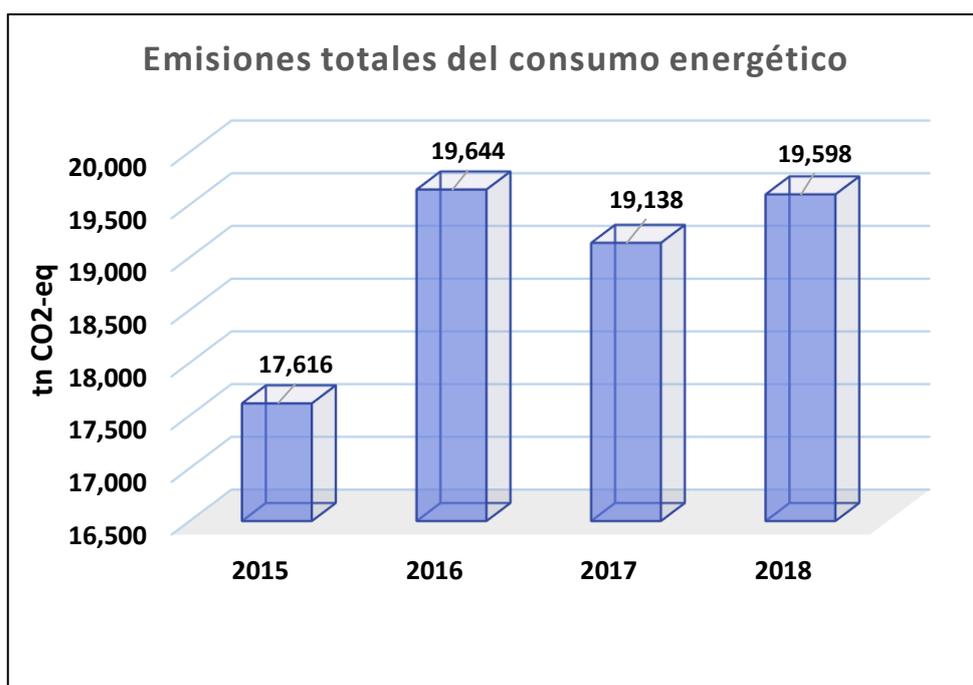
Luego de calcular el factor de emisión del consumo de energía, calculamos las emisiones en toneladas de CO₂ – eq. de esta actividad, de lo cual se obtuvieron los resultados que se observan a continuación en la **Tabla 22**:

Tabla 22: Emisiones de CO₂ - eq. del consumo de energía eléctrica

| Instalación | Emisiones anuales (tn CO ₂ -eq) | | | |
|----------------|---|--------|--------|--------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| PTRS de Pongor | 17,616 | 19,644 | 19,138 | 19,598 |

La **Gráfica 8** nos muestra las emisiones provenientes del consumo de energía en los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 8: Emisiones de CO₂ – eq. del consumo de energía anuales del periodo 2015 al 2018



4.3.3. Alcance III

4.3.3.1. Factor de emisión de la disposición final de RSM no aprovechables en un relleno sanitario

Se emplearon los factores de emisión de la disposición final de RSM no aprovechables en un relleno sanitario; estos factores de emisión han sido estimados en base a las directrices del IPCC 2006, del volumen 5, del “Capítulo 2: datos de generación, composición y gestión de desechos” y del “Capítulo 3: Eliminación de desechos sólidos”, siguiendo estas directrices se consideran las variables dentro del marco de la disposición final de los residuos sólidos de en un sitio de eliminación de desechos sólidos (SEDS) y en la categoría para un sitio considerado como “Gestionado – semi aeróbico” (IPCC, 2006a) que para nuestro caso de estudio sería el relleno sanitario de Pongor.

Para calcular el factor de emisión de la disposición final de RSM no aprovechables del relleno sanitario de Pongor, consideramos la siguiente ecuación:

$$FE_{RS} = FCM \times COD \times COD_F \times F \times Relaci3n\left(\frac{CH_4}{C}\right) \times FC$$

Donde:

FE_{RS}: Factor de emisi3n de metano para la disposici3n final de RSM no aprovechables (Gg CH₄/ Gg RS).

FCM: Factor de correcci3n para el metano, para un relleno sanitario controlado, se ha considerado el valor por defecto 1.00. (Fuente: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2000) Orientaci3n del IPCC sobre las buenas pr3cticas y la gesti3n de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Capítulo 5, p. 5.9. Recuperado de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/5_Waste_ES.pdf)

COD: Carbono orgánico degradable

COD_F Fracci3n de carbono orgánico degradable asimilado

F: Fracci3n de metano en el gas de vertedero. El valor por defecto segú el IPCC es igual a 0.5; ya que en los lugares de disposici3n final de RS o SEDS, la mayor cantidad de los residuos generan un gas con aproximadamente 50% de CH₄.

Relaci3n $\left(\frac{CH_4}{C}\right)$: Cociente del peso molecular CH₄/C

FC: Factor de correcci3n para la oxidaci3n del metano.

. Para variables como el factor de correcci3n del metano se consider3 la informaci3n del reporte anual de gases de efecto

invernadero del sector residuos (RAGEI) del Perú del año 2014; también se consideró información para calcular el factor de emisión del metano (CH₄), debido a que es el principal gas de efecto invernadero que se emite en los lugares de disposición final de residuos sólidos en tierra como producto de la disposición anaeróbica de los mismos (MINAM, 2017). Los valores asignados para el cálculo se observan en la **Tabla 23**.

Tabla 23: Asignación de valores para el cálculo de emisiones

| Variable | Descripción | Unidad | Valor |
|---|---|-------------------------------|--------|
| FE_{RS} | Factor de emisión de metano para la disposición final de RSM no aprovechables | Gg CH ₄ / Gg RS | 0.0514 |
| FCM | Factor de corrección para el metano | Fracción | 1 |
| COD | Carbono orgánico degradable | t carbón / t desechos | 0.1541 |
| COD_F | Fracción de carbono orgánico degradable asimilado | Fracción | 0.50 |
| F | Fracción de metano en el gas de vertedero | Fracción | 0.50 |
| Relación ($\frac{CH_4}{C}$) | Cociente del peso molecular CH ₄ /C | Fracción | 1.33 |
| FC | Factor de corrección para la oxidación del metano | Fracción | 1.0 |
| GWP_{CH4} | "Global warming potential" o potencial de calentamiento global (IPCC 1996 - Potencial de calentamiento global para un horizonte de 100 años). | GWP - CH ₄ | 21 |

Fuente: Reporte anual de gases de efecto invernadero del sector residuos - RAGEI, MINAM, 2017

Adicionalmente luego de calcular el factor de emisión, calculamos las emisiones de GEI, para lo cual empleamos la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ GEI = W_{RS} \times FE_{RS}$$

Donde:

Emisiones de GEI: Emisiones de metano emitidos en unidades en Gg de CH₄.

W_{RS}: Masa de los residuos sólidos no aprovechables eliminados en el relleno sanitario en unidades de Gg.

FE_{RS}: Factor de emisión de metano para la disposición final de RSM no aprovechables (Gg CH₄/ Gg RS).

Para calcular las emisiones de CO₂ – equivalente (CO₂-eq), multiplicamos “Emisiones de GEI (metano)” por el potencial de calentamiento global del metano; para realizar la conversión de los datos de emisión a unidades de toneladas de CO₂-eq:

$$Emisiones (t CO_2\text{-eq}) = Emisiones de CH_4 \times GWP - CH_4$$

Donde:

Emisiones (t CO₂-eq): Emisiones de toneladas de CO₂-eq

Emisiones de CH₄: Emisiones de CH₄ y (tn de CH₄).

GWP: Potencial de calentamiento global (a 100 años), factor que describe el impacto de la fuerza de radiación de una unidad con base en la masa de un GEI determinado, con relación a la unidad equivalente de CO₂ en un período de 100 años. El valor del potencial de calentamiento global para el metano es 21.

4.3.3.2. Resultados del inventario de GEI de la disposición final de RSM en el relleno sanitario

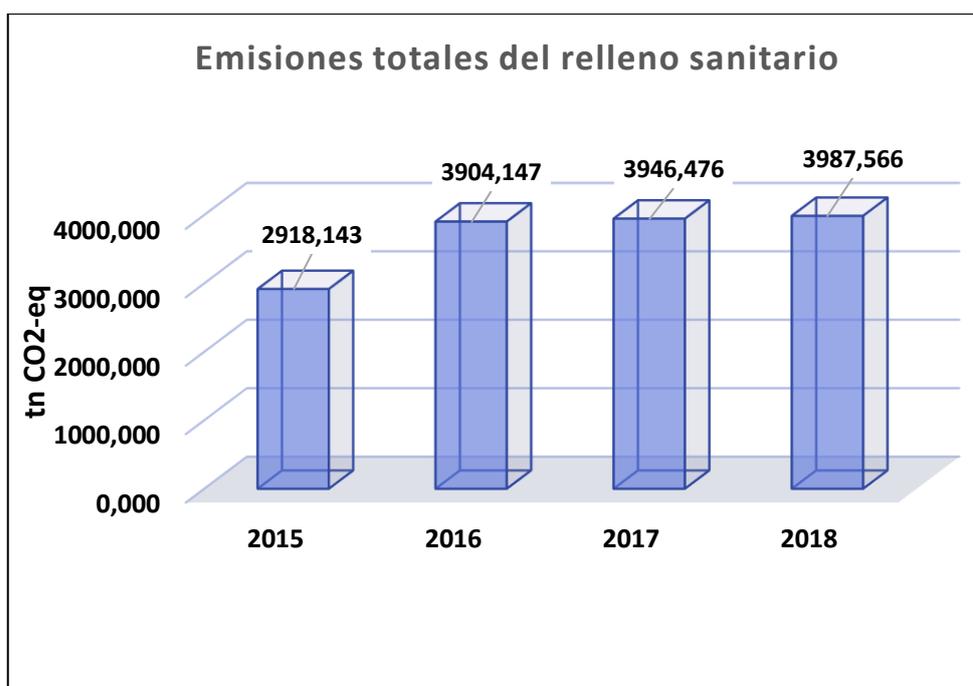
Luego de calcular el factor de emisión de la disposición final de residuos sólidos no aprovechables en el relleno sanitario, calculamos las emisiones en toneladas de CO₂ – eq. de esta actividad, de lo cual se obtuvieron los resultados que se observan a continuación en la **tabla 24**:

Tabla 24: Emisiones de CO₂ – eq. del relleno sanitario

| Instalación | Emisiones anuales (tn CO ₂ -eq) | | | |
|-----------------------------|---|----------|----------|----------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Relleno sanitario de Pongor | 2918,143 | 3904,147 | 3946,476 | 3987,566 |

La **Gráfica 9** nos muestra las emisiones provenientes del relleno sanitario de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 9: Emisiones de CO₂ – eq. del relleno sanitario del periodo 2015 al 2018



4.3.4. Emisiones evitadas

4.3.4.1. Factores de emisión del reciclaje y compostaje

Para las actividades que contribuyen a evitar las emisiones de GEI como el reciclaje o compostaje, se han considerado los factores de emisión del Instituto Alemán de Investigación Energética y Ambiental de Heidelberg, según el manual de “Calculadora MRS-GEI, herramienta de cálculo de gases de efecto invernadero (GEI) en el manejo de residuos sólidos (MRS)”. Las actividades como el reciclaje en los inventarios de GEI, no están considerados dentro de los inventarios nacionales de residuos, sino que están considerados dentro de los sectores “energía” y “procesos industriales”; el cálculo de las emisiones resultantes de este

proceso son las más bajas que las de otros métodos de producción donde se usa material primario o materia prima, entonces existen emisiones ahorradas por el proceso de reciclaje y la reducción de emisiones por la sustitución de la extracción de materia prima. Las emisiones de GEI para las porciones de los residuos reciclados se calculan considerando la masa de residuos reciclados y el factor de emisión de GEI. Los factores de emisión que se observan en la **Tabla 25** corresponden a los factores de emisión para el reciclaje y compostaje, que proceden de un estudio a nivel europeo (Prognos / IFEU / INFU 2008) (ifeu - Institut für Energie et al., 2009).

Tabla 25: Emisiones de CO₂ – eq. del relleno sanitario

| Factores de emisión para el reciclaje y compostaje | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------|--------|---------|-----------|----------|
| Kg CO ₂ -eq/t residuo | Residuo orgánico (Compostaje) | Papel | Vidrio | Metales | Plásticos | Textiles |
| Emisiones ^a | 57 | 87 | 180 | 22 | 1023 | 32 |
| Emisiones evitadas ^b | 160 | 95 | 1000 | 500 | 1437 | 2850 |

Fuente: (ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH et al., 2009)

Nota:

a: Factor de emisión para emisiones brutas de los residuos, en un escenario sin tratamiento de residuos y vertidos directamente al relleno sanitario.

b: Factor de emisión para emisiones evitadas, con tratamiento de RS mediante reciclaje y compostaje, este factor se caracteriza por ser aquel que muestra las emisiones que se han removido o se han evitado verter a la atmósfera.

a. Emisiones

Para calcular las emisiones de GEI del reciclaje y compostaje empleamos la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ totales = \frac{(+1) \times W_{RS} \times FE_{RS}}{10^6}$$

Donde:

Emisiones totales: Emisiones de toneladas de CO₂-eq.

W_{RS}: Masa de los residuos sólidos reciclables y compostables (kg de RS).

FE_{RS}: Factor de emisión del reciclaje o compostaje (kg CO₂-eq/t residuo).

b. Emisiones evitadas

Para calcular las emisiones evitadas de GEI del reciclaje y compostaje empleamos la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ evitadas = \frac{(-1) \times W_{RS} \times FE_{RS}}{10^6}$$

Donde:

Emisiones evitadas: Emisiones en toneladas de CO₂-eq.

W_{RS}: Masa de los residuos sólidos reciclables y compostables (kg de RS).

FE_{RS}: Factor de emisión del reciclaje o compostaje (kg CO₂-eq/t residuo).

(-1): Se considera un factor negativo porque las emisiones son ahorradas, extraídas o se evitan verter a la atmósfera con actividades como el reciclaje o compostaje.

4.3.4.2. Resultados del inventario de GEI del reciclaje

Una vez que se ha identificado el factor de las emisiones y emisiones evitadas para los residuos reciclados como papel, cartón, plásticos, vidrio, metales y textiles, se calculó las emisiones en toneladas de CO₂ – eq. de esta actividad, de donde se obtuvieron los resultados que se observan a continuación:

a. Emisiones

Las emisiones correspondientes al reciclaje se observan en la **Tabla 26**, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.

Tabla 26: Emisiones de CO₂ – eq. del reciclaje

| Tipo de residuo reciclado | Emisiones anuales (t CO ₂ -eq) | | | |
|---------------------------|---|----------------|----------------|----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Papel, cartón | 178,700 | 37,389 | 37,794 | 38,188 |
| Plásticos | 266,349 | 378,156 | 382,259 | 386,241 |
| Vidrio | 6,937 | 4,408 | 4,455 | 4,502 |
| Metales | 4,806 | 0,083 | 0,084 | 0,085 |
| Textiles | 1,786 | 4,904 | 4,957 | 5,009 |
| Total | 458,578 | 424,940 | 429,549 | 434,024 |

b. Emisiones evitadas

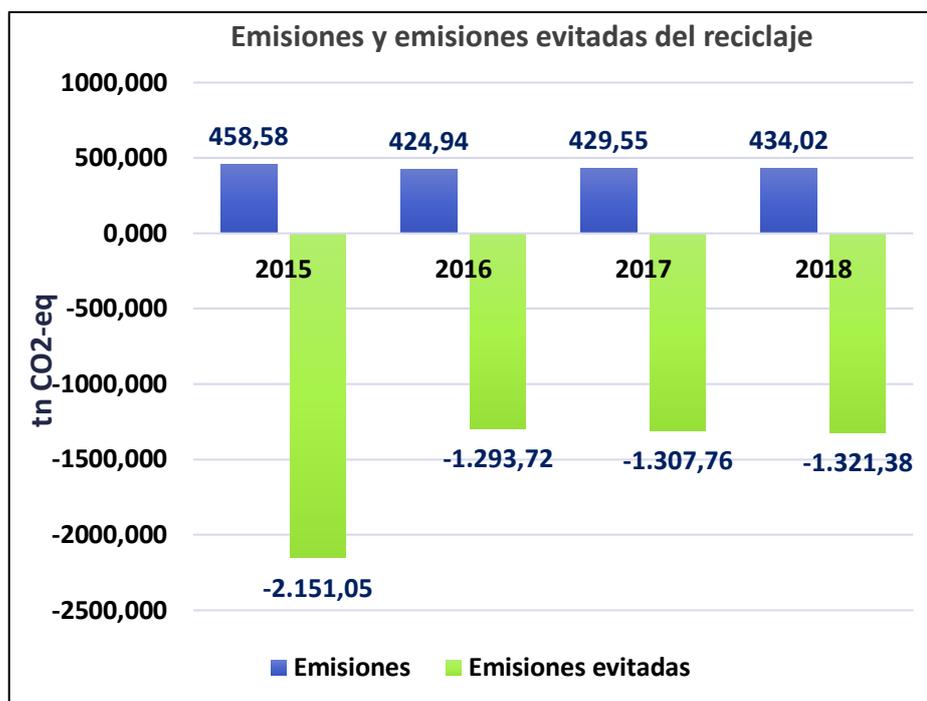
Las emisiones que se evitaron verter a la atmósfera correspondientes al reciclaje se observan en la **Tabla 26**, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.

Tabla 27: Emisiones evitadas de CO₂ – eq. del reciclaje

| Tipo de residuo reciclado | Emisiones anuales (t CO ₂ -eq) | | | |
|---------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Papel, cartón | -992,78 | -207,72 | -209,97 | -212,16 |
| Plásticos | -374,19 | -531,27 | -537,03 | -542,63 |
| Vidrio | -173,44 | -110,19 | -111,39 | -112,55 |
| Metales | -451,56 | -7,78 | -7,86 | -7,94 |
| Textiles | -159,08 | -436,77 | -441,51 | -446,11 |
| Total | -2151,05 | -1293,72 | -1307,76 | -1321,38 |

La **Gráfica 10** nos muestra las emisiones y emisiones evitadas provenientes del reciclaje de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 10: Emisiones y emisiones evitadas de t CO₂ – eq. del reciclaje del periodo 2015 al 2018



c. Emisiones totales netas

Es la suma total de las emisiones y las emisiones evitadas del reciclaje en unidades de t CO₂-eq, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$Emisiones\ totales\ netas = \sum Emisiones + \sum Emisiones\ evitadas$$

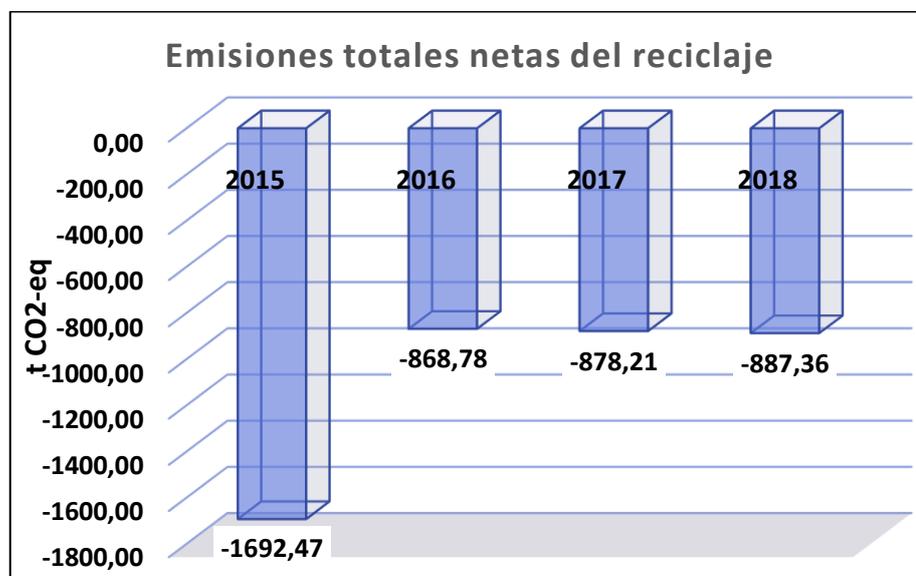
El cálculo de las emisiones totales netas para las actividades de reciclaje, nos permite calcular las emisiones totales, como se muestra en la **tabla 28**.

Tabla 28: Emisiones totales netas del reciclaje

| Tipo de emisión | Emisiones (t CO ₂ -eq) | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Emisiones | 458,58 | 424,94 | 429,55 | 434,02 |
| Emisiones evitadas | -2151,05 | -1293,72 | -1307,76 | -1321,38 |
| Emisiones totales netas | -1692,47 | -868,78 | -878,21 | -887,36 |

La **Gráfica 11** nos muestra las emisiones totales netas provenientes del reciclaje de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 11: Emisiones totales netas de t CO₂-eq. del reciclaje del periodo 2015 al 2018



4.3.4.3. Resultados del inventario de GEI del compostaje

Una vez que se ha identificado el factor de las emisiones y emisiones evitadas para los residuos compostados como materia orgánica y follaje, calculamos las emisiones en toneladas de CO₂ – eq. de esta actividad, de lo cual se obtuvieron los resultados que se observan a continuación:

a. Emisiones

Las emisiones correspondientes al compostaje se observan en la **Tabla 29**, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.

Tabla 29: Emisiones de CO₂ – eq. del compostaje

| Tipo de residuo reciclado | Emisiones (t CO ₂ -eq) | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Materia orgánica | 700,45 | 686,05 | 693,49 | 700,71 |
| Follaje | 52,72 | 9,48 | 9,58 | 9,68 |
| Total | 753,18 | 695,52 | 703,07 | 710,39 |

b. Emisiones evitadas

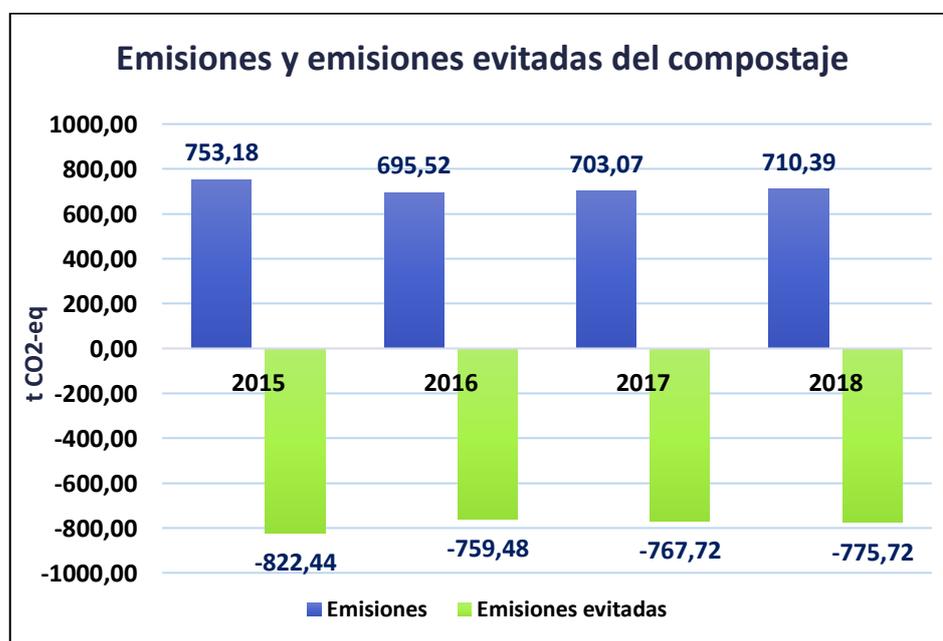
Las emisiones que se evitaron verter a la atmósfera correspondientes al compostaje se observan en la **Tabla 30**, correspondientes al periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.

Tabla 30: Emisiones evitadas de CO₂ – eq. del compostaje

| Tipo de residuo reciclado | Emisiones (t CO ₂ -eq) | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Materia orgánica | -764,86 | -749,13 | -757,26 | -765,15 |
| Follaje | -57,57 | -10,35 | -10,46 | -10,57 |
| Total | -822,44 | -759,48 | -767,72 | -775,72 |

La **Gráfica 12** nos muestra las emisiones y emisiones evitadas provenientes del compostaje de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 12: Emisiones y emisiones evitadas de t CO₂ – eq. del compostaje del periodo 2015 al 2018



c. Emisiones totales netas

Es la suma total de las emisiones y las emisiones evitadas del compostaje en unidades de t CO₂-eq, como se muestra en la siguiente formula:

$$Emisiones\ totales\ netas = \sum Emisiones + \sum Emisiones\ evitadas$$

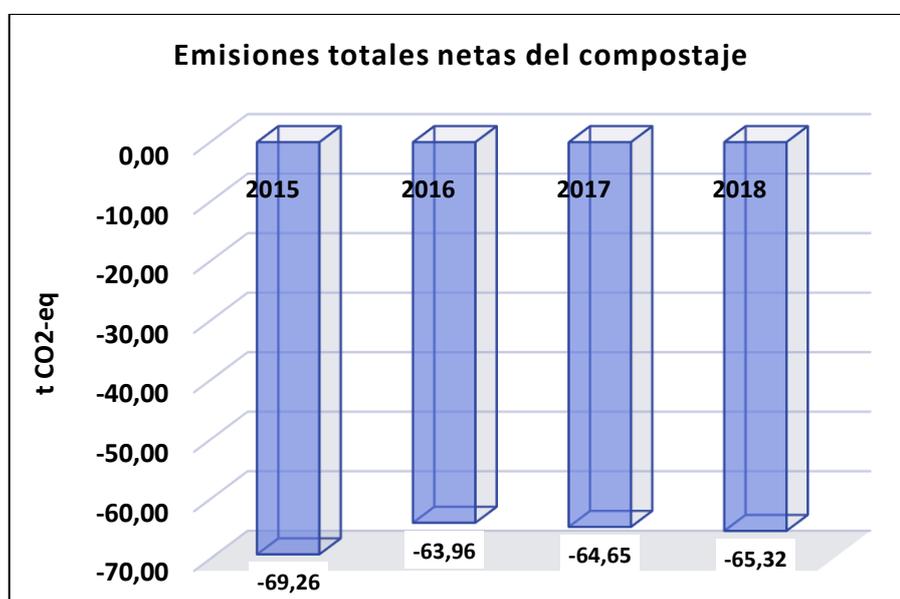
El cálculo de las emisiones totales netas para la actividad del compostaje, nos permite calcular las emisiones totales, como se muestra en la **tabla 31**.

Tabla 31: Emisiones totales netas del compostaje

| Tipo de emisión | Emisiones (t CO ₂ -eq) | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Emisiones | 753,18 | 695,52 | 703,07 | 710,39 |
| Emisiones evitadas | -822,44 | -759,48 | -767,72 | -775,72 |
| Σ Emisiones totales netas | -69,26 | -63,96 | -64,65 | -65,32 |

La **Gráfica 13** nos muestra las emisiones totales netas provenientes del compostaje de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 13: Emisiones totales netas de t CO₂ – eq. del compostaje del periodo 2015 al 2018



4.3.5. Resultados totales del inventario de emisiones de CO₂ – eq. por alcance

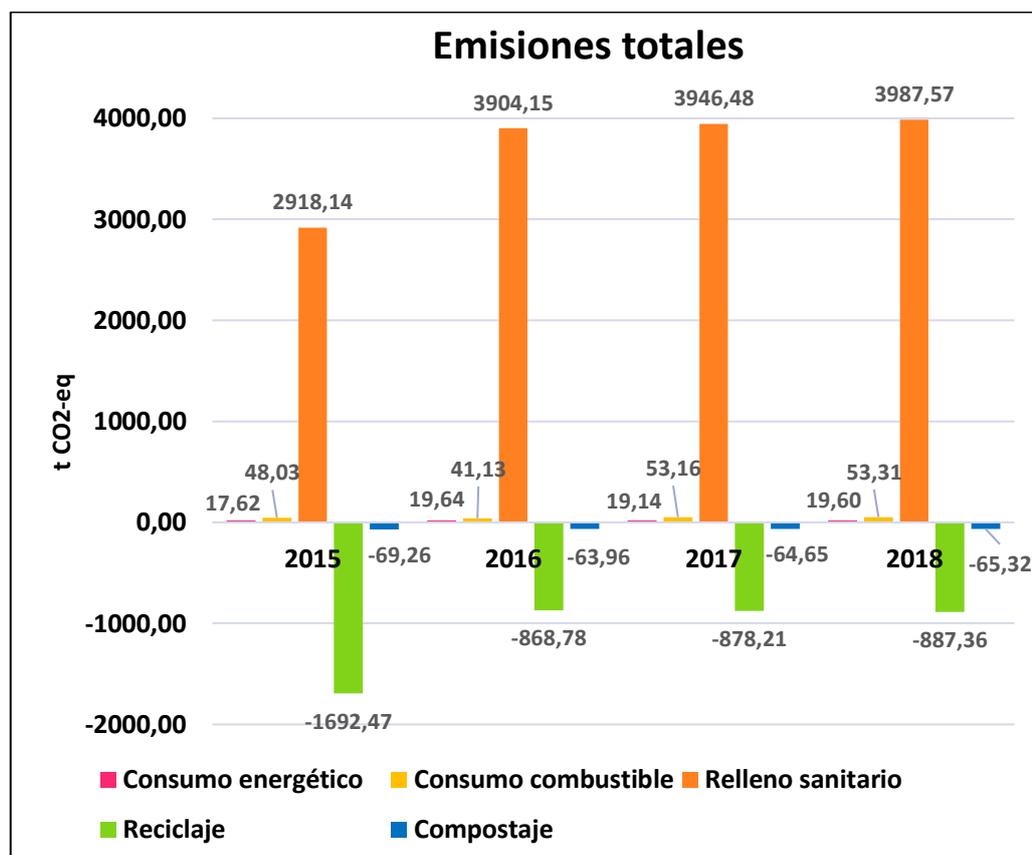
La huella de carbono o emisiones generales de CO₂ – eq. por alcance: I, II, III y emisiones evitadas de la PTRS de Pongor, durante el periodo comprendido del año 2015 al 2018, se puede observar en la **tabla 32**.

Tabla 32: Emisiones de CO₂ – eq generados por alcance

| Alcances | Emisiones de CO ₂ equivalente (tn CO ₂ -eq) | | | |
|---|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Alcance I | | | | |
| Emisiones móviles | 48,03 | 41,13 | 53,16 | 53,31 |
| Alcance II | | | | |
| Emisiones del consumo de energía | 17,62 | 19,64 | 19,14 | 19,60 |
| Alcance III | | | | |
| Emisiones de la disposición de RS en el relleno sanitario | 2918,14 | 3904,15 | 3946,48 | 3987,57 |
| Emisiones evitadas | | | | |
| Reciclaje | -1692,47 | -868,78 | -878,21 | -887,36 |
| Compostaje | -69,26 | -63,96 | -64,65 | -65,32 |
| Total de emisiones (tn CO₂-eq) | 1222,067 | 3032,177 | 3075,916 | 3107,789 |

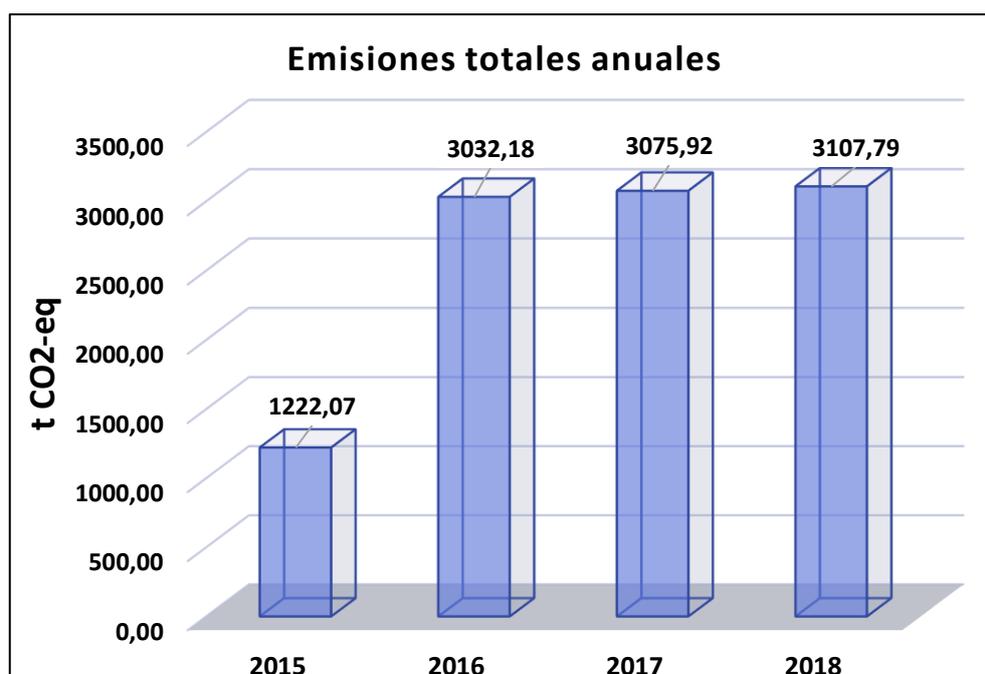
La **Gráfica 14** nos muestra las emisiones totales por tipo de alcance de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 14: Emisiones totales de CO₂ – eq por alcance



La **Gráfica 15** nos muestra las emisiones totales o globales anuales de los años 2015, 2016, 2017 y 2018.

Gráfica 15: Emisiones totales anuales de CO₂ – eq del periodo 2015 al 2018



4.4. Incertidumbre en la exactitud de datos de emisiones de GEI

El cálculo de la incertidumbre se define como el parámetro asociado del resultado de la cuantificación que caracteriza la dispersión de los valores que se podría atribuir a la cantidad cuantificada. Según los requisitos de la Norma ISO 14064-1:2016 indica que “se debería completar y documentar una evaluación de la incertidumbre para emisiones y remociones de GEI, incluyendo la incertidumbre asociada con los factores de emisión y remoción”. Cuando el cálculo cuantitativo de la incertidumbre de los datos no sea viable; se puede elegir el enfoque cualitativo para analizar el impacto de la incertidumbre de los datos. La incertidumbre de datos del cálculo de la huella de carbono se realizará siguiendo las siguientes consideraciones:

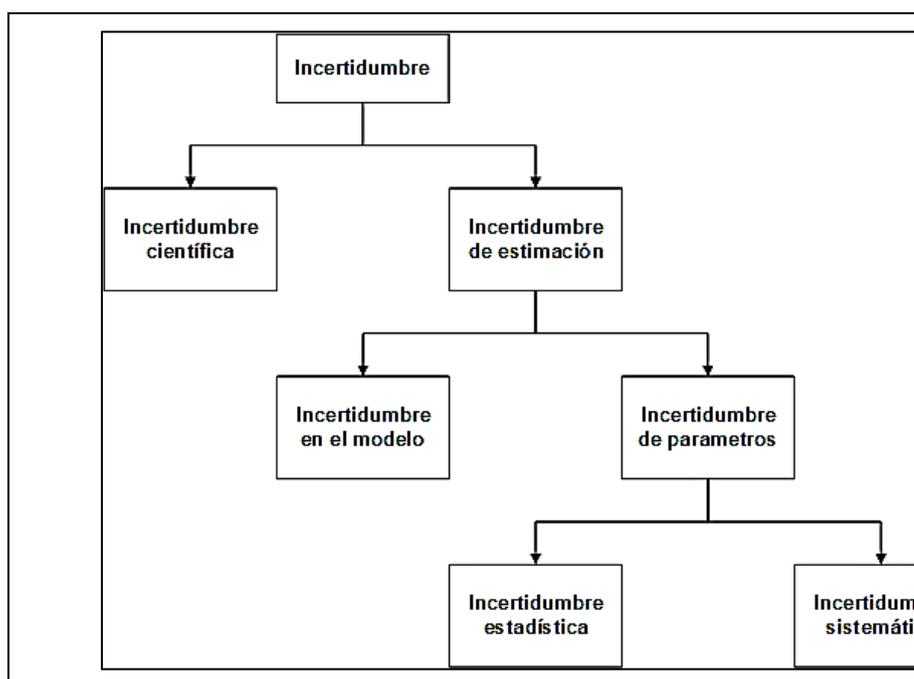
4.4.1. Identificación de los componentes de la incertidumbre

Existen diversos tipos de incertidumbre. Por ejemplo, se tiene la incertidumbre científica y la incertidumbre de estimación. Para el caso de la incertidumbre científica se genera cuando las metodologías del cálculo de la huella de carbono o emisiones de GEI se encuentra en un proceso de constante actualización, por lo que la evaluación de la incertidumbre

científica no es factible para alguna institución/organización por ser el campo de estudio del IPCC.

Para el caso de la incertidumbre de estimación, esta surge cuando se miden las emisiones de GEI, por lo que este cálculo siempre estará relacionado con este tipo de incertidumbre, a su vez se divide en incertidumbre de modelo e incertidumbre de los parámetros, La incertidumbre de modelo es aquella que es afín a modelos matemáticos y ecuaciones empleadas para relacionar parámetros o variables con los procesos de emisión. Sin embargo, este tipo de incertidumbre no es aplicable para el cálculo de emisiones en este estudio, adicionalmente por su dificultad técnica por lo cual no será considerada para la evaluación. Por otro lado, la incertidumbre de los parámetros surge para analizar datos de actividad y factores de emisión empleados en el cálculo de la huella de carbono. A su vez dentro de este parámetro se consideran otros dos parámetros como: la incertidumbre sistemática, la que se evalúa mediante el juicio de expertos y la incertidumbre estadística la que se evalúa mediante datos empíricos (Saavedra, 2017). En la **gráfica 16** se puede observar la clasificación o categorización de la incertidumbre.

Gráfica 16: Categorización de la incertidumbre



Fuente: Ihobe, 2015

Por lo expuesto anteriormente, cuando se quiera realizar una prueba de incertidumbre cuantitativa, se hará de forma estadística.

4.4.2. Evaluación cualitativa de los componentes de la incertidumbre

De no existir datos numéricos de la incertidumbre para los factores de emisión y los datos de actividad, se considerará el análisis cualitativo, teniendo como categorías de incertidumbre baja, media o alta; evaluando las fuentes de la incertidumbre. Los factores de emisión y datos de emisión del IPCC, así como del “Reporte anual de gases de efecto invernadero (RAGEI)” con información nacional, si considera un valor asociado de incertidumbre; es decir llevan un valor numérico asociado a su incertidumbre; para el caso de los demás factores de otras fuentes de información, no consideran un valor de incertidumbre de sus datos probablemente porque no se realizó el estudio al respecto.

Respecto a la incertidumbre asociada a los factores de emisiones, estos se pueden apreciar en la **Tabla 33**.

Tabla 33: Incertidumbre asociados a los factores de emisión

| Factor de emisión | Factor de emisión con valor asociado a su incertidumbre (documentos del IPCC y RAGEI-MINAM) | Factor de emisión sin valor asociado a su incertidumbre (documentos del Instituto Alemán de Investigación Energética y Ambiental de Heidelberg) |
|---|---|---|
| Factor de emisión de fuentes móviles | X | |
| Factor de emisión del consumo de energía | X | |
| Factor de emisión de la disposición de RS en el relleno sanitario | X | |
| Factores de emisiones y emisiones evitadas del reciclaje y compostaje | | X |

Fuente: adaptado de Saavedra, 2017, p. 172

Adicionalmente, de los datos de actividad empleados en las diferentes fuentes de emisión de GEI no se evidenció certificados de calibración en los que se pueda calcular numéricamente la incertidumbre asociada a cada uno de ellos; debido a que esta información no proviene de contadores que necesiten calibración; sin embargo, los datos de actividad provienen de informes y bases de datos de la Municipalidad Distrital de Independencia.

Por lo anteriormente expuesto, ya que no todos los factores de emisión tienen un valor asociado a su incertidumbre y que ninguno de los datos de actividad tiene un valor relacionado a su incertidumbre, se realizará una evaluación de incertidumbre de forma cualitativa para priorizar los esfuerzos destinados para reducir la incertidumbre; considerando los siguientes pasos:

a. Paso 1

Asignar a los factores de emisión un valor cualitativo asociado a su incertidumbre, considerando la fuente de la cual proviene de la siguiente forma:

- **Incertidumbre baja:** factores de emisión de documentos de IPCC.
- **Incertidumbre media:** factores de emisión de fuentes diferentes del IPCC, documentos nacionales que aplican solamente al Perú.
- **Incertidumbre alta:** documentos de fuentes diferentes al IPCC, que aplican a cualquier otro país.

En la **tabla 34** se observa el valor cualitativo asociado a la incertidumbre de los factores de emisión.

Tabla 34: Incertidumbre asociados a los factores de emisión

| Factor de emisión | Incertidumbre baja | Incertidumbre media | Incertidumbre alta |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|
| Factor de emisión de fuentes móviles | X | | |
| Factor de emisión del consumo de energía | X | | |
| Factor de emisión de la disposición de RS en el relleno sanitario | | X | |
| Factores de emisiones y emisiones evitadas del reciclaje y compostaje | | | X |

Fuente: adaptado de Saavedra, 2017, p. 172

b. Paso 2

Se asignará a los datos de actividad un valor cualitativo asociado a su incertidumbre dependiendo de la fuente de información de la cual provienen, se clasifica de la siguiente forma:

- **Incertidumbre baja:** datos de actividad provenientes de un recibo, boleta o factura entregado por el proveedor de servicios de la PTRS de Pongor.
- **Incertidumbre media:** datos de actividad proveniente de un informe o reporte detallado entregado por la PTRS de Pongor o la Municipalidad Distrital de Independencia.
- **Incertidumbre alta:** dato de actividad extrapolado de años anteriores o de proyectos externos a la organización a causa de la ausencia de datos.

En la **tabla 35** se observa el valor cualitativo asociado a la incertidumbre de los factores de emisión.

Tabla 35: Incertidumbre asociados a los datos de actividad

| Alcance | Dato de actividad | Incertidumbre baja | Incertidumbre media | Incertidumbre alta |
|--------------------|--|--------------------|---------------------|--------------------|
| Alcance I | Consumo de combustible | X | | |
| Alcance II | Consumo de energía eléctrica | X | | |
| Alcance III | Disposición de RS en el relleno sanitario (kg) | | X | |
| Emisiones evitadas | Reciclaje y compostaje (kg) | | X | |

Fuente: adaptado de Saavedra, 2017, p. 173

c. Paso 3

Adicionalmente, luego de evaluar la incertidumbre de los factores de emisión y los datos de actividad, obtenemos el valor final de la incertidumbre, se puede observar en la tabla 35:

Tabla 36: Matriz para determinar la incertidumbre resultante cualitativa

| | | Incertidumbre del factor de emisión | | |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|------|
| | | Alta | Media | Baja |
| Incertidumbre del dato de actividad | Alta | A | A | M |
| | Media | A | M | B |
| | Baja | M | B | B |

Fuente: adaptado de Saavedra, 2017, p. 173

Donde:

- A:** Incertidumbre alta.
- M:** Incertidumbre media.
- B:** Incertidumbre baja.

Considerando la evaluación de la matriz de la tabla 35, aplicamos los criterios de evaluación cualitativa de incertidumbre para el inventario de GEI dentro del alcance de la PTRS de Pongor, como se puede observar en la **Tabla 37**.

Tabla 37: Evaluación cualitativa de la Incertidumbre del inventario de GEI

| Alcance | Dato de actividad | Incertidumbre resultante |
|--------------------|---|--------------------------|
| Alcance I | Consumo de combustible | B |
| Alcance II | Consumo de energía eléctrica | B |
| Alcance III | Disposición de RS en el relleno sanitario | M |
| Emisiones evitadas | Reciclaje y compostaje | A |

4.4.3. Adopción de medidas para gestionar la incertidumbre

De la evaluación cualitativa de la incertidumbre del inventario de GEI, las fuentes de emisión de reciclaje y compostaje, fue la que presentó un nivel alto de incertidumbre, para lo cual se proponen medidas para gestionar la incertidumbre.

4.4.3.1. Reciclaje y compostaje

De las actividades de reciclaje y compostaje, luego del análisis de incertidumbre cualitativos se identificó que los datos de la actividad fueron obtenidos de los informes que la Municipalidad Distrital de Independencia emite anualmente a la plataforma del “Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL)” del Ministerio del Ambiente y son de libre acceso y descarga. Este tipo de reporte se realiza anualmente de manera formal por disposición del ente sectorial en este caso el Ministerio del Ambiente; por lo tanto, la

incertidumbre respecto a los datos de actividad no se puede reducir de forma práctica.

Respecto a los factores de emisión, se usaron los factores propuestos por el Instituto Alemán de Investigación Energética y Ambiental de Heidelberg, que fueron considerados para el cálculo de las emisiones y emisiones evitadas. Dentro del capítulo de desechos de las guías del IPCC, no se consideran los factores de emisión y emisiones evitadas para reciclaje y compostaje. De forma similar no existen factores de emisión y emisiones evitadas para reciclaje y compostaje nacionales, es por ello que se emplearon los factores propuestos por el Instituto Alemán de Investigación Energética y Ambiental de Heidelberg.

Como medida para reducir la incertidumbre de esta fuente de emisión, se recomienda actualizar los factores de emisión y emisiones evitadas de reciclaje y compostaje, toda vez que el IPCC o el MINAM publiquen un estudio actualizado o justifiquen el uso de algún otro factor.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para realizar la evaluación de la huella de carbono bajo las consideraciones de la Norma ISO 14064-1:2016, se calcularon las emisiones de carbono dentro del alcance operativo de la Planta de tratamiento de residuos sólidos de Pongor. En el presente capítulo se discutirán los resultados obtenidos en el presente estudio.

5.1. Alcance I

5.1.1. Fuentes móviles o consumo de combustible

Con respecto a las fuentes móviles o el consumo de combustible de las cuatro unidades vehiculares operadas en la PTRS y el relleno sanitario de Póngor, cabe señalar que el minicargador se opera para la PTRS de Póngor, mientras que las otras tres unidades son operadas en el relleno sanitario; son abastecidos por combustible diésel B5. Se calculó la huella de carbono del consumo de combustible para el periodo comprendido entre los años del 2015 al 2018. De lo cual el resultado más bajo fue para el año 2016, cuya emisión fue de 41,13 tn CO₂-eq; sin embargo, para el año 2018 se observan las emisiones más altas con 53,31 tn CO₂-eq; de ello se deduce que este incremento es debido al consumo de combustible a partir del año 2016, ya que en este año se incorporó una nueva unidad vehicular “Volquete Volvo” a las operaciones. Y también por el incremento anual de RSM que ingresan para su tratamiento a la PTRS y relleno sanitario de Pongor.

5.2. Alcance II

5.2.1. Consumo de energía eléctrica

Para el caso de las emisiones provenientes del consumo de energía de la PTRS de Póngor, se realizó el cálculo de la huella de carbono para el periodo comprendido entre los años 2015 al 2018, considerando que la generación de energía suministrada proviene de fuentes no renovables (MINAM, 2010a). Se observa que la huella de carbono más baja corresponde al año base 2015, con 17,6 tn CO₂-eq. Mientras que la huella de carbono más alta por consumo energético corresponde al año 2018 con 19,59 tn CO₂-eq. Se deduce que este incremento anual de las emisiones es debido al aumento de RSM que ingresan a la PTRS de Póngor y que se tratan en los procesos operativos, incrementando el consumo de energía.

5.3. Alcance III

5.3.1. Disposición final de RSM no aprovechables en el relleno sanitario

La evaluación de la huella de carbono de la disposición final de los residuos sólidos no aprovechables en el relleno sanitario, se determinó que las emisiones más bajas corresponden para el año base 2015 con 2918,14 tn CO₂-eq, mientras que las emisiones más altas corresponden al año 2018 con 3987,57 tn CO₂-eq. Se considera que este incremento anual se da por una relación directamente proporcional con el incremento del ingreso de RSM al relleno sanitario, debido a la generación de RSM y al crecimiento poblacional. Las emisiones significativas corresponden a las emisiones de metano CH₄, que provienen de la descomposición anaerobia de los residuos del relleno sanitario y se emiten en mayor grado si no se realiza la combustión en antorchas o si no se recuperan para producir electricidad o calor. De forma similar para el estudio desarrollado en el Cantón de San José de Costa Rica se obtuvo una huella de carbono de 523,5 tn CO₂-eq, para el año 2015, considerando que cierto porcentaje de los RSM no aprovechables son incinerados y que la cantidad de RSM es mucho menor que la cantidad generada en nuestro caso de estudio (Murillo et al., 2018).

5.4. Emisiones evitadas

5.4.1. Reciclaje

El cálculo de emisiones totales netas evitadas para la actividad de reciclaje de residuos sólidos reaprovechables como papel, cartón, plástico, vidrio, metales y textiles de la PTRS de Póngor, nos dio como resultado la huella de carbono más baja para el año base 2015 con -1692,47 tn CO₂-eq; es decir, se generaron ahorros de 1692,47 tn CO₂-eq, lo que representa la cantidad de CO₂-eq en toneladas que se evitó verter a la atmósfera gracias a la práctica del reciclaje, logrando reincorporar materiales al ciclo de producción, evitando de esta manera la extracción de nueva materia prima y virgen. Con una cifra relativamente menor, el estudio desarrollado en el año 2017 en Rumania, se calculó la huella de carbono del reciclaje de RSM y se obtuvo un ahorro sobre las 40,00 tn CO₂-eq, que se evitaron verter a la atmósfera (Berechet et al., 2019).

5.4.2. Compostaje

De la evaluación de las emisiones totales netas evitadas de las actividades del compostaje en la PTRS de Póngor, se obtuvo la huella de carbono más baja para el año base 2015 con -69,26 tn CO₂-eq; es decir, se generaron ahorros de 69,26 tn CO₂-eq, lo cual representa el almacenamiento de carbono en el suelo, que contribuye a reducir la cantidad de GEI emitido a la atmósfera; el compost contiene materia orgánica que fija el carbono, es decir contribuye al secuestro de carbono.

5.5. Resultados totales del inventario de emisiones de CO₂ – eq.

De los resultados de las emisiones totales obtenidas de los alcances y las actividades como reciclaje y compostaje, se evidencia que la huella de carbono más alta proviene del Alcance III o de las emisiones provenientes de la disposición de residuos sólidos no aprovechables en el relleno sanitario para el periodo comprendido del año 2015 al 2018 con: 2918,14 tn CO₂-eq para el 2015; 3904,15 tn CO₂-eq para el 2016; 3946,48 tn CO₂-eq para el 2017 y 3987,57 tn CO₂-eq para el 2018. Por otro lado, como resultado del reciclaje se evitó emitir emisiones de GEI a la atmósfera; y se obtuvo la huella de carbono más baja para el periodo comprendido entre el año 2015 al 2018 con: -1692,47 tn CO₂-eq para el 2015; tn

-868,78 tn CO₂-eq para el 2016; -878,21 tn CO₂-eq para el 2017 y -887,36 tn CO₂-eq para el 2018.

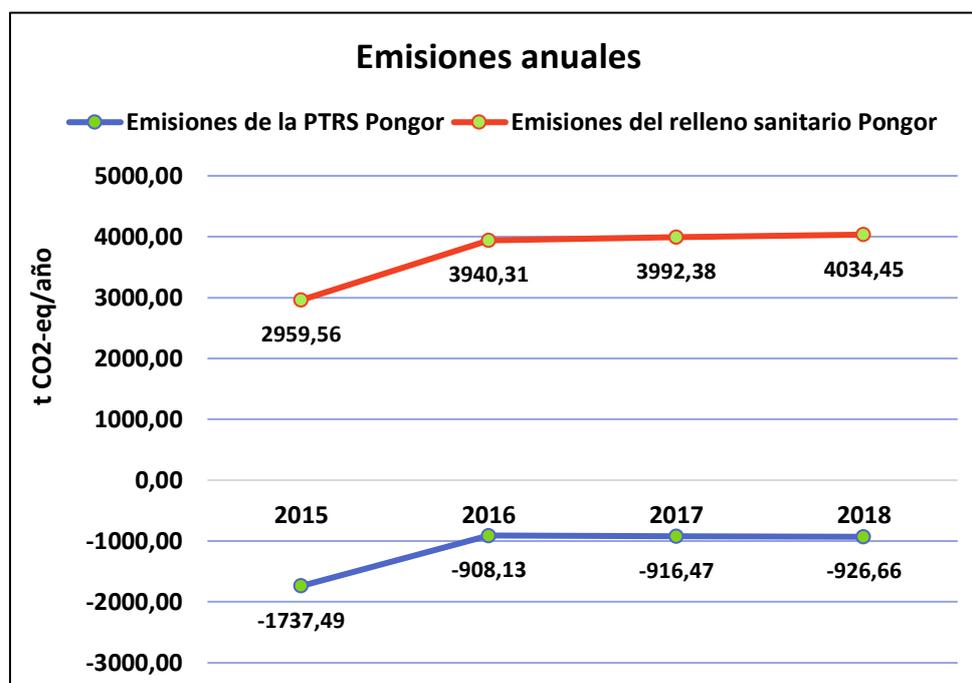
Para el caso del contraste de la huella de carbono de la PTRS entre el relleno sanitario de Pongor; para la PTRS de Póngor, se consideraron las emisiones provenientes del consumo de combustible (consumido por el minicargador, que es operado en la PTRS), el consumo energético, reciclaje y compostaje; por otro lado, para el caso del relleno sanitario de Póngor se consideraron las emisiones generadas por el consumo de combustible de las tres unidades vehiculares y las emisiones provenientes del mismo relleno sanitario. Las emisiones anuales se observan en la **tabla 38**.

Tabla 38: Emisiones anuales de la PTRS y relleno sanitario de Pongor

| Área | Emisiones anuales (tn CO ₂ -eq) | | | |
|---------------------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| PTRS Pongor | -1737,49 | -908,13 | -916,47 | -926,66 |
| Relleno sanitario Pongor | 2959,56 | 3940,31 | 3992,38 | 4034,45 |
| Emisiones Totales | 1222,067 | 3032,177 | 3075,916 | 3107,789 |

De la evaluación entre la PTRS y el relleno sanitario de Póngor, se observa que la huella de carbono más baja corresponde a la PTRS de Póngor, siendo las emisiones de -1737,49 tn CO₂-eq para el año 2015; -908,13 tn CO₂-eq para el año 2016; -916,47 tn CO₂-eq para el año 2017 y -926,66 tn CO₂-eq para el año 2018. Por el contrario, el relleno sanitario presenta las emisiones más altas, siendo las emisiones de 2959,56 tn CO₂-eq para el año 2015; 3940,31 tn CO₂-eq para el año 2016; 3992,38 tn CO₂-eq para el año 2017 y 4034,45 tn CO₂-eq para el año 2018. Se puede observar las emisiones de ambos escenarios y su evolución anual en la **gráfica 17**.

Gráfica 17: Emisiones anuales de la PTRS y relleno sanitario de Pongor



5.6. Resultados totales anuales del inventario de emisiones de CO₂ – eq.

Respecto a la evaluación anual de las emisiones de la PTRS de Póngor para el periodo comprendido entre los años 2015 al 2018; observando que de acuerdo a la **gráfica 15**, la huella de carbono más baja corresponde al año base 2015 con 1222,07 tn CO₂-eq; por otro lado; la huella de carbono más alta corresponde al año 2018 con 3107,79 tn CO₂-eq. Se evidencia que existe un crecimiento gradual de la huella de carbono de la PTRS de Pongor, con un punto de quiebre desde el año 2016 con 3032,18 tn CO₂-eq. Se observa que este crecimiento de la huella de carbono se da a causa del incremento de la disposición de residuos sólidos municipales no aprovechables, los cuales se disponen finalmente al relleno sanitario; debido a la digestión anaerobia se emiten cantidades significativas de metano, que provocan el incremento de la huella de carbono; esto debido también al incremento de la generación de RSM como consecuencia del crecimiento poblacional del distrito de Independencia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Finalmente se presentan las conclusiones más importantes de la investigación, obtenidas a partir de la evaluación de la huella de carbono de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos de Póngor. De los resultados obtenidos de la investigación, las principales conclusiones son:

- PRIMERA. Los resultados permitieron atender a las interrogantes inicialmente planteadas, sobre la huella de carbono de la PRTS de Póngor, en base a los alcances establecidos dentro de los límites operativos identificados siguiendo los criterios de la Norma ISO 14064-1:2016 correspondiente al periodo comprendido entre los años 2015 al 2018.
- SEGUNDA. Se calculó la huella de carbono de la PTRS de Póngor donde se desarrollan actividades como reciclaje y compostaje, que según los resultados (**Tabla 37**), estos procesos operativos tienen potencial para contribuir con la reducción de las emisiones de GEI; y en el periodo comprendido entre los años 2015 al 2018 generaron menor impacto en cuanto a emisiones de CO₂-eq; siendo prácticas favorables, ya que ahorran el vertimiento de -4590,01 tn CO₂-eq hacia la atmósfera y tienen el potencial para contribuir con la reducción de las emisiones de GEI, a la vez que contribuyen con la mitigación del cambio climático.
- TERCERA. Así mismo, se evaluaron las emisiones provenientes del relleno sanitario de Pongor para el periodo comprendido entre 2015 al 2018, siendo el

proceso que generó la huella de carbono más alta y según los resultados (**Tabla 37**) se obtuvieron 14756,33 tn CO₂-eq en total.

- CUARTA. Los resultados muestran, además, que la huella de carbono más alta corresponde al año 2018 con 3107,789 tn CO₂-eq, en comparación con la huella de carbono más baja correspondiente al año base 2015 con 1222,067 tn CO₂-eq (**Gráfica 15**); se deduce que esta diferencia e incremento anual de la huella de carbono se debe al crecimiento poblacional y consecuentemente el incremento de la generación de RSM que ingresan a la PTRS y al relleno sanitario de Pongor.
- QUINTA. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el desarrollo de acciones que fortalecen el reciclaje y compostaje de residuos como alternativas a la disposición final de RSM en el relleno sanitario, representan una oportunidad para reducir las emisiones de GEI o la huella de carbono, las cuales son soluciones que contribuyen a reducir los impactos para el medio ambiente y la salud humana.

6.2. Recomendaciones

Es importante continuar con los esfuerzos que contribuyen hacia el reciclaje y compostaje de los RSM, también en la misma dirección de minimizar la disposición de los RSM no aprovechables que se destinan hacia el relleno sanitario.

El comportamiento en la segregación de residuos por parte de la población puede influir en la calidad de estos materiales a ser reciclados, por lo que es muy importante educar, incentivar y apoyar a la población en la jerarquía del manejo de residuos; basándose en la prevención de la generación, el reúso, el fomento de la segregación para reciclaje y compostaje y finalmente la disposición final. De tal forma que, al reducir los residuos ingresantes al relleno sanitario, se reducirá el impacto de las emisiones provenientes del mismo.

Así mismo los resultados presentados en esta investigación pueden ser empleadas para aportar información valiosa para la planificación y desarrollo de futuras estrategias de gestión de RSM y pueden apoyar a optimizar su gestión.

Adicionalmente, se recomienda desarrollar más investigaciones a nivel local con la finalidad de generar más factores de emisión, en particular se debería enfocar esfuerzos en investigar a más detalle los contextos locales de la gestión de RSM de las municipalidades peruanas, donde los rellenos sanitarios cuenten con un factor de emisión de acuerdo a sus propias características operativas.

Se recomienda que el relleno sanitario cuente con un sistema de monitoreo de emisiones de gases con lo cual se tendría la información anual de la misma fuente. Con la finalidad de gestionar las emisiones de GEI y planificar un promedio de reducciones anuales. Como es el caso de dos proyectos que gestionaron en el año 2014 la reducción de sus emisiones y aplicaron a los beneficios del mercado de carbono, ambos proyectos se registraron en el marco del “Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto”: El relleno sanitario de Huaycoloro y el relleno sanitario modelo del Callao, los cuales cuentan con reportes de monitoreo que fueron verificados por una entidad operacional designada (entidad que es aprobada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático o CMNUCC), con la finalidad de certificar la reducción de sus emisiones de GEI (MINAM, 2017).

Así mismo se recomienda que se realice una constante quema del biogás proveniente del relleno sanitario; ya que reduce el efecto de diversos contaminantes en el ambiente, pues si muy por el contrario el biogás se emite directamente a la atmósfera se convierte en un punto crítico en cuanto a la emisión de contaminantes; también porque esta medida contribuye al cumplimiento del Acuerdo de París. Para condiciones futuras se podría implementar sistemas de generación de energía en el relleno sanitario, los cuales son de dos tipos; siendo el primero la construcción de una planta de recuperación de energía en las instalaciones del relleno y la segunda podría ser el transporte del biogás generado en el relleno por medio de tuberías a industrias u organizaciones cercanas que puedan emplear el biogás para generar energía. Según la literatura e investigaciones realizadas, la recuperación de energía es la medida que brinda mayores beneficios ambientales; sin embargo su implementación demanda altos costos de inversión, no sería viable para rellenos sanitarios medianos o pequeños que reciben una cantidad menor a 200 toneladas de residuos diarios (Ziegler Rodríguez, 2019).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, Y. R. V., de Góis, M. L., Junior, L. M. C., & Carvalho, M. (2018). Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(2), 1863-1868.
- Berechet, M., Mirel, I., Staniloiu, C., & Fischer, K. (2019). CARBON FOOTPRINT OF WASTE MANAGEMENT IN ROMANIA IN THE CONTEXT OF CIRCULAR ECONOMY. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 18(6).
- Dávila, J. L. (2017). *Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector residuos sólidos—Ministerio de Ambiente (MINAM)*.
<http://sial.segat.gob.pe/documentos/reduccion-emisiones-gases-efecto-invernadero-sector-residuos-solidos>
- Defensoría del Pueblo (Perú) (Ed.). (2019). *¿Dónde va nuestra basura? Recomendaciones para mejorar la gestión de los residuos sólidos municipales*.
- Dong, J., Chi, Y., Zou, D., Fu, C., Huang, Q., & Ni, M. (2014). Comparison of municipal solid waste treatment technologies from a life cycle perspective in China. *Waste Management & Research*, 32(1), 13-23.
- D-Waste. (2014). *The world's 50 biggest dumpsites*. D-Waste. <https://www.d-waste.com/d-waste-news/item/263-the-world-s-50-biggest-dumpsites-official-launching-of-the-2nd-waste-atlas-report.html>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Circular Economy Reports—Towards the Circular Economy Vol. 2*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods-sector>
- Eriksson, M., Strid, I., & Hansson, P.-A. (2015). Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy—a Swedish case study. *Journal of Cleaner Production*, 93, 115–125.

- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información tecnológica*, 23(1), 163-176.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Friedrich, E., & Trois, C. (2016). Current and future greenhouse gas (GHG) emissions from the management of municipal solid waste in the eThekweni Municipality – South Africa. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4071-4083.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.118>
- Google Earth. (2020). *Vista satelital de la PTRS de Pongor y sus inmediaciones*.
- Grau, J., Terraza, H., Rodríguez Velosa, D. M., Rihm, A., Sturzenegger, G., Sosa, M., Powell, A., Ardanaz, M., Larios, J., & Pérez Trejo, C. A. (2015). Situación de la gestión de Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe. *BID*. Obtenido de https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion_de_la_gestion_de_residuos_solidos_en_America_Latina_y_el_Caribe.pdf.
- Graziani, P. (2018). *Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: Oportunidades en América Latina*. CAF.
<https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1247>
- Grupo DISTRILUZ. (2020). *DISTRILUZ Memoria anual 2019*. (p. 64).
<https://www.distriluz.com.pe/ensa/images/nosotros/docs/memoria-DISTRILUZ-Español-2019.pdf>
- Houghton, E. (1996). *Climate change 1995: The science of climate change: Contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 2)*. Cambridge University Press.
- Huerta Esquivel, V. J., & Popayán Valverde, E. M. (2018). Determinación de la huella ecológica en la comunidad universitaria “Santiago Antunéz de Mayolo”, campus universitario de Shancayán—Período anual 2014. *Universidad Nacional Santiago Antunéz de Mayolo*.
<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2450>

- ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Giegrich, J., & Vogt, R. (2009). *Calculadora MRS-GEI: herramienta de cálculo de gases de efecto invernadero (GEI) en el manejo de residuos sólidos (MRS)*. KfW Bankengruppe. Departamento de Comunicación; ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/2009_Manual_SWM-GHG-Calculator_spanisch.pdf
- Ihobe, Sociedad pública de gestión ambiental | Gobierno Vasco. (2015, noviembre 10). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DE LA NORMA UNE-ISO 14064-1:2006*. <https://www.euskadi.eus/manual/guia-metodologica-para-la-aplicacion-de-la-norma-une-iso-14064-1-2006/web01-a2ingkli/es/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Technical Summary. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H.L. (Eds.)). <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Summary for Policymakers. Qin D, T.F., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.), pp. 2-10). Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change, & Edenhofer, O. (Eds.). (2014). *Climate change 2014: Mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Capítulo 5: Desechos* (p. 35).
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/5_Waste_ES.pdf
- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006a). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero— Volumen 5: Desechos: Vol. 5: Desechos*. IGES. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5_Volume5/V5_2_Ch2_Waste_Data.pdf
- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2006b). *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero—Volumen 2: Energía: Vol. 2: Energía*. IGES. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis, Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático*. IPCC - Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- ISWA—International Solid Waste Association. (2009). *Waste and climate change, ISWA White Paper*.
- Jeswani, H. K., Smith, R. W., & Azapagic, A. (2013). Energy from waste: Carbon footprint of incineration and landfill biogas in the UK. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(1), 218-229.
- Kanemoto, K., Moran, D., & Hertwich, E. G. (2016). Mapping the Carbon Footprint of Nations. *Environmental Science & Technology, 50*(19), 10512-10517.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03227>

- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. The World Bank.
- Malakahmad, A., Abualqumboz, M. S., Kutty, S. R. M., & Abunama, T. J. (2017). Assessment of carbon footprint emissions and environmental concerns of solid waste treatment and disposal techniques; case study of Malaysia. *Waste Management*, *70*, 282-292.
- Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., & Scharff, H. (2009). Landfilling of waste: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, *27*(8), 825-836.
<https://doi.org/10.1177/0734242X09348529>
- Menikpura, S. N. M., Sang-Arun, J., & Bengtsson, M. (2013). Integrated solid waste management: An approach for enhancing climate co-benefits through resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, *58*, 34-42.
- MINAM, & NEFCO. (2013). *Informe: Diagnóstico del Sistema SIGERSOL*.
<http://www.ods.org.pe/material-de-consulta/34-programa-nama-residuos-solidos-sigersol-diagnostico-minam/file>
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2010). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) 2012, 2005 y actualización de INGEI 2010 y 2000*. (p. 365). Ministerio del Ambiente. https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/2010_2000.pdf
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2012a). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero con año base 2012 (INGEI 2012)*. <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2012/#:~:text=Inventario%20nacional%20de%20gases%20de%20efecto%20invernadero%202012&text=Tal%20como%20se%20muestra%20en,el%2051%25%20del%20INGEI%202012.>

- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2012b). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI) 2012—Combustión móvil* (p. 321). <https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/2012.pdf>
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2016a). *Guía N° 4:Elaboración del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero—Sector Desechos* [Text]. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-ndeg-4elaboracion-reporter-anual-gases-efecto-invernadero-sector>
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2016b). *La Contribución Nacional del Perú - iNDC: Agenda para un desarrollo climáticamente responsable*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/306218-la-contribucion-nacional-del-peru-indc-agenda-para-un-desarrollo-climaticamente-responsable>
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2017). *Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del sector Desechos del año 2014. Categoría: Disposición de desperdicios sólidos en tierra*. https://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/09/RAGEI_RRSS_VERSION-FINAL-1.pdf
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2019). INGEI 2014. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero del año 2014 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010 y 2012. *Infocarbono*. <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2014/>
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2020). *Listado de rellenos sanitarios y de seguridad*. Plataforma única digital del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/279709-listado-de-rellenos-sanitarios-a-nivel-nacional>

- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2019). *Listado de rellenos sanitarios a nivel nacional*.
Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos. <http://www.minam.gob.pe/gestion-de-residuos-solidos/listado-de-rellenos-sanitarios-a-nivel-nacional/>
- Ministerio para la Transición Ecológica. (2018). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. (p. 52). Ministerio para la Transición Ecológica. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado. <https://cpage.mpr.gob.es/>
- Mohee, R., Mauthoor, S., Bundhoo, Z. M., Somaroo, G., Soobhany, N., & Gunasee, S. (2015). Current status of solid waste management in small island developing states: A review. *Waste management*, 43, 539-549.
- Mohsen, R. A., Abbassi, B., Dutta, A., & Gordon, D. (2019). Carbon Footprint of Municipal Solid Waste Management in Guelph City, Ontario. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 45(4), 441-449.
- Municipalidad Distrital de Independencia. (2014). *Plan de manejo de residuos sólidos del distrito de independencia 2014—2021*.
- Municipalidad Distrital de Independencia. (2016). *Estudio de caracterización de residuos sólidos 2016 de la Municipalidad Distrital de Independencia*. [Informe Anual].
- Murillo, J. H., Marín, J. F. R., & Leitón, D. A. (2018). Emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes criterio derivados de diferentes medidas de mitigación en la gestión de residuos sólidos urbanos del cantón de San José, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 94-109.
- Nelles, M., Gruenes, J., & Morscheck, G. (2016). Waste management in Germany—development to a sustainable circular economy. *Procedia Environmental Sciences*, 35(6), 14.
- OEFA. (2014, diciembre 31). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de gestión municipal provincial*. <https://www.oefa.gob.pe/publicaciones/libro-residuos-solidos/>

- Orihuela, J. (2018). Un Análisis de la Eficiencia de la Gestión Municipal de Residuos Sólidos en el Perú y sus Determinantes. *Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.*
- Pachauri, R. K., Meyer, L. A., & Stocker, T. (2014). IPCC 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. *Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de evaluación del panel intergubernamental sobre el cambio climático. IPCC, Ginebra, CHE.*
- Pérez, J., de Andrés, J. M., Lumbreras, J., & Rodríguez, E. (2018). Evaluating carbon footprint of municipal solid waste treatment: Methodological proposal and application to a case study. *Journal of Cleaner Production, 205*, 419-431.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.103>
- Pérez Rodríguez, J., Andrés Almeida, J. M. de, Lumbreras Martín, J., & Rodríguez Hurtado, M. E. (2016). Huella de carbono de los tratamientos de gestión de residuos municipales: Comparación entre distintos escenarios de gestión. *13º Congreso Nacional de Medio Ambiente - CONAMA 2016. Comunicaciones técnicas*, 1-25.
<http://www.conama2016.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=406&id=1098&op=view>
- Petramás. (s. f.). *De la basura a la electricidad: Huaycoloro, la primera experiencia peruana.*
<https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/SeminarioIntEFERP/Jueves%2006.10.2011/2.%20De%20la%20basura%20a%20la%20ElectricidadJorge%20-%20Jorge%20Zegarra.pdf>
- PETROPERÚ. (2019). *Caracterización de combustibles: Biodiésel-Diesel B5.* Portal PETROPERÚ.
<https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/biodiesel/>
- Pour l'Environnement, E. (2010). *Protocolo para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos.*
- Pulgar-Vidal, M. (2016). *La COP21 y el Acuerdo de París | Lima COP20 | CMP 10.*
<http://www.cop20.pe/29428/la-cop21-y-el-acuerdo-de-paris/>

- Red Peruana de Ciclo de Vida (PELCAN). (2019). *Proyecto IKI-PNUMA. Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía baja en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados en Perú. Actividad 9: Rellenos Sanitarios*. https://red.pucp.edu.pe/cicludevida/wp-content/uploads/2020/05/documento_c.pdf
- Saavedra, K. (2017). *Cálculo de la huella de carbono de EDEGEL S.A.A. en el año 2014, según metodología de la norma ISO 1406-1* [Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas.]. <https://hdl.handle.net/11042/3161>
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.
- Soliz Torres, M. F., & Acosta, A. (2017). *Ecología política de la basura: Pensando los residuos desde el Sur*. Quito: Abya Yala; Instituto de Estudios Ecologistas del Tercer Mundo. <http://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/6068>
- Suazo Páez, B. (2017). *Economía circular en Chile: Alcances, problemas y desafíos en la gestión de la ley REP*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146815>
- Syeda, A. B., Jadoon, A., & Nawaz Chaudhry, M. (2017). Life cycle assessment modelling of greenhouse gas emissions from existing and proposed municipal solid waste management system of Lahore, Pakistan. *Sustainability*, 9(12), 2242.
- UNFCCC, O. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *FCCC/INFORMAL/84*.
- United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). (1993). *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development; Rio Declaration on Environment; Statement of Forest Principles. The Final Text of Agreements Negotiated by Governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 3-14 June, Rio de Janeiro, Brazil*. HM Stationery Office.

- United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC). (s. f.). *MANUAL DEL SECTOR DE LA ENERGÍA: Quema de Combustibles. Grupo Consultivo de Expertos Sobre las Comunicaciones Nacionales de las Partes No Incluidas en el Anexo I de la Convención (GCE)*. UNFCCC.
- Valderrama, J. O., Espíndola, C., & Quezada, R. (2011). Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias. *Formación universitaria*, 4(3), 3-12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062011000300002>
- Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers.
- Weitz, K. A., Thorneloe, S. A., Nishtala, S. R., Yarkosky, S., & Zannes, M. (2002). The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(9), 1000-1011.
- Williams, I., Kemp, S., Coello, J., Turner, D. A., & Wright, L. A. (2012). A beginner's guide to carbon footprinting. *Carbon Management*, 3(1), 55-67. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.80>
- Wright, L. A., Coello, J., Kemp, S., & Williams, I. (2011). Carbon footprinting for climate change management in cities. *Carbon Management*, 2(1), 49-60. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.41>
- Wright, L. A., Kemp, S., & Williams, I. (2011). 'Carbon footprinting': Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2(1), 61-72. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.39>
- Zabeo, A., Bellio, C., Pizzol, L., Giubilato, E., & Semenzin, E. (2017). Carbon footprint of municipal solid waste collection in the treviso area (italy). *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(8), 1781-1787.

Ziegler Rodríguez, K. E. (2019). Evaluación ambiental por medio del análisis de ciclo de vida del relleno sanitario del distrito de Nauta, en Loreto. *Repositorio de Tesis - PUCP*.

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13847>

Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019).

Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 229, 989-1003.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.015>



ANEXO

ANEXO A

MATRIZ DE CÁLCULO

ALCANCE I: FUENTES MÓVILES

(CONSUMO DE COMBUSTIBLE)



Tabla A.1. Cuantificación de emisiones - Alcance I: Fuentes Móviles (Consumo de combustible)

| Año | Unidad Vehicular | Consumo (95%) (Diesel B5) (gal) | Factor de conversión (TJ / gal) | consumo (TJ) | Factores de emisión para Diesel B5 | | | Cálculo de emisiones de GEI | | | Emisiones totales (tn CO ₂ -eq) |
|------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|---|---|--|--|---|--|--|
| | | | | | Factor de emisión de CO ₂ (Kg CO ₂ /TJ) | Factor de emisión de CH ₄ (Kg CH ₄ /TJ) | Factor de emisión de N ₂ O (Kg N ₂ O / TJ) | Emisiones de CO ₂ (Gg CO ₂) | Emisiones de CH ₄ (t CH ₄) | Emisiones de N ₂ O (t N ₂ O) | |
| 2015 | Tractor agrícola | 1294,31800 | 0,00014 | 0,17595 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,01304 | 0,00069 | 0,00069 | 13,265 |
| | Tractor Oruga | 2746,45000 | 0,00014 | 0,37336 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,02767 | 0,00146 | 0,00146 | 28,148 |
| | Mini Cargador | 646,00000 | 0,00014 | 0,08782 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00651 | 0,00034 | 0,00034 | 6,621 |
| | Volquete | 0,00000 | 0,00014 | 0,00000 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,000 |
| 2016 | Tractor agrícola | 148,77125 | 0,00014 | 0,02022 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00150 | 0,00008 | 0,00008 | 1,525 |
| | Tractor Oruga | 2994,71587 | 0,00014 | 0,40711 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,03017 | 0,00159 | 0,00159 | 30,692 |
| | Mini Cargador | 484,50000 | 0,00014 | 0,06586 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00488 | 0,00026 | 0,00026 | 4,966 |
| | Volquete | 384,75000 | 0,00014 | 0,05230 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00388 | 0,00020 | 0,00020 | 3,943 |
| 2017 | Tractor agrícola | 964,25000 | 0,00014 | 0,13108 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00971 | 0,00051 | 0,00051 | 9,882 |
| | Tractor Oruga | 3030,50000 | 0,00014 | 0,41197 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,03053 | 0,00161 | 0,00161 | 31,059 |
| | Mini Cargador | 707,75000 | 0,00014 | 0,09621 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00713 | 0,00038 | 0,00038 | 7,254 |
| | Volquete | 484,50000 | 0,00014 | 0,06586 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,00488 | 0,00026 | 0,00026 | 4,966 |
| 2018 | Tractor agrícola | 1007,00000 | 0,00014 | 0,13689 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,01014 | 0,00053 | 0,00053 | 10,321 |
| | Tractor Oruga | 2992,50000 | 0,00014 | 0,40681 | 74100,00 | 3,90 | 3,90 | 0,03014 | 0,00159 | 0,00159 | 30,670 |



| | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|-------------|-------------|--------------|------|------|-------------|-------------|-------------|-------|
| | Mini Cargador | 627,000 00 | 0,00 014 | 0,085 24 | 74100 ,00 | 3,90 | 3,90 | 0,0063 2 | 0,0003 3 | 0,0003 3 | 6,426 |
| | Volquete | 574,750 00 | 0,00 014 | 0,078 13 | 74100 ,00 | 3,90 | 3,90 | 0,0057 9 | 0,0003 0 | 0,0003 0 | 5,891 |

Tabla A.2. Factores de emisión de fuentes móviles

| Tipo de combustible | Densidad – ρ (kg/g) | Valor calorífico neto (TJ/kg) | Factores de emisión para Diesel B5 | | | Potencial de calentamiento global (GWP) | | Factor de conversión ρ*vcn (TJ/gal) |
|---------------------|---------------------|-------------------------------|---|--|---|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| | | | CO ₂ (Kg CO ₂ / TJ) | CH ₄ (Kg N ₂ O / TJ) | N ₂ O (Kg N ₂ O / TJ) | Metano (CH ₄) | Óxido nitroso (N ₂ O) | |
| Diesel B5 | 3,22138363 | 0,0000422 | 74100,00 | 3,90 | 3,900 | 21 | 310 | 0,0001359 |

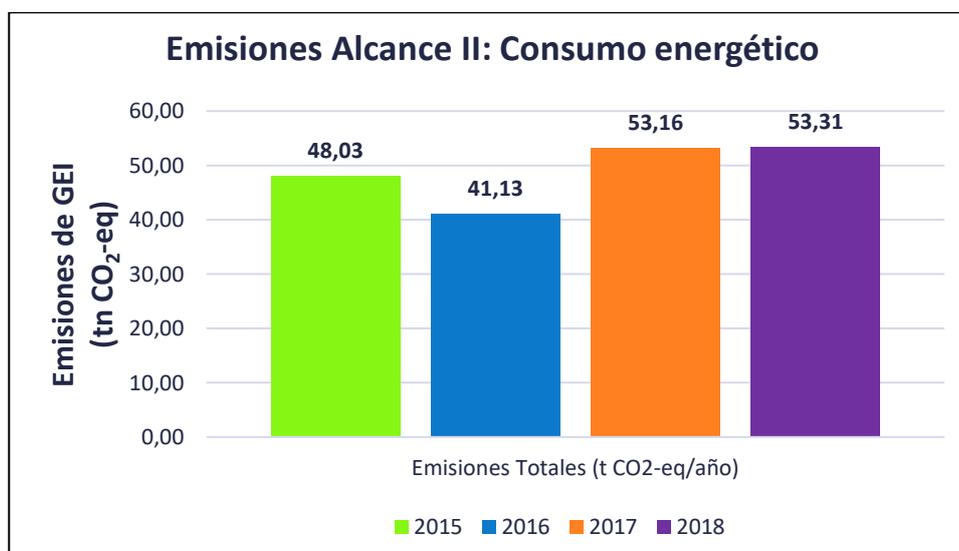
Fuente: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - Volumen 2: Energía, pág. 2.16 - 2.17



Tabla A.3. Cuantificación de emisiones anuales - Alcance I: Fuentes Móviles (Consumo de combustible)

| Unidad Vehicular | Año | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Tractor agrícola | 13,27 | 1,52 | 9,88 | 10,32 |
| Tractor Oruga | 28,15 | 30,69 | 31,06 | 30,67 |
| Mini Cargador | 6,62 | 4,97 | 7,25 | 6,43 |
| Volquete | 0,00 | 3,94 | 4,97 | 5,89 |
| Emisiones Totales (tn CO₂-eq) | 48,03 | 41,13 | 53,16 | 53,31 |

Gráfico A.1. Emisiones anuales - Alcance I: Fuentes Móviles (Consumo de combustible)



ANEXO B

MATRIZ DE CÁLCULO

ALCANCE II: CONSUMO ENERGÉTICO



Tabla B.1. Cuantificación de emisiones - Alcance II: Consumo energético

| Año | Consumo anual (kWh) | Factores de emisión para generación de energía | | | Cálculo de emisiones de GEI | | | Emisiones totales (tn CO ₂ -eq) |
|------|---------------------|--|--|---|--|--|---|--|
| | | Factor de emisión de CO ₂ (tn CO ₂ /MWh) | Factor de emisión de CH ₄ (tn CH ₄ /MWh) | Factor de emisión de N ₂ O (tn N ₂ O / MWh) | Emisiones de CO ₂ (tn CO ₂) | Emisiones de CH ₄ (tn CH ₄) | Emisiones de N ₂ O (tn N ₂ O) | |
| 2015 | 1495,389583 | 11,74 | 0,000469 | 0,0000951 | 17,55697 | 0,00070 | 0,00014 | 17,616 |
| 2016 | 1667,589583 | 11,74 | 0,000469 | 0,0000951 | 19,57872 | 0,00078 | 0,00016 | 19,644 |
| 2017 | 1624,625 | 11,74 | 0,000469 | 0,0000951 | 19,07429 | 0,00076 | 0,00015 | 19,138 |
| 2018 | 1663,647733 | 11,74 | 0,000469 | 0,0000951 | 19,53244 | 0,00078 | 0,00016 | 19,598 |

Tabla B.2. Factores de emisión de generación de energía

| Generación de energía | Combustible consumido por la unidad generadora (gl) | Valor calorífico neto (TJ/gl) | Factores de emisión | | | Potencial de calentamiento global (GWP) | | Cantidad neta de electricidad generada (MWh) |
|-----------------------|---|-------------------------------|---|--|---|---|----------------------------------|--|
| | | | CO ₂ (Kg CO ₂ / TJ) | CH ₄ (Kg N ₂ O / TJ) | N ₂ O (Kg N ₂ O / TJ) | Metano (CH ₄) | Óxido nitroso (N ₂ O) | |
| Hidrandina S.A. | 2139,00 | 0,0001 | 72618,00 | 2,90 | 0,588 | 21 | 310 | 1,323 |

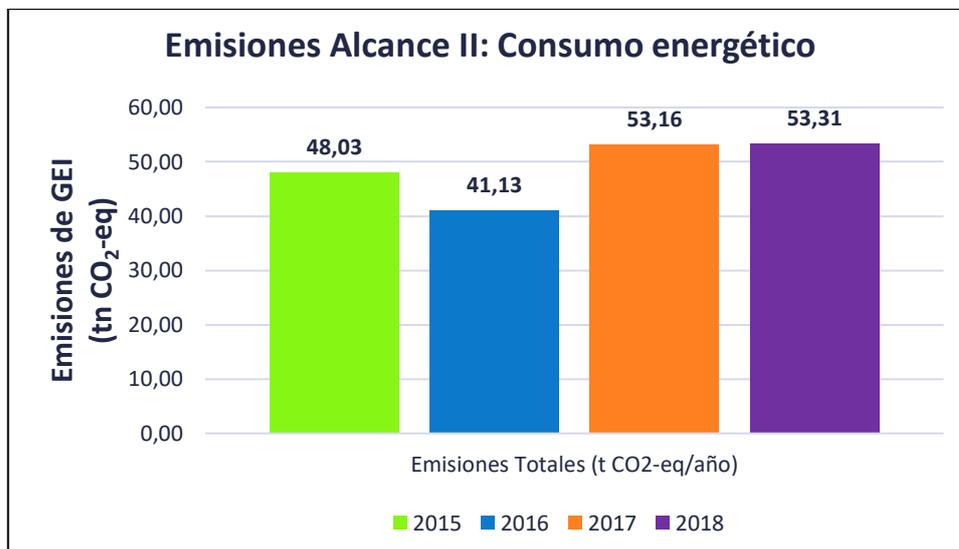
Fuente: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero – 2010, MINAM, 2010



Tabla B.3. Cuantificación de emisiones anuales - Alcance II: Consumo energético

| Consumo energético | Año | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Emisiones Totales (t CO ₂ -eq/año) | 17,62 | 19,64 | 19,14 | 19,60 |

Gráfico B.1. Emisiones anuales - Alcance I: Fuentes Móviles (Consumo de combustible)



ANEXO C

MATRIZ DE CÁLCULO

**ALCANCE III: EMISIONES PROVENIENTES
DEL RELLENO SANITARIO**



Tabla C.1. Generación per cápita y población del periodo 2015 al 2018.

| Año | GPC (kg/hab/día) | Población | Gen. RSM (kg/día) |
|------|------------------|-----------|-------------------|
| 2014 | 0,61 | 59698 | 36415,780 |
| 2015 | 0,649 | 56104 | 36411,496 |
| 2016 | 0,58 | 59828 | 34700,240 |
| 2017 | 0,58 | 60477 | 35076,660 |
| 2018 | 0,58 | 61107 | 35442,060 |

Fuente: Reportes anuales del periodo 2015 al 2018 del Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL); y el estudio de caracterización de residuos sólidos 2016 de la Municipalidad Distrital de Independencia.

Tabla C.2. Cuantificación de emisiones - Alcance III: Emisiones provenientes del relleno sanitario

| Año | Residuos dispuestos en el relleno sanitario (Gg) | Factor de emisión de CH ₄ (Gg CH ₄ / Gg RS) | Potencial de calentamiento global del CH ₄ | Cálculo de emisiones de GEI (tn CH ₄) | Emisiones totales (tn CO ₂ -eq) |
|------|--|---|---|---|--|
| 2015 | 2,7052 | 0,05 | 21 | 0,13896 | 2918,143 |
| 2016 | 3,6193 | 0,05 | 21 | 0,18591 | 3904,147 |
| 2017 | 3,6585 | 0,05 | 21 | 0,18793 | 3946,476 |
| 2018 | 3,6966 | 0,05 | 21 | 0,18988 | 3987,566 |

Tabla C.3. Factores de emisión

| Lugar | Factor de emisión de CH ₄ en rellenos sanitarios (Gg CH ₄ / Gg RS) | Factor de corrección para el metano | Carbono orgánico degradable t C / t desechos | Fracción de carbono orgánico degradable asimilado | Fracción de CH ₄ en el gas de vertedero generado fracción de volumen | Cociente de pesos moleculares CH ₄ /C (cociente)= 16 /12 | Factor de corrección para la oxidación del metano | potencial de calentamiento global Metano (CH ₄) |
|-----------------------------|--|-------------------------------------|--|---|---|---|---|---|
| Relleno sanitario de Pongor | 0,0514 | 1 | 0,154 | 0,5 | 0,5 | 1,333 | 1 | 21 |

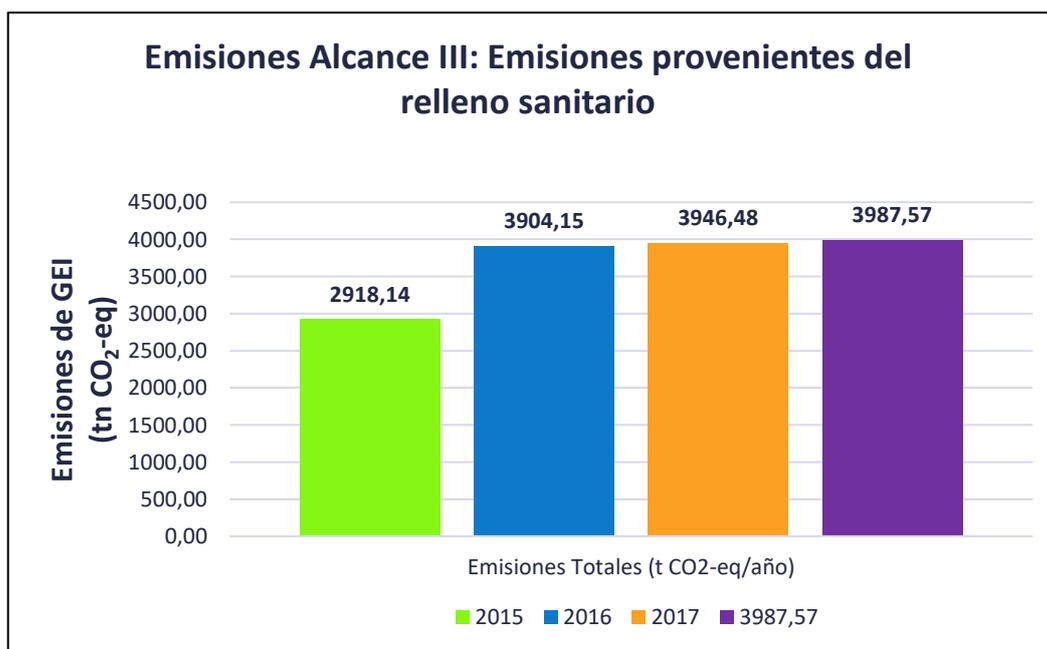
Fuente: Reporte anual de gases de efecto invernadero del sector residuos - RAGEI, MINAM, 2017



Tabla C.4. Cuantificación de emisiones anuales - Alcance III: Emisiones provenientes del relleno sanitario

| Emisiones provenientes del relleno sanitario | Año | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| Emisiones Totales (t CO₂-eq/año) | 2918,14 | 3904,15 | 3946,48 | 3987,57 |

Gráfico C.1. Emisiones anuales - Alcance III: Emisiones provenientes del relleno sanitario



ANEXO D

Factores de emisión

ALCANCE IV: Emisiones evitadas del reciclaje y compostaje



Tabla D.1. Factores de emisión para el reciclaje y compostaje

| Tipo de emisión | Residuo orgánico | Residuos orgánicos | Papel | Vidrio | Metales (acero) | Aluminio | Plásticos | Textiles |
|-----------------------|------------------|--------------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-------------|--------------|
| | Digestión | Compostaje | Destinado | Emisión | Emis timado IFEU | Emis timado IFEU | | |
| Emisiones | 57 | 87 | 180 | 20 | 22 | 700 | 1023 | 32 |
| Emisiones evitadas | 106 | 95 | 1000 | 500 | 2047 | 11800 | 1437 | 2850 |
| Resultado neto | -130 | -8 | -820 | -480 | -2025 | -11100 | -414 | -2818 |

Fuente: Calculadora GEI-giz, valores de acuerdo con (Prognos, IFEU, INFU 2008); estimación de metales IFEU