UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta, 2025

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Ingeniería Ambiental y Geología

PRESENTADO POR:

Rios Avila, Gohan Goku

ASESOR:

Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévano

CO-ASESOR:

Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez

HUANTA - PERÚ

2026

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO
Tesis_Gohan Rios_Final.pdf

AUTOR
Gohan Goku Rios Avila

RECUENTO DE PALABRAS
24613 Words

RECUENTO DE CARACTERES
140398 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS
112 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO
9.5MB

FECHA DE ENTREGA
Nov 18, 2026 8:43 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME
Nov 18, 2026 8:44 AM GMT-5

● 13% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 10% Base de datos de Internet
- 6% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 11% Base de datos de trabajos entregados

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Mtro. Fernando Cari Huayhua Lévano
DOCENTE ASOCIADO

Resumen

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

En la ciudad de Huanta, en el Aula 04-EP- Ingeniería Ambiental JOSACO, a los 13 días del mes de noviembre de 2026, siendo las 17:00 horas, se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz	**Miembro Titular 1 (Presidente)**
Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez	**Miembro titular 2**
Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévan	**Miembro titular 3**

Acto seguido se procedió a dar lectura a la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 220-2026-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del **Br. Gohan Goku Rios Avila,** con la tesis titulada: **"Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta 2025",** asesorado por el Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévano, para optar el Título profesional de: Ingeniero Ambiental.

Observaciones:

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluadores, los mismos que fueron defendidos y absueltos por el tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular	(X)
Aprobado Bueno	( )
Aprobado Muy Bueno	( )
Aprobado Excelente	( )

Con la calificación de ...trece..... (13)
Siendo las 18:00 horas... se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dra. Karina M. Ordoñez Ruiz
DOCENTE PRINCIPAL
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
Miembro Titular 1 (Presidente)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
DOCENTE ORDINARIO - ASOCIADO
Dr. Jorge Luis Lozano Rodríguez
Miembro Titular 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévano
DOCENTE ORDINARIO ASOCIADO
Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévano
Miembro Titular 3

Cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta, 2025

TESISTA

Bach. Gohan Goku Rios Avila

ASESOR

Mtro. Fernando Gari Huayhua Lévano

CO-ASESOR

Dr. Tulio Celestino Paytan Montañez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, a Dios por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia para poder afrontar cada desafío durante mi formación profesional y la realización de mi tesis.

A mis padres, Florencia y Roberto, por su amor condicional, sus sacrificios, consejos y constante apoyo. Gracias por ser mi principal fuente de motivación y por enseñarme que, con esfuerzo, responsabilidad y perseverancia, es posible alcanzar las metas propuestas.

A mis hermanos, Roberto y Génesis, por acompañarme en cada etapa de este camino, por su comprensión y por confiar siempre en mí. Su apoyo fue fundamental para continuar adelante en los momentos más difíciles.

Asimismo, a mi hija Cayetana, por ser una de mis mayores fuentes de inspiración y la razón para seguir adelante aun en los momentos más difíciles. Este logro también es para ti, por tu amor, tu sonrisa y tu existencia me motivan a superarme cada día y a luchar por alcanzar mis metas.

Finalmente, dedico a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación personal y profesional, me impulsaron a seguir creciendo y a alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios, por haberme concedido la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesaria para culminar satisfactoriamente mi formación profesional y desarrollar la presente investigación.

A mis padres y familiares, por su apoyo permanente, comprensión, confianza y motivación durante todo este proceso. Su respaldo fue fundamental para superar las dificultades y continuar con dedicación hasta alcanzar este importante objetivo.

A la universidad y a todos los docentes que contribuyeron a mi formación académica y profesional, por los conocimientos impartidos, las experiencias compartidas y las orientaciones que fortalecieron mis capacidades para afrontar los retos de mi profesión.

Asimismo, agradezco a mi asesor y coasesor por la orientación, recomendación y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, contribuyendo significativamente a su culminación.

A la Municipalidad Provincial de Huanta y al personal que brindó las facilidades y la información necesaria para el desarrollo de este estudio, mi especial reconocimiento por su colaboración y disposición.

A mi amigo, Franklin Christopher, por su valiosa colaboración y acompañamiento en las actividades de recojo y análisis de datos.

RESUMEN

El estudio cuantificó las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental (GSMGA) de la Municipalidad Provincial de Huanta para el año 2025, esto es, su huella de carbono organizacional. La investigación fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, nivel descriptivo y diseño no experimental transversal, y se desarrolló mediante el análisis documental de los registros operativos de la entidad. El inventario se construyó conforme al GHG Protocol Corporate Standard y a la norma ISO 14064-1, bajo el enfoque de control operacional, sobre los alcances 1 y 2; el alcance 3 se excluyó por no disponerse de datos de actividad, de modo que la cifra constituye un límite inferior. Las emisiones se calcularon como el producto del dato de actividad, el factor de emisión y el potencial de calentamiento global del IPCC AR5; el metano del botadero se estimó con el modelo FOD/LandGEM sobre la serie de disposición 2008–2025, con propagación de la incertidumbre paramétrica por simulación de Monte Carlo (enfoque 2 del IPCC). La huella ascendió a 9 054,8 tCO2e: el alcance 1 concentró 9 039,4 tCO2e (99,8 %) y el alcance 2, 15,3 tCO2e (0,2 %). Por fuente, el botadero aportó 8 559,7 tCO2e (94,5 %); la flota, 479,7 tCO2e (5,3 %), y la electricidad, 15,3 tCO2e (0,2 %). El intervalo de confianza del 95 % del total fue de 4 848,6 a 12 618,1 tCO2e y el predominio del botadero se verificó en todas las simulaciones. Se concluye que la huella está determinada por una sola fuente, la disposición final de residuos, hacia la que debe orientarse prioritariamente la mitigación.

Palabras clave: huella de carbono, gases de efecto invernadero, GHG Protocol, inventario municipal, gestión ambiental municipal.

ABSTRACT

This study quantified the greenhouse gas emissions of the Municipal Services and Environmental Management Office (GSMGA) of the Provincial Municipality of Huanta for the year 2025, that is, its organizational carbon footprint. The research was quantitative and applied, at a descriptive level, with a non-experimental cross-sectional design, and was carried out through documentary analysis of the entity's operational records. The inventory was built following the GHG Protocol Corporate Standard and the ISO 14064-1 standard, under the operational control approach, covering scopes 1 and 2; scope 3 was excluded because no activity data were available, so the reported figure is a lower bound. Emissions were calculated as the product of activity data, emission factor and the IPCC AR5 global warming potential; methane from the municipal open dumpsite was estimated with the FOD/LandGEM model over the 2008–2025 disposal series, with parameter uncertainty propagated through Monte Carlo simulation (IPCC approach 2). The footprint totaled 9,054.8 tCO2e: scope 1 accounted for 9,039.4 tCO2e (99.8 %) and scope 2 for 15.3 tCO2e (0.2 %). By source, dumpsite methane contributed 8,559.7 tCO2e (94.5 %); fleet combustion, 479.7 tCO2e (5.3 %), and grid electricity, 15.3 tCO2e (0.2 %). The 95 % confidence Interval of the total ranged from 4,848.6 to 12,618.1 tCO2e, and the dumpsite's predominance held in every simulation. It is concluded that the GSMGA's footprint is determined by a single source, final waste disposal, toward which mitigation should be directed as a priority.

Keywords: carbon footprint, greenhouse gases, GHG Protocol, emissions inventory, municipal environmental management.

ÍNDICE

RESUMEN x
ABSTRACT xi
INTRODUCCIÓN 18
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 21
1.1. Descripción y formulación del problema 21
1.2. Formulación del problema 25
1.2.1. Formulación de problema especifico 25
1.3. Objetivos 25
1.3.1. Objetivo General 25
1.3.2. Objetivos Específicos 25
1.4. Justificación 26
1.5. Alcances y limitaciones 27
1.6. Variable 30
II. MARCO TEÓRICO 31
2.1. Antecedentes 31
2.1.1. Antecedentes Internacionales 31
2.1.2. Antecedentes Nacionales 33
2.1.3. Antecedentes Regionales y Locales 35
2.2. Bases teóricas 36
2.2.1. Cambio climático y efecto invernadero 36
2.2.2. Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento global 38
2.2.3. Huella de carbono: concepto y tipos 40
2.2.4. El GHG Protocol Corporate Standard 42
2.2.5. Límites de inventario: organizacional y operativo 43
2.2.6. Alcances de las emisiones: 1, 2 y 3 45
2.2.7. Dato de la actividad, factor de emisión y cuantificación 47
2.2.8. Norma ISO 14064-1 49
2.2.9. Gestión de residuos sólidos municipales y generación de metano 50
2.2.10. Modelos de estimación de metano: FOD del IPCC y LandGEM 52
2.3. Marco legal e institucional 54
2.3.1. Marco internacional y compromiso nacional 54

2.3.2. Marco normativo nacional 55
2.3.3. Huella de Carbono Perú (MINAM) 56
2.3.4. Marco institucional local: la GSMGA de la MPH 57
2.4. Definición de términos 59
III. METODOLOGÍA 63
3.1. Área de estudio 63
3.1.1. Ubicación geográfica 63
3.2. Tipo, diseño y nivel de investigación 65
3.2.1. Enfoque y tipo de investigación 65
3.2.2. Nivel de investigación 65
3.2.3. Diseño de investigación 66
3.2.4. Población y unidad de análisis 66
3.2.5. Procedimiento de la investigación 67
3.3. Límites de inventario 68
3.3.1. Límite organizacional 69
3.3.2. Límites operativos 69
3.4. Recolección de datos de actividad 72
3.4.1. Técnica e instrumento de recolección 72
3.4.2. Fuentes documentales por alcance 73
3.4.3. Período de referencia y representatividad temporal 73
3.4.4. Tratamiento de datos faltantes y supuestos de estimación 74
3.5. Factores de emisión y GWP 74
3.5.1. Factores de emisión 74
3.5.2. Potencial de calentamiento global 75
3.6. Cálculo de emisiones 76
3.6.1. Ecuación general de cuantificación 76
3.6.2. Estimación de metano del botadero 76
3.6.3. Procesamiento y agregación de resultados 77
3.6.4. Tratamiento de incertidumbres 78
3.6.5. Tratamiento estadístico de los resultados 78
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES 81
4.1. Resultados 81

4.1.1. Datos de actividad recopilados 81
4.1.2. Emisiones por alcance 82
4.1.3. Emisiones totales y fuentes principales 87
4.2. Discusiones 90
V. CONCLUSIONES 94
VI. RECOMENDACIONES 95
VII. REFERENCIAS 98
VIII. ANEXOS 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Mapa de ubicación de la GSMGA* 64

Figura 2 *Procedimiento metodológico del inventario de emisiones* 68

Figura 3 *Serie de disposición de residuos y aporte de cada cohorte a la generación de metano de 2025* 85

Figura 4 *Emisiones y participación de cada fuente en la huella de carbono de la GSMGA, 2025* 88

Figura 5 *Sensibilidad de las emisiones del botadero a los parámetros del modelo FOD/LandGEM* 93

Figura 6 *Frente de descarga activo del botadero municipal, donde se aprecia la disposición de residuos sin cobertura ni compactación técnica.* 108

Figura 7 *Vista panorámica del área de disposición final, que permite apreciar la extensión del sitio.* 108

Figura 8 *Unidad compactadora de la flota de recolección de la Sub Gerencia de Servicios Municipales.* 109

Figura 9 *Terminal Terrestre de Huanta, cuyo suministro se atribuye íntegramente a la entidad ante la ausencia de la submedición.* 109

Figura 10 *Terminal Terrestre de Huanta, cuyo suministro se atribuye íntegramente a la entidad ante la ausencia de la submedición.* 110

Figura 11 *Búsqueda de recibo de pago de consumo eléctrico* 111

Figura 12 *Centro de monitoreo de videovigilancia* 112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Matriz de operacionalizaciones de variable* 30

Tabla 2 *Potencial de calentamiento global (GWP) a 100 años de los principales gases de efecto invernadero* 40

Tabla 3 *Tipos de huella de carbono según el objeto de estudio* 42

Tabla 4 *Clasificación de las emisiones en alcances según el GHG Protocol* 46

Tabla 5 *Clasificación de las fuentes de emisión de la GSMGA por alcance* 71

Tabla 6 *Datos de actividad, unidades y fuentes documentales por alcance* 73

Tabla 7 *Procedencia de los factores de emisión por fuente* 75

Tabla 8 *Datos de actividad recopilados por fuente y alcance, GSMGA Huanta 2025* 82

Tabla 9 *Serie de disposición de residuos y aporte de cada cohorte a la generación de metano de 2025 (modelo FOD/LandGEM)* 86

Tabla 10 *Emisiones de GEI por fuente y alcance, GSMGA Huanta 2025* 87

Tabla 11 *Estadística descriptiva de los componentes del inventario* 89

GLOSARIO DE SIGLAS Y SÍMBOLOS

AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC, del que proceden los potenciales de calentamiento global empleados.
CH_4	Metano
CO_2e	Dióxido de carbono equivalente, unidad común de reporte.
FOD	Descomposición de primer orden (first order decay), modelo del IPCC para estimar el metano de la disposición final.
GEI	Gases de efecto invernadero.
GHG Protocol	Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard, estándar de contabilidad y reporte de emisiones a escala de organización.
GSMGA	Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental
GWP	Potencial de calentamiento global (global warming potential).
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática.
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
ISO 14064-1	Norma internacional de cuantificación y reporte de emisiones de GEI a nivel de organización.
k	Constante de generación de metano del modelo FOD/LandGEM, en año-^{1}.
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model, modelo de la USEPA para la generación de gas en sitios de disposición final.
L_0	Potencial de generación de metano, en m^3/Mg de residuo.
MCF	Factor de corrección de metano, según el tipo de sitio de disposición.
MINAM	Ministerio del Ambiente del Perú.
MPH	Municipalidad Provincial de Huanta.
N_2O	Óxido nitroso.
PPC	Producción per cápita de residuos sólidos, en kg/hab/día.
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, del que procede el factor de emisión de la electricidad adquirida.
tCO_2e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente.
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

INTRODUCCIÓN

Esta tesis aborda un problema de medición en la gestión ambiental de un gobierno local. La Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental (GSMGA) de la Municipalidad Provincial de Huanta presta servicios que generan emisiones de gases de efecto invernadero como la limpieza pública, la recolección y el transporte de residuos, su disposición final, pero no dispone de un inventario que indique cuánto emite, en qué proporción y por cuál de sus actividades. Sin ese punto de partida, cualquier meta de reducción carece de referencia sobre la cual formularse.

El objetivo del estudio es, en consecuencia, cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta para el año 2025, conforme al GHG Protocol Corporate Standard (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004), estándar con el que se alinea la herramienta oficial Huella de Carbono Perú del Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021). Los resultados se expresan en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2e) y se desagregan por fuente y por alcance. El inventario abarca los alcances 1 y 2, de reporte obligatorio en ese estándar; el alcance 3 se excluye por no disponerse de datos de actividad que permitan cuantificarlo, de modo que la cifra reportada debe leerse como un límite inferior de las emisiones de la entidad.

La importancia del estudio reside en que, hasta donde se ha podido verificar, se trata del primer inventario de su tipo en la entidad. Su aporte central es una línea base sobre la cual la Gerencia pueda fijar metas de reducción, priorizar medidas y monitorear su avance, además de registrarse, llegado el caso, en la plataforma oficial del Ministerio del Ambiente. El estudio responde así a la obligación que la Ley Marco sobre Cambio Climático asigna a los tres niveles de

gobierno (Congreso de la República del Perú, 2018) y atiende un vacío empírico, pues la evidencia sobre inventarios organizacionales de unidades de gestión municipal en contextos andinos peruanos es escasa.

Metodológicamente, la investigación es de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, nivel descriptivo y diseño no experimental transversal. Se desarrolla mediante el análisis documental de los registros operativos de la entidad como órdenes de adquisición de combustible, registros de disposición final y recibos de la concesionaria eléctrica, recogidos con una ficha de registro por fuente. Las emisiones se calculan como el producto del dato de actividad, el factor de emisión y el potencial de calentamiento global, y el metano del botadero municipal, que no admite medición directa, se estima con el modelo FOD/LandGEM sobre la serie de disposición 2008 - 2025. La incertidumbre paramétrica de esa estimación se propaga mediante simulación de Monte Carlo, conforme al enfoque 2 de las directrices del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), lo que permite acompañar cada estimación con su intervalo de confianza.

La investigación no formula hipótesis, y la razón es metodológica. No toda investigación cuantitativa las plantea: su pertinencia depende del alcance del estudio, de modo que se formulan en los de alcance correlacional o explicativo y, dentro de los descriptivos, únicamente en aquellos que pronostican una cifra o un hecho (Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018). Este estudio es descriptivo y no pronostica cifra alguna: la determina. Su objeto son las emisiones de gases de efecto invernadero de la GSMGA durante 2025, no se infiere desde una muestra hacia una población, sino que se obtiene aplicando la ecuación de cuantificación del GHG Protocol a los registros operativos de la entidad, sobre el universo de las fuentes bajo su control operacional. Al cubrirse ese universo completo no existe error de muestreo ni parámetro poblacional desconocido

que estimar, y el contraste de hipótesis queda sin objeto: nada hay que someter a prueba allí donde la magnitud se calcula directamente a partir de datos documentados. Lo que sí existe es incertidumbre en los parámetros por defecto del modelo de metano y en los factores de emisión, y esa incertidumbre se trata como prescriben las normas del campo, mediante análisis de incertidumbre y de sensibilidad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; International Organization for Standardization, 2018), cuyos resultados se reportan en el capítulo 4. El estudio sustituye así un aparato inferencial que el diseño no admite por el tratamiento que el propio estándar exige, sin pérdida de rigor en la lectura de los resultados.

El documento se organiza en cinco capítulos. El capítulo 1 desarrolla el planteamiento del problema: el contexto climático y normativo que exige la medición, el vacío de información en la entidad, las preguntas, los objetivos, la justificación y el alcance del estudio. El capítulo 2 reúne los antecedentes y las bases teóricas y legales de la contabilidad organizacional de emisiones. El capítulo 3 especifica los materiales y métodos: los límites del inventario, la población, el procedimiento, la recolección de los datos de actividad, los factores de emisión y el tratamiento estadístico. El capítulo 4 presenta los resultados, su análisis de incertidumbre y su discusión, y el capítulo 5 formula las conclusiones y recomendaciones derivadas del inventario.

CAPÍTULO 1

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

El cambio climático es uno de los desafíos ambientales más urgentes del presente siglo, impulsado por la acumulación de gases de efecto invernadero de origen antrópico en la atmósfera (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Frente a este fenómeno, las ciudades y sus gobiernos locales han pasado a ocupar un papel central en la mitigación, pues concentran población, consumo energético y actividad de servicios, y al mismo tiempo disponen de competencias directas sobre el transporte, la energía y los residuos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). La gobernanza climática urbana ha sido reconocida como un ámbito de acción de primer orden, donde las decisiones administrativas condicionan buena parte de la trayectoria de emisiones de un territorio (Bulkeley, 2010). Por ello, las administraciones municipales no solo prestan servicios que generan emisiones, sino que son actores llamados a contabilizarlas y reducirlas como parte de la acción climática global (World Resources Institute et al., 2014). En el plano internacional, los autores citados coinciden en un punto que interesa directamente a esta investigación: la capacidad de un gobierno local para intervenir sobre su trayectoria de emisiones depende, antes que, de la voluntad política, de disponer de una medición de partida (Bulkeley, 2010; World Resources Institute et al., 2014).

La gestión de esas emisiones presupone, sin embargo, su medición previa: no se gestiona lo que no se mide. La contabilidad de gases de efecto invernadero se ha consolidado como condición de toda estrategia de mitigación a través de estándares que armonizan límites, alcances y factores de emisión (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable

Development, 2004), así como de normas internacionales que regulan la cuantificación y el reporte a nivel de organización (International Organization for Standardization, 2018). La literatura ha comparado estos marcos y discutido sus criterios de aplicación (Gao et al., 2014), y ha revisado las métricas de carbono empleadas para evaluar el desempeño ambiental de las entidades (Balouktsi, 2020). Existen, además, antecedentes de inventarios en entidades públicas, como el cálculo de la huella de un campus universitario (Cano et al., 2023) o la contabilidad de emisiones de edificios públicos municipales (Pietrapertosa et al., 2020).

El Perú ha construido un marco normativo e institucional acorde con esa exigencia de medición. La Ley Marco sobre Cambio Climático (Congreso de la República del Perú, 2018) y su reglamento (MINAM, 2019) fijan los principios de la gestión integral de las medidas de adaptación y mitigación y comprometen al Estado en sus distintos niveles de gobierno. Como instrumento operativo de ese marco, la herramienta Huella de Carbono Perú permite a las organizaciones públicas medir, verificar, reducir y neutralizar sus emisiones bajo una metodología estandarizada (MINAM, 2020). Estos instrumentos se inscriben en el compromiso climático nacional asumido ante la Convención Marco de las Naciones Unidas, cuya contribución determinada a nivel nacional fija una meta de reducción del 30 % de las emisiones al año 2030 con recursos internos, ampliable al 40 % con apoyo internacional (SPDA, 2020).

Dentro de los servicios que prestan los gobiernos locales, el manejo de residuos sólidos es uno de los focos de emisiones más relevantes. La fiscalización del sector en el Perú ha documentado un predominio de botaderos y una disposición final deficiente, con escasa cobertura de rellenos sanitarios (Oefa, 2014), situación que la legislación nacional busca revertir mediante la gestión integral de los residuos (Poder Ejecutivo del Perú, 2017). La disposición inadecuada

favorece la degradación anaerobia de la materia orgánica y la consiguiente emisión de metano, gas de alto potencial de calentamiento (Díaz-Archundia et al., 2017). La cuantificación de esas emisiones se ha abordado en la región mediante modelos de generación de biogás en sitios de disposición final, como muestran experiencias municipales recientes en el Ecuador (Ambuludi-Paredes et al., 2021).

En el plano nacional y latinoamericano estos autores vuelven a coincidir: la disposición final en sitios no controlados domina las emisiones de los servicios municipales, y su cuantificación obliga a recurrir a modelos de descomposición, porque el metano no admite medición directa en superficie (Ambuludi-Paredes et al., 2021; Díaz-Archundia et al., 2017; Oefa, 2014).

En la región Ayacucho ese cuadro nacional se reproduce a escala provincial. La provincia de Huanta registró 89 466 habitantes en el último censo nacional (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018), una población cuya generación de residuos se concentra en la capital provincial y cuya disposición final se realiza en un botadero a cielo abierto operado por la propia municipalidad, sin confinamiento controlado ni manejo técnico de gases. El único inventario de emisiones documentado en la región corresponde a la Municipalidad Distrital de Tambo, que estimó 109,53 tCO2e con predominio del alcance 1 (Ayala Junco & Cordero Cuadros, 2021); se trata de un gobierno local de menor escala y de un ejercicio aislado, de modo que no existe en Ayacucho una práctica establecida de contabilidad organizacional de emisiones a nivel provincial.

Pese a este marco, los inventarios de huella de carbono a nivel de gobierno local siguen siendo escasos y se concentran en las grandes ciudades, donde hay mayor disponibilidad de datos y de capacidades técnicas (Bulkeley, 2010). Fuera de ese entorno, en las municipalidades

provinciales de la sierra andina, la contabilidad de emisiones rara vez ha pasado del enunciado normativo a la medición efectiva (World Resources Institute et al., 2014). La Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental (GSMGA) de la Municipalidad Provincial de Huanta es un caso concreto de esa brecha. Según su Reglamento de Organización y Funciones, la GSMGA es el órgano de línea responsable del ambiente, la seguridad ciudadana, el transporte y la salubridad, y se organiza en cinco subgerencias: Participación y Seguridad Ciudadana, Servicios Municipales, Transporte y Seguridad Vial, Gestión Ambiental, y Gestión del Riesgo de Desastres (Municipalidad Provincial de Huanta, 2023). Varias de esas unidades concentran fuentes previsibles de emisiones, como la flota de recolección de residuos y una central de videovigilancia, presumiblemente de consumo eléctrico continuo.

Pese a esa concentración de fuentes, la GSMGA no cuenta con un inventario de su huella de carbono. Hasta donde se ha podido verificar, no existe un cálculo previo de las emisiones de la entidad, de modo que se desconoce tanto su magnitud, es decir, el total expresado en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2e), como su composición por alcance y por fuente. Sin esa línea base, la Gerencia carece del punto de partida que cualquier objetivo de reducción requiere y no dispone de evidencia para priorizar dónde concentrar sus esfuerzos de mitigación (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Este vacío, frente a un marco nacional que promueve activamente la medición organizacional (MINAM, 2020), motiva la presente investigación.

1.2.Formulación del problema

¿Cuál es la magnitud y la composición de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta durante el año 2025?

1.2.1. Formulación de problema especifico

- ¿A cuánto ascienden las emisiones directas del alcance 1 de la GSMGA durante el año 2025, expresadas en tCO2e y desagregadas por fuente?
- ¿A cuánto ascienden las emisiones indirectas por energía del alcance 2, expresadas en tCO2e?
- ¿Qué participación tiene cada fuente en la huella total de la Gerencia y cuál de ellas la encabeza?

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta para el año 2025.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar las emisiones directas del alcance 1 de la GSMGA para el año 2025, desagregadas por fuente y expresadas en tCO2e.
- Cuantificar las emisiones indirectas por energía del alcance 2, expresadas en tCO2e.

- Determinar la participación de cada fuente en la huella total e identificar la de mayor contribución.

1.4.Justificación

Justificación teórica, el estudio atiende un vacío empírico en la literatura sobre gobernanza climática local. Aunque el papel de las ciudades y de los gobiernos locales en la mitigación está ampliamente reconocido (Bulkeley, 2010) y existen marcos consolidados para la contabilidad de emisiones a escala urbana (World Resources Institute et al., 2014), la evidencia sobre inventarios organizacionales de unidades de gestión municipal en contextos andinos peruanos es escasa. Documentar este caso añade un dato a esa literatura y ofrece una referencia replicable para entidades de tamaño y funciones comparables.

Justificación metodológica, el estudio deja un procedimiento de medición repetible donde hoy no existe ninguno. El GHG Protocol Corporate Standard y la norma ISO 14064-1 fijan reglas comunes para delimitar el inventario, clasificar las fuentes y reportar los resultados, lo que confiere comparabilidad y trazabilidad al cálculo (International Organization for Standardization, 2018; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004); la coexistencia de estándares con criterios convergentes pero no idénticos hace que documentar explícitamente el método sea en sí mismo un aporte para su verificación y actualización (Gao et al., 2014). A ello se suma el tratamiento de la incertidumbre por simulación, conforme al enfoque 2 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), que permite acompañar la cifra puntual de un intervalo de confianza.

Justificación práctica, el inventario provee la línea base que toda meta de reducción necesita y que la Gerencia hoy no tiene. Al ser, hasta donde se ha podido verificar, el primer estudio

de huella de carbono de la Municipalidad Provincial de Huanta, permite fijar metas, priorizar medidas, monitorear su avance y, eventualmente, registrarse en la plataforma Huella de Carbono Perú (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021). Otros gobiernos locales y entidades públicas han empleado el inventario con ese mismo fin (Cano et al., 2023; Municipalidad Metropolitana de Lima, 2020; Pietrapertosa et al., 2020). Su utilidad depende de la desagregación: una cifra agregada única no orienta la gestión, mientras que el resultado ordenado por alcance y por fuente señala qué procesos pesan más y dónde concentrar el esfuerzo (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Justificación social y ambiental, los servicios que la GSMGA presta sobre el territorio (limpieza pública, barrido y disposición final de residuos) son los mismos que generan las emisiones medidas, en particular el metano de los sitios de disposición (Díaz-Archundia et al., 2017). Disponer de información ordenada sobre ellas respalda una gestión de residuos más informada, coherente con las obligaciones que la normativa nacional asigna a las municipalidades (Poder Ejecutivo del Perú, 2017) y con la función fiscalizadora que el Estado ejerce sobre dichos servicios (Oefa, 2014). El beneficio no es la reducción inmediata de las emisiones, sino el conocimiento que habilita decisiones de gestión orientadas al interés público, en una línea en que las métricas de carbono se han consolidado como instrumento de evaluación del desempeño ambiental de las organizaciones (Balouktsi, 2020).

1.5.Alcances y limitaciones

El estudio es descriptivo y de medición: cuantifica y caracteriza las emisiones de la GSMGA, sin formular afirmaciones causales sobre sus determinantes ni sobre el efecto de intervención alguna. Su periodo de reporte es el año 2025 (enero a diciembre), tomado como año

base del inventario. La delimitación conceptual corresponde a la huella de carbono organizacional, calculada conforme al GHG Protocol Corporate Standard (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004) y a la norma ISO 14064-1 (International Organization for Standardization, 2018) y los resultados se expresan en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2e).

La delimitación institucional y operativa fija qué se contabiliza y bajo qué criterio. El límite organizacional se define mediante el enfoque de control operacional sobre toda la GSMGA y sus cinco subgerencias. El límite operativo abarca el alcance 1 (emisiones directas, que comprenden la combustión de la flota vehicular y la disposición final de residuos en el botadero que la entidad opera), el alcance 2 (electricidad adquirida y consumida), los dos alcances de reporte obligatorio del GHG Protocol Corporate Standard. El alcance 3 (otras emisiones indirectas, según la disponibilidad de datos) se excluye del inventario porque la entidad no cuenta con datos de actividad que permitan cuantificarlo con un mínimo de fiabilidad; esta exclusión se declara expresamente entre las limitaciones, dado que en inventarios comparables el alcance 3 puede representar una fracción relevante del total, por lo que la huella aquí reportada debe interpretarse como un límite inferior circunscrito a los alcances 1 y 2. Bajo el enfoque de control operacional, las emisiones de metano del sitio de disposición se atribuyen en su totalidad a la entidad, con independencia de que los residuos procedan de todo el distrito y no solo de las oficinas. En cuanto a la electricidad, cuando la entidad comparte un recinto con otros usuarios y no existe submedición que permita separar su consumo como en la sede del terminal terrestre, el medidor se atribuye íntegramente a la Gerencia como criterio conservador, y la posible sobrestimación se declara entre las limitaciones.

El alcance descrito convive con limitaciones que conviene declarar desde el inicio. La primera es la dependencia de registros administrativos internos (órdenes de combustible, recibos de electricidad, registros operativos), cuya calidad y digitalización pueden ser heterogéneas; cuando un registro cubra solo parte del año, el dato se anualiza con un criterio documentado, y cuando una fuente no sea cuantificable, se declara como exclusión y no como cero. La segunda atañe a la electricidad de la sede del terminal terrestre: a falta de submedición que aísle a otros posibles usuarios del recinto, el consumo del medidor se atribuye en su totalidad a la Gerencia, lo que puede sobrestimar las emisiones del alcance 2; se opta por este criterio conservador y se recomienda, para inventarios futuros, instalar submedición o estimar la superficie ocupada a fin de afinar la atribución.

La tercera limitación concierne a la estimación de las emisiones de metano del botadero. A diferencia del consumo de combustible o de electricidad, estas emisiones no se miden de forma directa, sino que se estiman mediante un modelo de descomposición de primer orden (Ambuludi-Paredes et al., 2021; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), ya que el metano liberado durante el año base proviene de los residuos acumulados en años previos (Díaz-Archundia et al., 2017). El cálculo depende, por tanto, de una serie histórica de tonelaje dispuesto que no siempre está disponible con la granularidad deseable, y sus resultados son sensibles a los parámetros del modelo (carbono orgánico degradable, constante de generación y factor de corrección de metano según el tipo de sitio), de modo que esta fuente conlleva una incertidumbre mayor que las demás. La cuarta limitación es la disponibilidad y la representatividad de los factores de emisión: se priorizan los factores nacionales del MINAM y, de forma supletoria, los del IPCC, citando en cada caso la fuente y el año (MINAM, 2020). Estas limitaciones no invalidan el inventario, pero acotan su precisión y se retoman al interpretar los resultados.

1.6.Variable

Emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 1

Matriz de operacionalizaciones de variable

Dimensión	Indicador	Unidad	Instrumento y fuente documental
Alcance 1: emisiones directas	Emisiones de la combustión móvil de la flota vehicular (diésel, gasolina).	tCO_2e	Ficha de registro; vales y órdenes de combustible.
	Emisiones de metano del botadero municipal, estimadas con modelos FOD/LandGEM.	tCO_2e	Ficha de registro; registros operativos de disposición final (serie histórica).
Alcance 2: indirectas por energía	Emisiones de la electricidad adquirida de la red (SEIN).	tCO_2e	Ficha de registro; recibos de la concesionaria.

CAPÍTULO 2

II. MARCO TEÓRICO

2.1.Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Cano et al., (2023), en su artículo Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064-1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard, se propusieron como objetivo identificar las fuentes de emisión directas e indirectas de un campus universitario y calcular su huella de carbono como base para estrategias de mitigación. En cuanto a la metodología, aplicaron de forma conjunta la norma UNE-ISO 14064-1 y el GHG Protocol Corporate Standard, abarcando los alcances 1, 2 y 3 con año base 2019 sobre tres sedes urbanas de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, con factores de emisión del IPCC y de la autoridad energética nacional. El resultado fue una huella total de 7250,52 tCO2e anuales (0,432 tCO2e por persona), concentrada en el alcance 3 (83,13 %), seguido del alcance 2 (14,03 %) y del alcance 1 (2,84 %); en ese inventario, el transporte de la comunidad universitaria fue el componente predominante.

Alejandro Paspuezan & Mozo Pillajo, (2023), en su tesis *Determinación de huella de carbono y desarrollo de un plan piloto basado en la ISO 14064 en dos Obras Salesianas*, ubicadas en Quito, Ecuador, tuvieron como objetivo estimar las emisiones de GEI de dos sedes institucionales y proponer un plan de reducción alineado con estándares internacionales. La metodología combinó la NTE INEN-ISO 14064-1:2020, el GHG Protocol y las directrices del IPCC, con los alcances 1 (combustión estacionaria y móvil, y emisiones fugitivas de refrigerantes y extintores), 2 (electricidad) y 3 (transporte y movilización del personal, mensajería y uso de

productos), tomando 2021 como año base. El resultado fue una emisión total de 801,98 tCO2e para ambas sedes, en la que el transporte del alcance 3 constituyó el principal aporte, con 507,41 tCO2e.

Pietrapertosa et al., (2020), en su estudio How to Prioritize Energy Efficiency Interven-tion in Municipal Public Buildings to Decrease CO2 Emissions? A Case Study from Italy, plantearon como objetivo seleccionar y priorizar intervenciones de eficiencia energética en edificios públicos del municipio de Potenza para reducir sus emisiones de CO2. La metodología empleó la herramienta de apoyo a la decisión DSTool, que ordena las intervenciones según costo, ahorro de energía, reducción de emisiones y retorno de la inversión dentro de un plan de acción trienal. Como resultado, las mejoras en envolventes, calefacción, iluminación y generación fotovoltaica permitirían reducir alrededor de 644 t de CO2 y ahorrar 2050 MWh al año, con una inversión cercana a 1,73 millones de euros. A diferencia de un inventario corporativo por alcances, este trabajo se concentra en la gestión de la energía de los inmuebles públicos, aspecto pertinente para el alcance 2 del presente estudio.

Ambuludi-Paredes et al., (2021), en su artículo Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador, tuvieron como objetivo proyectar el potencial de generación de metano del sitio de disposición final mediante modelización. La metodología aplicó el modelo LandGEM versión 3.02 de la USEPA, alimentado con la composición de los residuos, información climática y el historial operativo del relleno, sobre un horizonte de proyección de veinte años. El resultado fue una generación acumulada de aproximadamente 33,1 millones de m3 de metano en dos décadas, con un promedio anual cercano a 1,65 millones de m3; los autores advirtieron que la

estimación depende en gran medida de la calidad de los datos y de la selección de coeficientes del modelo. Este antecedente es directamente pertinente para la estimación de las emisiones del botadero que opera la entidad estudiada.

Díaz-Archundia et al., (2017), en su artículo Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México, tuvieron como objetivo determinar la generación de metano en un relleno sanitario y en un botadero a cielo abierto según sus condiciones operativas y la caracterización de los residuos en temporadas de lluvia y de estiaje. La metodología combinó una lista de verificación operativa basada en la norma mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, la caracterización de los residuos y la medición directa de metano durante un año con un analizador portátil en pozos de venteo y cámaras superficiales. Los resultados indicaron que el relleno sanitario, mejor confinado, presentó emisiones superficiales de metano cercanas al 97 % por encima de las del botadero, mientras que el botadero registró un mayor contenido de material biodegradable (58,49 % frente a 50,36 %), lo que los autores asocian con las condiciones de disposición de cada sitio. En conjunto, estos antecedentes muestran la consolidación de los estándares de contabilidad de carbono en instituciones de distinto tipo y la relevancia del sector residuos en la medición de emisiones, dos elementos que enmarcan el presente inventario.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Palomino Ochante, (2019), en su tesis *Cálculo de la huella de carbono de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería*, tuvo como objetivo calcular la huella de carbono de dicha facultad e identificar sus principales fuentes de emisión. La metodología siguió el enfoque del GHG Protocol para elaborar un inventario de GEI por alcances

1, 2 y 3, tomando como periodo de referencia el semestre 2018-1. El resultado fue una huella aproximada de 168,74 tCO2e, en la que el transporte representó el 49,80 %, los residuos sólidos el 38,24 % y la electricidad el 11,96 % del total.

Loayza Pastor, (2023), en su tesis *Análisis de la huella de carbono de la Universidad Científica del Sur y propuesta de alternativas de mitigación en el contexto de la Covid-19*, se propuso estimar las emisiones de GEI del campus y plantear medidas de reducción. La metodología combinó el GHG Protocol Corporate Standard y la norma ISO 14064-1, con los alcances 1, 2 y 3 y año base 2020. Como resultado, las principales fuentes fueron la electricidad (38,76 %) y el transporte (31,20 %), seguidas del transporte de agua (19,17 %), la ganadería (6,26 %) y los viajes (6,08 %).

Zerón Cancha & Arias Chávez, (2019), en su tesis *Huella de Carbono según la ISO 14064-1:2011 de las actividades académicas de la Universidad Peruana Unión, sede Lima*, tuvieron como objetivo cuantificar las emisiones de GEI asociadas a las actividades académicas de la universidad. La metodología aplicó la norma ISO 14064-1:2011, abarcando los alcances 1, 2 y 3, durante el periodo de enero a octubre de 2019. El resultado fue una huella total de 1240,1 tCO2e para el periodo evaluado.

Castro Rodríguez, (2022), en su tesis *Huella de carbono según método Greenhouse Gas Protocol y la norma ISO 14064-1 en la I.E. N.° 22299 Carlos Cueto Fernandini, Ica*, tuvo como objetivo determinar la huella de carbono de una institución educativa pública. La metodología combinó el GHG Protocol y la norma ISO 14064-1, con los alcances 2 y 3, durante el periodo de abril a septiembre de 2022. El resultado fue una huella total cercana a 62,10 tCO2e, concentrada

en el alcance 3 (alrededor del 91 %), donde el transporte aportó el 46,46 % y el consumo de agua el 41,89 %, frente a una participación menor de la electricidad del alcance 2.

Salazar Davila et al., (2025), en su trabajo Cálculo de la huella de carbono según el GHG Protocol Corporate Standard en Laboratorios Clínicos Roe, tuvo como objetivo cuantificar la huella de carbono organizacional de una empresa de laboratorios clínicos y proponer ejes para un plan de mitigación. La metodología aplicó el GHG Protocol Corporate Standard sobre los alcances 1 y 2, con año base 2024, abarcando las treinta y dos sedes de la organización en Lima Metropolitana. El resultado fue una huella total de 313,14 tCO2e, en la que la electricidad (alcance 2) constituyó la fuente más representativa.

2.1.3. Antecedentes Regionales y Locales

Ayala Junco & Cordero Cuadros, (2021), en su tesis *Estimación de la huella de carbono de la Municipalidad Distrital de Tambo, Provincia de La Mar, Región de Ayacucho, 2020*, se propusieron como objetivo cuantificar la huella de carbono organizacional de un gobierno local de la provincia de La Mar, en la misma región que Huanta, como base para orientar medidas de gestión ambiental. La metodología aplicó el GHG Protocol Corporate Standard sobre los alcances 1, 2 y 3, con año base 2020, empleando factores de emisión del IPCC, del MINAM y de la base de datos del DEFRA. El resultado fue una huella total de 109,53 tCO2e, distribuida en 57,51 % en el alcance 1, 32,04 % en el alcance 2 y 10,45 % en el alcance 3; en ese caso, el inventario estuvo dominado por las emisiones directas del alcance 1.

2.2.Bases teóricas

2.2.1. Cambio climático y efecto invernadero

El efecto invernadero

El efecto invernadero es un proceso natural mediante el cual determinados gases presentes en la atmósfera absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, reteniendo energía que de otro modo escaparía al espacio y manteniendo la temperatura media del planeta en un rango compatible con la vida (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). La radiación solar de onda corta atraviesa la atmósfera y calienta la superficie; esta, a su vez, emite radiación de onda larga que los gases de efecto invernadero absorben parcialmente, devolviendo una fracción hacia la superficie. El balance entre la energía entrante y la saliente determina la temperatura de equilibrio del sistema climático, y cualquier alteración en la concentración de dichos gases modifica ese balance a través del denominado forzamiento radiativo.

El cambio climático de origen antropogénico

El cambio climático contemporáneo corresponde a la intensificación del efecto invernadero asociada al aumento de las concentraciones atmosféricas de gases como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, vinculado principalmente a la quema de combustibles fósiles, los cambios en el uso del suelo y la gestión de residuos. El Grupo de Trabajo I del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático concluye que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la superficie terrestre de manera inequívoca (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Esta tendencia se refleja en el registro instrumental más reciente: la concentración media global de dióxido de carbono alcanzó un

máximo histórico de 423,9 ppm en 2024, equivalente al 153 % de los niveles preindustriales (Organización Meteorológica Mundial, 2025). A diferencia de la variabilidad climática natural, este calentamiento se atribuye al forzamiento radiativo adicional originado en la actividad humana.

Desde el punto de vista normativo, la definición de referencia proviene de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que entiende el cambio climático como la variación del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural observada (Naciones Unidas, 1992). El Perú incorpora esta comprensión en su Ley Marco sobre Cambio Climático, la cual establece la gestión integral de las emisiones de gases de efecto invernadero como política de Estado (Congreso de la República del Perú, 2018). Este encuadre legal vincula la evidencia física global con obligaciones concretas para las entidades públicas peruanas, entre ellas la medición y la gestión de sus propias emisiones.

La respuesta al cambio climático no se agota en los acuerdos internacionales ni en la política nacional: los gobiernos locales ocupan una posición estratégica, pues administran servicios como el transporte, energía, limpieza pública y disposición de residuos cuyas emisiones son cuantificables y gestionables a escala municipal (Bulkeley, 2010). La cuantificación de la huella de carbono de una dependencia municipal se inscribe en ese papel de la gobernanza local frente al cambio climático, al traducir un problema planetario en información accionable para la gestión de la entidad.

2.2.2. Gases de efecto invernadero y potencial de calentamiento global

Principales gases de efecto invernadero

El GHG Protocol y las directrices internacionales para la elaboración de inventarios consideran un conjunto de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, entre los que destacan el dióxido de carbono (CO2), el metano (CH4) y el óxido nitroso (N2O), además de los gases fluorados empleados en refrigeración y otros usos industriales (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). En el marco peruano, la guía metodológica de la plataforma Huella de Carbono Perú adopta este mismo conjunto de gases para el cálculo de la huella corporativa (MINAM, 2020). Para una entidad como la estudiada, los tres primeros concentran la práctica totalidad de las emisiones, por lo que se describen a continuación según su origen.

El dióxido de carbono procede principalmente de la combustión de combustibles fósiles y, en menor medida, de la quema de residuos y de ciertas reacciones químicas; constituye el gas de referencia del sistema, tanto por su abundancia como por servir de unidad de comparación para los demás (US EPA, 2015). En el ámbito de una dependencia municipal se asocia a la combustión en la flota vehicular y los equipos, así como al consumo de electricidad de la red. El metano se libera durante la producción y el transporte de combustibles y, sobre todo, por la descomposición de los residuos orgánicos; en el ámbito municipal, una de sus fuentes más relevantes es la disposición final de residuos sólidos en sitios como botaderos y rellenos, donde la fracción biodegradable se degrada en condiciones anaerobias (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; US EPA, 2015). El óxido nitroso se desprende de actividades agrícolas e industriales, de la combustión de combustibles y residuos y del tratamiento de aguas residuales, con aportes generalmente menores

en términos de masa (US EPA, 2015). En términos generales, en un gobierno local el CO2 ligado a la energía y el transporte y el CH4 ligado a los residuos tienden a constituir las fuentes predominantes del inventario.

El potencial de calentamiento global y la unidad de reporte

Dado que cada gas difiere en su capacidad de retener energía y en su tiempo de permanencia en la atmósfera, las emisiones de gases distintos no son directamente comparables ni agregables. El potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) resuelve este problema: expresa la energía que una unidad de masa de un gas retiene a lo largo de un horizonte temporal en relación con la misma masa de dióxido de carbono, al que se asigna por convención un valor de uno (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). El horizonte de 100 años es el de uso estándar en los inventarios de gases de efecto invernadero. Multiplicando cada emisión por el GWP correspondiente y sumando los resultados, el inventario se expresa en una unidad común, la tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO2e), que constituye la unidad de reporte habitual en los inventarios de gases de efecto invernadero (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

En la Tabla 2 presenta los valores de GWP a 100 años del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) para los gases más relevantes. Se adoptan los valores del AR5, y no los del informe más reciente, para preservar la comparabilidad con la plataforma Huella de Carbono Perú, que sustenta en ese informe el cálculo de la huella corporativa (MINAM, 2020). Aunque en masa el óxido nitroso y el metano se emiten en cantidades muy inferiores a las del dióxido de carbono, sus elevados valores de GWP hacen que su contribución al total expresado en tCO2e pueda ser considerable.

Tabla 2

Potencial de calentamiento global (GWP) a 100 años de los principales gases de efecto invernadero

Gas	Fórmula	GWP a 100 años
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	28
Óxido nitroso	N_2O	265

Nota. Valores del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) para un horizonte de 100 años, sin retroalimentación del ciclo del carbono. Se adoptan estos valores, y no los del Sexto Informe, para mantener la coherencia con la plataforma Huella de Carbono Perú, que emplea el AR5 (MINAM, 2020).

2.2.3. Huella de carbono: concepto y tipos

Concepto de Huella de carbono

El término huella de carbono fue definido de manera operativa como la cantidad total de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero emitidos de forma directa e indirecta por una actividad o acumulados a lo largo del ciclo de vida de un producto (Wiedmann & Minx, 2008). En un sentido más amplio, se entiende como la medida del total de gases de efecto invernadero emitidos, directa e indirectamente, por una actividad, una organización, un producto o un territorio, expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente (Balouktsi, 2020). El indicador traduce un conjunto heterogéneo de fuentes y gases a una cifra única y comparable, lo que lo ha convertido en una de las herramientas más difundidas para diagnosticar la contribución de un agente al cambio climático y para orientar medidas de reducción (Pandey et al., 2011). Su cálculo no responde a un procedimiento único: el resultado depende del objeto que se mida, de los límites que se fijen y de las fuentes de emisión que se incluyan, razón por la cual existen distintos tipos de huella y distintos estándares que los regulan (Gao et al., 2014; Pandey et al., 2011).

Tipos de huella de carbono

La huella organizacional o corporativa cuantifica las emisiones asociadas a las operaciones de una organización o entidad durante un período determinado, y es la que se rige por el GHG Protocol Corporate Standard y por la norma ISO 14064-1 (International Organization for Standardization, 2018; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). La huella de producto contabiliza las emisiones a lo largo del ciclo de vida de un bien o servicio, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, y se asocia a estándares de análisis de ciclo de vida (Gao et al., 2014). La huella territorial o comunitaria mide las emisiones de una jurisdicción geográfica una ciudad, una región o un país y cuenta con protocolos propios, como el destinado a inventarios a escala de comunidades y ciudades (World Resources Institute et al., 2014).

Una distinción transversal a estos tipos es la que separa los enfoques basados en la producción de los basados en el consumo: los primeros atribuyen las emisiones al lugar donde físicamente se producen, mientras que los segundos las imputan al consumidor final de los bienes y servicios (Balouktsi, 2020). En la contabilidad organizacional predomina el enfoque basado en la producción, que atribuye a la organización las emisiones generadas por las fuentes que opera o controla (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Tabla 3

Tipos de huella de carbono según el objeto de estudio

Tipo	Objeto de medición	Estándar de referencia
Organizacional	Una organización y sus operaciones	GHG Protocol Corporate; ISO 14064-1
De producto	Un bien o servicio en su ciclo de vida	Estándares de análisis de ciclo de vida
Territorial	Un territorio o jurisdicción	Protocolo para comunidades y ciudades (GPC)

Nota. En los tres casos las emisiones se expresan en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2e). La huella de producto suele referirse a una unidad funcional del bien o servicio.

2.2.4. El GHG Protocol Corporate Standard

El GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard es el estándar de referencia para la contabilidad y el reporte de emisiones de gases de efecto invernadero a escala organizacional. Fue desarrollado por el World Resources Institute y el World Business Council for Sustainable Development con el propósito de ofrecer un marco metodológico común que permitiera elaborar inventarios consistentes, comparables y verificables entre organizaciones (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Su amplia difusión lo ha convertido en el estándar corporativo más utilizado a nivel internacional y en la base de numerosas iniciativas nacionales (Gao et al., 2014); en el Perú, la plataforma Huella de Carbono Perú del Ministerio del Ambiente sustenta en él la metodología de cálculo de la huella corporativa (MINAM, 2020).

Principios de contabilidad y reporte

El estándar establece cinco principios que orientan la elaboración del inventario y buscan asegurar que el resultado represente fielmente las emisiones de la organización; la norma ISO 14064-1 recoge principios equivalentes (International Organization for Standardization, 2018; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). La

relevancia exige que el inventario refleje las emisiones de manera apropiada a las necesidades de decisión de los usuarios, internos y externos. La integridad o exhaustividad requiere contabilizar todas las fuentes y actividades dentro de los límites definidos, y justificar y declarar cualquier exclusión. La consistencia obliga a emplear metodologías uniformes a lo largo del tiempo, de modo que las comparaciones interanuales sean significativas, documentando todo cambio de método o de datos. La transparencia demanda que los supuestos, las metodologías y las fuentes de los datos se expongan de forma clara y trazable, de manera que terceros puedan revisar el inventario. Por último, la exactitud procura que las emisiones cuantificadas no presenten sesgos sistemáticos y que la incertidumbre se reduzca en la medida de lo posible. Estos principios operan como criterios de calidad de cualquier inventario corporativo de emisiones.

Relación con la norma ISO 14064-1

El GHG Protocol Corporate Standard y la norma ISO 14064-1 son instrumentos complementarios más que excluyentes: ambos abordan la cuantificación y el reporte de emisiones a escala organizacional y comparten la lógica de límites y de clasificación de las emisiones (Gao et al., 2014; International Organization for Standardization, 2018). El GHG Protocol ofrece una guía metodológica detallada para construir el inventario, mientras que la norma ISO 14064-1 establece requisitos verificables para su cuantificación y reporte.

2.2.5. Límites de inventario: organizacional y operativo

El resultado de un inventario de emisiones depende de forma decisiva de los límites que se establezcan, pues estos determinan qué fuentes se incluyen y cuáles quedan fuera del cálculo; distintas definiciones de los límites pueden arrojar magnitudes muy diferentes para una misma organización (Matthews et al., 2008; Pandey et al., 2011). El GHG Protocol Corporate Standard

distingue dos tipos de límites que deben fijarse de manera sucesiva: el límite organizacional, que define qué instalaciones y operaciones forman parte de la organización, y el límite operativo, que clasifica las emisiones de esas operaciones (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Límite organizacional

El límite organizacional delimita qué entidades, instalaciones y actividades se consolidan en el inventario. El GHG Protocol contempla dos criterios de consolidación: el de participación accionaria y el de control; este último puede ejercerse, a su vez, bajo un enfoque de control financiero o de control operacional (US EPA, 2022; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Bajo el criterio de participación accionaria, la organización contabiliza las emisiones en proporción a su participación en la propiedad de cada operación. Bajo el enfoque de control financiero, contabiliza la totalidad de las emisiones de las operaciones sobre las que ejerce control financiero, esto es, aquellas cuya dirección económica le corresponde. Bajo el enfoque de control operacional, contabiliza la totalidad de las emisiones de las operaciones que opera directamente o sobre cuyas políticas operativas tiene autoridad plena. La norma ISO 14064-1 reconoce criterios de consolidación equivalentes (International Organization for Standardization, 2018). La elección del criterio condiciona qué emisiones se atribuyen a la organización y, por tanto, la magnitud final del inventario.

Límite operativo

Una vez fijado el límite organizacional, el límite operativo determina qué emisiones de las operaciones incluidas se contabilizan y cómo se clasifican (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). El estándar distingue entre emisiones

directas procedentes de fuentes que son propiedad de la organización o que esta controla; mientras que las emisiones indirectas consecuencia de las actividades de la organización, pero originadas en fuentes que pertenecen o son controladas por terceros. Sobre esta distinción se construye la clasificación de las emisiones en alcances 1, 2 y 3.

2.2.6. Alcances de las emisiones: 1, 2 y 3

A partir de la distinción entre emisiones directas e indirectas que define el límite operativo, el GHG Protocol clasifica las emisiones en tres alcances, con el fin de organizar el inventario y evitar la doble contabilidad cuando varias organizaciones reportan emisiones relacionadas (Matthews et al., 2008; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Esta clasificación se ha convertido en el lenguaje común de los inventarios organizacionales.

Alcance 1: emisiones directas

El alcance 1 comprende las emisiones directas procedentes de fuentes que son propiedad de la organización o que esta controla (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). Incluye la combustión fija en calderas, hornos o generadores y la combustión móvil de la flota vehicular propia, así como las emisiones de procesos y las fugas. En entidades que operan instalaciones de tratamiento o disposición de residuos bajo su control, el metano generado en dichas instalaciones se contabiliza también como emisión directa.

Alcance 2: emisiones indirectas por energía

El alcance 2 abarca las emisiones indirectas asociadas a la generación de la electricidad, el vapor, el calor o el frío adquiridos y consumidos por la organización (World Resources Institute &

World Business Council for Sustainable Development, 2004). Aunque la combustión que las origina ocurre físicamente en las centrales de generación, se atribuyen a la organización porque resultan de su consumo de energía. En la práctica, el alcance 2 se concentra habitualmente en la electricidad comprada a la red.

Alcance 3: otras emisiones indirectas

El alcance 3 reúne las demás emisiones indirectas que son consecuencia de las actividades de la organización pero se originan en fuentes que no son de su propiedad ni están bajo su control, tanto aguas arriba como aguas abajo de sus operaciones (Huang et al., 2009). Comprende, entre otras, las emisiones asociadas a los bienes y servicios adquiridos como el papel y otros insumos, los viajes, el transporte contratado a terceros y la gestión de residuos por operadores externos. Su reporte es opcional en el estándar corporativo y su estimación suele requerir métodos específicos, dada la amplitud y heterogeneidad de las fuentes implicadas (Huang et al., 2009; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Tabla 4

Clasificación de las emisiones en alcances según el GHG Protocol

Alcance	Tipo de emisión	Ejemplo
Alcance 1	Directas	Combustión fija y móvil de fuentes propias; metano de residuos en instalaciones controladas
Alcance 2	Indirectas por energía	Electricidad adquirida de la red
Alcance 3	Otras indirectas	Bienes y servicios adquiridos, viajes, transporte tercerizado, residuos gestionados por terceros

Nota. El reporte del alcance 3 es opcional en el GHG Protocol Corporate Standard.

2.2.7. Dato de la actividad, factor de emisión y cuantificación

La cuantificación de las emisiones de un inventario rara vez se obtiene por medición directa en cada fuente, pues ello exigiría instrumentación continua en cada chimenea, vehículo o punto de escape. En su lugar, las directrices internacionales estiman las emisiones de manera indirecta a partir de una identidad operativa básica: el producto entre un dato que describe la magnitud de una actividad y un coeficiente que traduce esa actividad en una cantidad de gas emitido (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). La guía metodológica de la plataforma Huella de Carbono Perú adopta este mismo procedimiento para el cálculo de la huella corporativa (MINAM, 2020), y la literatura metodológica lo reconoce como el enfoque predominante para los inventarios organizacionales (Pandey et al., 2011).

Dato de actividad

El dato de actividad (DA) es la medida cuantitativa de la actividad humana que da lugar a una emisión durante el periodo del inventario (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Se expresa en las unidades físicas propias de cada fuente: litros o galones de combustible consumidos por la flota vehicular y los equipos, kilovatios-hora de electricidad adquiridos de la red, kilogramos de residuos dispuestos en el sitio de disposición final o toneladas de insumos empleados, entre otros. La calidad del inventario depende en buena medida de la trazabilidad de estos datos, que idealmente proceden de registros primarios de la organización como comprobantes de combustible, recibos de electricidad, reportes de consumo antes que de estimaciones (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Factor de emisión

El factor de emisión (FE) es el coeficiente que relaciona la cantidad de un gas emitido con la unidad de actividad que lo origina; representa, por ejemplo, la masa de dióxido de carbono liberada por litro de combustible quemado o por kilovatio-hora de electricidad consumido (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Cada combinación de fuente y gas posee su propio factor, de modo que una misma actividad puede generar simultáneamente CO2, CH4 y N2O con coeficientes distintos.

La selección de los factores sigue un criterio de representatividad y trazabilidad: se prefieren los factores nacionales o locales, que reflejan las condiciones tecnológicas y energéticas del contexto, y solo en su ausencia se recurre a los valores por defecto de alcance internacional (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). En el caso peruano, la plataforma Huella de Carbono Perú del Ministerio del Ambiente provee los factores de emisión oficiales para el cálculo de la huella corporativa, incluido el de la electricidad del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), pertinente para las emisiones indirectas por consumo eléctrico (MINAM, 2020).

Ecuación general de cuantificación

Combinando ambos elementos con el potencial de calentamiento global presentado en el apartado 2.2.2, las emisiones totales de un inventario se expresan en toneladas de dióxido de carbono equivalente mediante la siguiente identidad general:

$$E_{\mathrm{CO_2e}} = \sum_{i} \sum_{g} DA_i \times FE_{i,g} \times GWP_g$$

donde ECO2e son las emisiones totales en tCO2e, DAi es el dato de actividad de la fuente i, FEi,g es el factor de emisión del gas g asociado a esa fuente y GWPg es el potencial de calentamiento global del gas g a un horizonte de cien años. La doble suma agrega las emisiones de todos los gases en todas las fuentes consideradas dentro de los límites del inventario (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

2.2.8. Norma ISO 14064-1

Junto al GHG Protocol, la norma ISO 14064-1 constituye el otro referente internacional para la contabilidad de gases de efecto invernadero a nivel de organización. En su versión vigente, la norma específica los principios y requisitos para la cuantificación y el reporte de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero de una organización, y ofrece orientación sobre el diseño, el desarrollo y la gestión de su inventario (International Organization for Standardization, 2018). Mientras el GHG Protocol se concibió como un estándar de contabilidad y reporte de amplia adopción voluntaria, la ISO 14064-1 aporta una especificación normalizada, susceptible de verificación por terceros, sobre la misma materia (Gao et al., 2014).

Contenido y alcance de la norma

La ISO 14064-1 establece los componentes que debe contener un inventario organizacional: la definición de los límites de la organización, la identificación de las emisiones directas e indirectas, la cuantificación de las emisiones y remociones, y los criterios de documentación y reporte (International Organization for Standardization, 2018). Sus principios rectores como pertinencia, integridad, consistencia, exactitud y transparencia coinciden con los del

GHG Protocol descritos en el apartado 2.2.4, lo que refleja la convergencia conceptual entre ambos instrumentos (Gao et al., 2014).

Complementariedad con el GHG Protocol

La aplicación conjunta de ambos referentes es frecuente en los inventarios organizacionales. La cuantificación de la huella de carbono de un campus universitario, por ejemplo, combinó explícitamente la norma ISO 14064-1 con el GHG Protocol Corporate Standard (Cano et al., 2023). En el marco peruano, la guía metodológica de la plataforma Huella de Carbono Perú se declara alineada con ambos referentes (MINAM, 2020).

2.2.9. Gestión de residuos sólidos municipales y generación de metano

El Anexo de definiciones del Decreto Legislativo N.° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, fija los términos del sector que se emplean en este apartado (Poder Ejecutivo del Perú, 2017). Conforme a esa norma, la gestión integral de residuos es “toda actividad técnica administrativa de planificación, coordinación, concertación, diseño, aplicación y evaluación de políticas, estrategias, planes y programas de acción de manejo apropiado de los residuos sólidos”.

El servicio de limpieza pública y la disposición final

Los residuos municipales son los conformados por los residuos domiciliarios y los provenientes del barrido y la limpieza de espacios públicos, incluidos los de actividades comerciales y urbanas no domiciliarias asimilables a los servicios de limpieza pública dentro de la jurisdicción. Su manejo comprende el barrido, la recolección, el transporte, la transferencia, la valorización y la disposición final. La disposición final es el conjunto de “procesos u operaciones para tratar y disponer en un lugar los residuos como último proceso de su manejo en forma

permanente, sanitaria y ambientalmente segura". La celda es la infraestructura ubicada dentro de un relleno sanitario donde se esparcen y compactan finalmente los residuos depositados.

Botadero y relleno sanitario

La norma define dos modalidades contrapuestas de disposición final. El relleno sanitario es la "instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos municipales en superficie o bajo tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental". El botadero es la "acumulación inapropiada de residuos en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas, rurales o baldías que generan riesgos sanitarios o ambientales", que existe al margen de la ley y carece de autorización. El relleno mixto es la infraestructura para la disposición final de residuos municipales que además incluye celdas de seguridad para el manejo de residuos peligrosos.

Degradación anaeróbica y generación de metano

La degradación anaerobia es la descomposición de la materia orgánica por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. En los sitios de disposición de residuos, este proceso ocurre de forma natural en las capas profundas y da lugar al biogás (Martinez, 2003). El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2) (Díaz-Archundia et al., 2017; Martinez, 2003). El metano generado por esta vía es de origen biogénico.

El grado de confinamiento del sitio de disposición condiciona la generación de metano. En un estudio comparativo realizado en México Díaz-Archundia et al., (2017) midieron las emisiones superficiales de metano en un relleno sanitario controlado y en un botadero a cielo abierto, y reportaron diferencias entre ambas modalidades.

2.2.10. Modelos de estimación de metano: FOD del IPCC y LandGEM

Las emisiones de metano de un sitio de disposición de residuos se estiman mediante modelos y no se obtienen por medición directa en la práctica habitual del inventario, porque la liberación del gas es difusa y se prolonga durante décadas tras la disposición (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Los modelos de uso más extendido es el método de descomposición de primer orden del IPCC y el modelo LandGEM de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos donde comparten el supuesto de que el carbono orgánico degradable de los residuos se descompone siguiendo una cinética de primer orden (Alexander et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

El método de descomposición de primer orden (FOD)

El método de descomposición de primer orden (First Order Decay, FOD) supone que la fracción orgánica degradable de los residuos se descompone de manera gradual, de modo que la generación de metano alcanza un máximo en los primeros años posteriores a la disposición y decae de forma exponencial en los años siguientes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). El potencial de generación de metano por unidad de masa de residuo se expresa en función de un conjunto de parámetros:

$$L_0 = MCF \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot F \cdot \frac{16}{12},$$

donde L0 es la capacidad potencial de generación de metano, DOC el carbono orgánico degradable contenido en el residuo, DOCf la fracción de ese carbono que efectivamente se descompone, MCF el factor de corrección de metano, F la fracción de metano en el gas generado y el cociente 16/12 la relación entre las masas molares del metano y del carbono. El factor de

corrección de metano toma su valor más alto en los rellenos gestionados con condiciones anaerobias y valores menores en los sitios no gestionados y de poca profundidad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). La rapidez de la descomposición se gobierna por la constante de generación de metano k, expresada en año^{-1}, cuyo valor aumenta con la humedad y la temperatura del sitio.

El modelo LandGEM

El modelo LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) es una herramienta desarrollada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos que aplica la cinética de primer orden para estimar la generación anual de gas de relleno (Alexander et al., 2005). Su ecuación es:

$$Q_{\mathrm{CH_4}} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} k\, L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-k\, t_{ij}},$$

donde QCH4 es la generación anual de metano (m3/año), n el número de años transcurridos desde el inicio de la disposición, k la constante de generación de metano (año-1), L0 la capacidad potencial de generación de metano (m3/Mg), Mi la masa de residuos dispuesta en el año i (Mg) y tij la antigüedad de la fracción j de la masa Mi (Alexander et al., 2005). El modelo incorpora valores por defecto de k y L0 que el usuario puede sustituir por parámetros específicos del sitio.

Datos de entrada y aplicaciones

Ambos modelos requieren como dato de entrada principal la serie histórica de la masa de residuos dispuesta a lo largo del tiempo, junto con la composición de los residuos que determina el carbono orgánico degradable y la caracterización del tipo de sitio (Alexander et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). El modelo LandGEM se ha aplicado a sitios

de disposición en América Latina: (Ambuludi-Paredes et al., 2021) estimaron la generación de metano del relleno sanitario de Patate-Pelileo, en Ecuador, y (Armenta-Rivas et al., 2017) modelaron la producción de metano de un relleno sanitario en Santa Marta, Colombia. En el Perú, (Madrigal Perez et al., 2018) lo emplearon para estimar la generación de biogás del relleno sanitario proyectado para la ciudad de Juliaca.

2.3.Marco legal e institucional

2.3.1. Marco internacional y compromiso nacional

El compromiso del Perú frente al cambio climático se inscribe en el régimen internacional construido en torno a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y a los instrumentos que la desarrollan.

La Convención Marco y el régimen internacional del Clima

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en 1992, constituye el primer tratado internacional dirigido a estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida una interferencia peligrosa con el sistema climático (Naciones Unidas, 1992). La Convención organiza la cooperación internacional bajo el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, que reconoce la distinta contribución histórica de los países a las emisiones acumuladas. Su primer instrumento de desarrollo con compromisos cuantificados fue el Protocolo de Kioto, adoptado en 1997, que fijó metas vinculantes de reducción de emisiones para los países desarrollados durante un primer período de compromiso (Naciones Unidas, 1997).

El Acuerdo de París

El Acuerdo de París, adoptado en 2015 durante la vigésima primera Conferencia de las Partes, estableció el objetivo de limitar el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2 °C respecto de los niveles preindustriales y de proseguir los esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C (Naciones Unidas, 2015). A diferencia del Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París es de alcance universal y se articula en torno a las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional: cada Parte define y comunica sus propias metas de mitigación y adaptación, que se revisan y actualizan de manera periódica (Naciones Unidas, 2015).

La Contribución Determinada a Nivel Nacional del Perú

En cumplimiento de ese compromiso, el Perú presentó su Contribución Determinada a Nivel Nacional ante la Convención (Ministerio del Ambiente del Perú, 2020). La contribución establece una meta de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del 30 % al año 2030 con recursos propios, ampliable al 40 % de manera condicionada al financiamiento internacional, y fija un límite de 179 MtCO2eq al año 2030 (SPDA, 2020)

2.3.2. Marco normativo nacional

La Ley Marco sobre Cambio Climático y sus instrumentos

La Ley N.° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático, establece los principios y disposiciones para la gestión de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en el país (Congreso de la República del Perú, 2018); su reglamento, aprobado por el Decreto Supremo N.° 013-2019-MINAM, desarrolla los instrumentos para su aplicación (MINAM, 2019). Entre esos instrumentos figura el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, denominado

INFOCARBONO, creado por el Decreto Supremo N.° 013-2014-MINAM y administrado por el Ministerio del Ambiente, que recopila y sistematiza la información sobre las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero del país (Ministerio del Ambiente del Perú, 2014).

El régimen de gestión de residuos sólidos

En materia de residuos sólidos, el Decreto Legislativo N.° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, distribuye las competencias del sector entre el Ministerio del Ambiente, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental y los gobiernos regionales y locales (Poder Ejecutivo del Perú, 2017); su reglamento, aprobado por el Decreto Supremo N.° 014-2017-MINAM, desarrolla la gestión integral de los residuos y precisa las competencias de los gobiernos locales (Ministerio del Ambiente del Perú, 2017). La fiscalización ambiental de la gestión municipal de los residuos sólidos corresponde al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (Oefa, 2014).

2.3.3. Huella de Carbono Perú (MINAM)

Naturaleza y alcance de la herramienta

Huella de Carbono Perú es la herramienta oficial del Ministerio del Ambiente para que las organizaciones públicas y privadas midan, reporten, reduzcan y neutralicen sus emisiones de gases de efecto invernadero. Su funcionamiento fue aprobado mediante la Resolución Ministerial N.° 185-2021-MINAM, que aprobó la segunda versión de su guía, y su metodología se declara alineada con el GHG Protocol Corporate Standard y la norma ISO 14064-1 (MINAM, 2020). La plataforma pone además a disposición de las organizaciones factores de emisión de referencia nacional, entre ellos el de la red eléctrica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (MINAM, 2020).

Los niveles de reconocimiento

La plataforma otorga a las organizaciones un reconocimiento oficial organizado en cuatro niveles progresivos, representados mediante estrellas (Gestión, 2026). El primer nivel corresponde a la medición y el reporte de las emisiones mediante la herramienta oficial; el segundo, a la verificación externa de esa medición conforme a la norma ISO 14064-3; el tercero, a la reducción efectiva de las emisiones comprobada entre dos mediciones verificadas de años consecutivos; y el cuarto, denominado reducción+, a la adopción de acciones complementarias como la neutralización de las emisiones, su reducción sostenida en el tiempo o la incorporación de los proveedores en la gestión de la huella (Gestión, 2026).

2.3.4. Marco institucional local: la GSMGA de la MPH

El marco normativo desciende finalmente al nivel de la entidad responsable de los servicios asociados a las emisiones: la Municipalidad Provincial de Huanta y, dentro de ella, la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental.

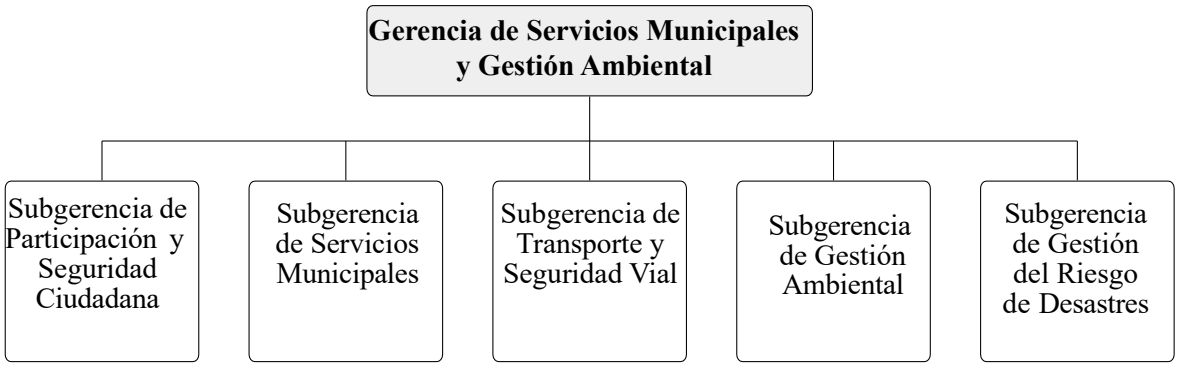
Competencias municipales en materia ambiental

La Ley N.° 27972, Ley Orgánica de Municipalidades, define a los gobiernos locales como entidades básicas de la organización territorial del Estado y les asigna competencias en materia de saneamiento ambiental y de protección y preservación del ambiente, así como la regulación del servicio de limpieza pública y del tratamiento de los residuos sólidos (Congreso de la República del Perú, 2023). Esas competencias se articulan, en materia de residuos, con la distribución establecida por el Decreto Legislativo N.° 1278, que atribuye a los gobiernos locales la gestión de los residuos sólidos en el ámbito de su jurisdicción (Poder Ejecutivo del Perú, 2017).

La Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental

En el ámbito local, la Municipalidad Provincial de Huanta ordena sus funciones median-te su Reglamento de Organización y Funciones. Conforme a ese documento, la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental es un órgano de línea encargado de las materias de ambiente, defensa civil, seguridad ciudadana, transporte público y saneamiento (Municipalidad Provincial de Huanta, 2023). La gerencia se organiza en cinco subgerencias: la Subgerencia de Participación y Seguridad Ciudadana, la Subgerencia de Servicios Municipales, la Subgerencia de Transporte y Seguridad Vial, la Subgerencia de Gestión Ambiental y la Subgerencia de Gestión del Riesgo de Desastres. Entre ellas, la Subgerencia de Servicios Municipales tiene a su cargo la limpieza pública, el barrido, el reciclaje y la disposición final de los residuos sólidos (Municipalidad Provincial de Huanta, 2023). Estas funciones comprenden actividades, el uso de vehículos para el transporte y la recolección, el consumo de energía y la disposición final de residuos que constituyen fuentes de emisión de gases de efecto invernadero.

Figura 1: Estructura orgánica de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta. La gerencia, órgano de línea, se compone de cinco subgerencias; la Subgerencia de Servicios Municipales tiene a su cargo la limpieza pública, el barrido, el reciclaje y la disposición final de los residuos sólidos. Elaboración propia a partir del Reglamento de Organización y Funciones (Municipalidad Provincial de Huanta, 2023).



2.4.Definición de términos

Alcance 1

Emisiones directas procedentes de fuentes que son propiedad de la organización o que esta controla (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Alcance 2

Emisiones indirectas asociadas a la generación de la electricidad, el vapor, el calor o el frío adquiridos y consumidos por la organización (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Alcance 3

Otras emisiones indirectas, consecuencia de las actividades de la organización, originadas en fuentes que pertenecen o son controladas por terceros (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Botadero

Acumulación inapropiada de residuos en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas, rurales o baldías que generan riesgos sanitarios o ambientales, existente al margen de la ley y sin autorización (Poder Ejecutivo del Perú, 2017).

Control operacional

Enfoque de consolidación del límite organizacional bajo el cual la organización contabiliza la totalidad de las emisiones de las operaciones que opera directamente o sobre cuyas políticas

operativas tiene autoridad plena (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Dato de actividad

Medida cuantitativa de una actividad generadora de emisiones por ejemplo, el volumen de combustible consumido o la energía eléctrica adquirida en un periodo determinado (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Descomposición de Primer Orden (FOD)

Método de estimación que supone que la fracción orgánica degradable de los residuos se descompone siguiendo una cinética de primer orden, con una generación de metano que decae de forma exponencial en el tiempo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Dióxido de Carbono Equivalente (CO2e)

Unidad común de reporte de los inventarios que expresa la cantidad de cada gas en términos de la masa de dióxido de carbono con un efecto equivalente sobre el calentamiento global (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Factor de emisión

Coeficiente que relaciona la cantidad de un gas de efecto invernadero emitida con una unidad de dato de actividad (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Gas de Efecto Invernadero (GEI)

Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y reemite la radiación infrarroja (Naciones Unidas, 1992).

Huella de carbono organizacional

Cantidad total de gases de efecto invernadero emitidos de forma directa e indirecta por una organización, expresada en dióxido de carbono equivalente.

Límite operativo

Criterio que, una vez fijado el límite organizacional, determina qué emisiones de las operaciones incluidas se contabilizan y cómo se clasifican en alcances (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Límite organizacional

Criterio que define qué instalaciones y operaciones se consolidan en el inventario de una organización, según los enfoques de participación accionaria o de control (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

Potencial de Calentamiento Global (GWP)

Índice que expresa la energía que una unidad de masa de un gas retiene a lo largo de un horizonte temporal, habitualmente cien años en relación con la misma masa de dióxido de carbono. La definición del índice es general y sus valores se actualizan en cada informe de evaluación del IPCC; el presente inventario adopta los del Quinto Informe (AR5) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013), por comparabilidad con la plataforma Huella de Carbono Perú (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021).

Relleno sanitario

Instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos municipales en superficie o bajo tierra, basada en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental (Poder Ejecutivo del Perú, 2017).

CAPÍTULO 3

III. METODOLOGÍA

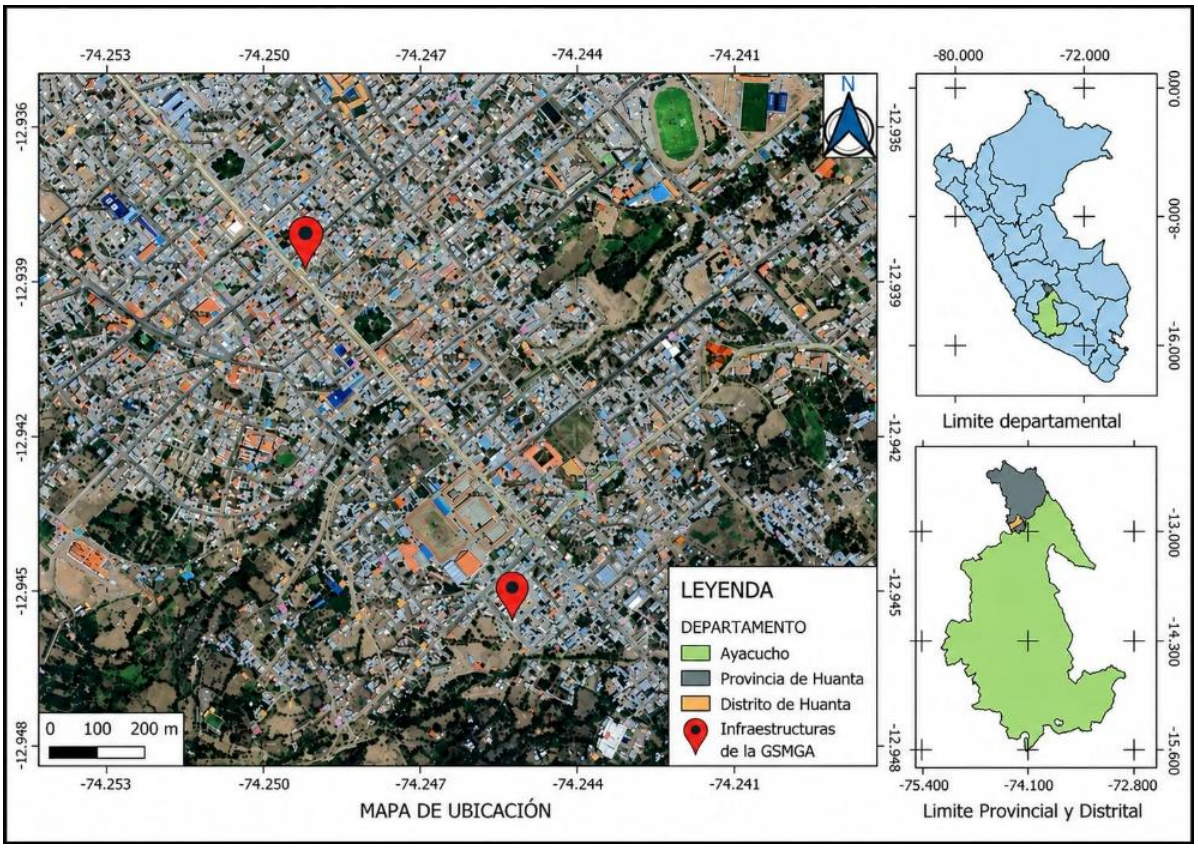
3.1.Área de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica

La provincia de Huanta se sitúa en el departamento de Ayacucho, en la sierra sur central del Perú, y es una de las once provincias que conforman dicho departamento. Su capital es la ciudad de Huanta, ubicada a una altitud aproximada de 2 627 msnm y en las coordenadas 12°56’ de latitud sur y 74°14’ de longitud oeste. La provincia abarca una superficie aproximada de 3 879 km² y se organiza en trece distritos, entre los cuales el distrito de Huanta concentra la capital provincial y la sede de la Municipalidad Provincial de Huanta. Según el Censo Nacional 2017, la provincia registró 89 466 habitantes, en el marco de un departamento de Ayacucho con 616 176 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). La ciudad de Huanta se localiza sobre el eje vial que la conecta con la ciudad de Ayacucho, hacia el sur, y con la sierra central del país, hacia el norte.

Figura 1

Mapa de ubicación de la GSMGA



La GSMGA es el órgano de línea de la Municipalidad Provincial de Huanta encargado de las materias de ambiente, saneamiento, seguridad ciudadana, transporte público y gestión del riesgo de desastres, y se organiza en cinco subgerencias, según su Reglamento de Organización y Funciones (Municipalidad Provincial de Huanta, 2023). Entre ellas, la Subgerencia de Servicios Municipales tiene a su cargo la limpieza pública, el barrido, el reciclaje y la disposición final de los residuos sólidos. Estas funciones determinan las fuentes de emisión que se cuantifican en el inventario: el consumo de combustible de la flota destinada a la recolección y el transporte, el consumo de energía eléctrica de sus instalaciones y la disposición final de los residuos sólidos.

Las actividades administrativas y operativas de la gerencia se distribuyen en dos sedes físicas: la central de cámaras, situada en el centro de la ciudad de Huanta, y un conjunto de oficinas

que funcionan en el terminal terrestre de la ciudad. La disposición final de los residuos sólidos recolectados se realiza en el botadero municipal, localizado sobre la ruta que une Huanta con Huancayo. Esta configuración tiene como sedes administrativas en el área urbana y un punto de disposición final en las afueras de la ciudad donde define el alcance espacial de las fuentes consideradas en el inventario.

3.2.Tipo, diseño y nivel de investigación

La investigación se clasifica a partir de cuatro dimensiones complementarias enfoque, tipo, nivel y diseño de acuerdo con el marco propuesto por (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

3.2.1. Enfoque y tipo de investigación

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, en tanto las emisiones de gases de efecto invernadero se miden y se expresan numéricamente en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO2e) mediante la combinación de datos de actividad y factores de emisión. Por su finalidad, la investigación es de tipo aplicada, ya que no busca generar teoría nueva, sino emplear un marco metodológico ya establecido.

3.2.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo. En este nivel el estudio se propone tres alcances sucesivos sobre un mismo objeto. El primero es describir y caracterizar: identificar las fuentes de emisión de la GSMGA, clasificarlas por alcance y reportar la magnitud y la composición de sus emisiones durante el año base. El segundo es estimar: obtener el valor de aquellas emisiones que no admiten medición directa, como el metano del botadero municipal, mediante el modelo de

descomposición de primer orden y los factores de emisión documentados. El tercero es verificar: comprobar que el ordenamiento de las fuentes obtenido se sostiene dentro del rango de incertidumbre de los parámetros del modelo, para lo cual se recurre al análisis de incertidumbre descrito en el capítulo 3. El estudio no pretende explicar las causas de dichas emisiones ni establecer relaciones de causa y efecto entre variables; en consecuencia, los resultados se interpretan como una descripción del estado de las emisiones de la entidad y no como evidencia de mecanismos causales.

3.2.3. Diseño de investigación

El diseño es no experimental, porque no se manipula deliberadamente ninguna variable ni se somete a la entidad a condiciones controladas; las fuentes de emisión se observan y se cuantifican tal como ocurren en su contexto real de operación. Asimismo, el diseño es transversal o transeccional, dado que los datos de actividad corresponden a un único período de referencia el año 2025, adoptado como año base y el inventario representa, por tanto, una medición referida a ese horizonte temporal y no una serie de mediciones repetidas en el tiempo (Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018).

3.2.4. Población y unidad de análisis

La población de estudio está constituida por la totalidad de las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero bajo control operacional de la GSMGA durante el año 2025: las fuentes móviles de la flota de recolección y transporte, el sitio de disposición final de residuos que la entidad opera y los suministros de energía eléctrica adquirida de la red. La unidad de análisis es cada una de esas fuentes, y la unidad de observación, el registro administrativo que documenta su

dato de actividad (la orden de adquisición de combustible, el registro operativo de disposición y el recibo de la concesionaria eléctrica).

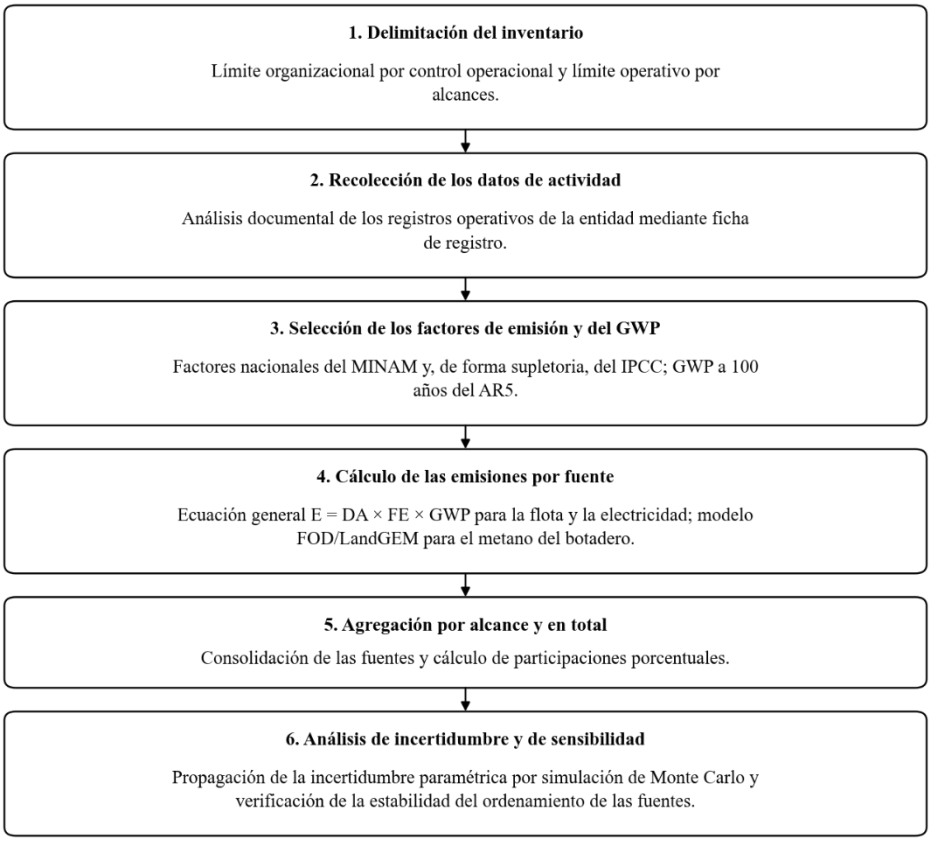
No se aplica técnica de muestreo alguna, y la razón es de diseño y no de omisión. El estudio es censal: trabaja sobre el universo de las fuentes identificadas, no sobre un subconjunto extraído de él. Se cuantifica la totalidad del combustible adquirido durante el ejercicio, la totalidad de los residuos dispuestos y la totalidad de los suministros eléctricos de la entidad. En consecuencia, la población y la muestra coinciden, no existe error muestral que estimar ni inferencia que realizar desde una muestra hacia una población, y las magnitudes comparadas son las del propio universo estudiado (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Esta condición censal es, además, un requisito del propio estándar aplicado: el principio de integridad del GHG Protocol Corporate Standard exige contabilizar todas las fuentes comprendidas dentro de los límites declarados, de modo que un inventario construido sobre una muestra de sus propias fuentes no satisfaría el estándar (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

3.2.5. Procedimiento de la investigación

El estudio se desarrolló en seis etapas encadenadas, cada una de las cuales toma como insumo el producto de la anterior.

Figura 2

Procedimiento metodológico del inventario de emisiones



3.3.Límites de inventario

La definición de los límites del inventario establece qué emisiones se cuantifican y bajo qué criterios se atribuyen a la entidad. Conforme al GHG Protocol y a la norma ISO 14064-1, esta delimitación se realiza en dos planos: el límite organizacional, que determina qué operaciones se consolida bajo la responsabilidad de la entidad, y los límites operativos, que clasifican las fuentes de emisión de esas operaciones en alcances (International Organization for Standardization, 2018; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

3.3.1. Límite organizacional

El GHG Protocol contempla dos criterios para consolidar las emisiones de una organización: el de cuota de participación y el de control, que a su vez puede ser financiero u operacional (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). El presente inventario adopta el enfoque de control operacional, según el cual la entidad contabiliza el cien por ciento de las emisiones de las fuentes sobre cuya operación ejerce control, con independencia de su régimen de propiedad.

La aplicación de este criterio a la GSMGA tiene dos consecuencias relevantes. En primer lugar, el botadero municipal se incluye en su totalidad, dado que la entidad opera el sitio de disposición final; las emisiones asociadas se atribuyen íntegramente al inventario, aun cuando los residuos dispuestos provengan de todo el distrito y no solo de las instalaciones de la gerencia. En segundo lugar, en los recintos donde la entidad comparte instalaciones con terceros, el principio de control operacional excluiría el consumo ajeno a la gerencia; no obstante, cuando no se dispone de submedición ni de información que permita aislar esa fracción como ocurre en la sede del terminal terrestre, el consumo del medidor se atribuye íntegramente a la entidad como criterio conservador, y la posible sobrestimación se declara como limitación.

3.3.2. Límites operativos

Fijado el límite organizacional, las fuentes de emisión de las operaciones controladas se clasifican en tres alcances, conforme al GHG Protocol (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). El estándar define tres alcances; este inventario abarca los alcances 1 y 2, de reporte obligatorio, y excluye el alcance 3 por no disponerse de datos de actividad.

Esa cobertura no es una elección discrecional del investigador, sino la que fijan los estándares aplicados. El GHG Protocol Corporate Standard establece que toda organización que reporte conforme al estándar debe contabilizar y declarar por separado sus emisiones de alcance 1 y de alcance 2, mientras que el alcance 3 queda como categoría de reporte opcional (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). La norma ISO 14064-1, por su parte, exige que toda exclusión de emisiones indirectas se declare y se justifique de manera explícita (International Organization for Standardization, 2018); ese requisito se cumple aquí al documentar la exclusión del alcance 3, su causa la ausencia de registros de actividad y su consecuencia sobre la interpretación del resultado, que debe leerse como un límite inferior. El inventario reporta, por tanto, el perímetro obligatorio completo, sin omisiones dentro de él, y declara el único perímetro opcional que no cubre. La herramienta Huella de Carbono Perú, con la que se alinea el estudio, admite igualmente el reporte circunscrito a los alcances obligatorios (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021).

Alcance 1: emisiones directas

Comprende las emisiones provenientes de fuentes que son propiedad de la entidad o están bajo su control operacional. Para la GSMGA, estas fuentes son la combustión móvil de la flota destinada a la recolección y el transporte de residuos que consume diésel y gasolina, la eventual combustión estacionaria de fuentes fijas en caso de que existan, y el metano generado por la descomposición anaerobia de los residuos dispuestos en el botadero municipal. Esta última fuente se estima mediante modelos de descomposición de primer orden el método FOD del IPCC y el modelo LandGEM y se anticipa como una de las de mayor magnitud del inventario (Alexander et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

Alcance 2: emisiones indirectas

Comprende las emisiones asociadas a la generación de la electricidad adquirida y consumida en las instalaciones de la entidad. El dato de actividad corresponde a la energía consumida, registrada en los recibos de la concesionaria, y el factor de emisión es el de la red del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021). En los locales con un único medidor compartido con usuarios externos, el consumo se prorratea según la superficie ocupada por la entidad, de modo coherente con el límite organizacional.

Alcance 3: exclusión del inventario

El alcance 3 reúne las demás emisiones indirectas que, sin originarse en fuentes controladas por la entidad, son consecuencia de sus actividades, por ejemplo, el consumo de papel o los viajes del personal en comisión de servicios. Su reporte es opcional en el GHG Protocol Corporate Standard (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). En este inventario el alcance 3 se excluye porque la entidad no dispone de registros de actividad que permitan cuantificar esas fuentes con un mínimo de fiabilidad. La exclusión se declara de manera explícita y se retoma entre las limitaciones en inventarios de organizaciones comparables el alcance 3 puede concentrar una fracción relevante del total, por lo que la huella aquí estimada constituye un límite inferior acotado a los alcances 1 y 2.

Tabla 5

Clasificación de las fuentes de emisión de la GSMGA por alcance

Alcance	Fuente de emisión	Gases
1	Combustión móvil de la flota de recolección y transporte	CO_2, CH_4, N_2O
1	Combustión estacionaria de fuentes fijas, en caso de existir	CO_2, CH_4, N_2O
1	Metano del botadero municipal (descomposición anaerobia)	CH_4
2	Electricidad adquirida de la red eléctrica (SEIN)	CO_2

Inclusiones, exclusiones y control del doble conteo

La asignación de fuentes evita la doble contabilidad entre alcances. El metano del botadero se contabiliza una sola vez, en el alcance 1, y no en el alcance 3, en razón del control operacional de la entidad sobre el sitio. De manera análoga, las emisiones de la generación eléctrica se registran como alcance 2 del consumidor y no como alcance 1, pues la combustión ocurre en las centrales de generación y no en las instalaciones de la entidad. En el alcance 2, la atribución íntegra del medidor del terminal terrestre a la entidad no genera doble conteo, pues ese consumo no se contabiliza en ninguna otra fuente del inventario; su único efecto es una posible sobrestimación, declarada como limitación

3.4.Recolección de datos de actividad

Los datos de actividad constituyen la variable que, multiplicada por el factor de emisión correspondiente, permite estimar las emisiones de cada fuente. Su recolección sigue los principios de calidad del GHG Protocol y de la norma ISO 14064-1 pertinencia, integralidad, coherencia, exactitud y transparencia, de modo que cada dato pueda vincularse a un registro de origen y el inventario resulte verificable (International Organization for Standardization, 2018; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

3.4.1. Técnica e instrumento de recolección

La técnica empleada es el análisis documental, en tanto los datos de actividad se obtienen de registros administrativos y operativos preexistentes de la entidad y no de la aplicación de encuestas o experimentos (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). El instrumento es una ficha de registro de datos, organizada por alcance y por fuente de emisión, en la que se consigna, para cada dato, su valor, su unidad, el período al que corresponde y el documento de respaldo del

que procede. Esta organización asegura la trazabilidad de cada dato de actividad hasta su registro fuente.

3.4.2. Fuentes documentales por alcance

Las fuentes de los datos de actividad difieren según el alcance y la naturaleza de cada emisión. La tabla 6 resume, para cada fuente, el dato de actividad, su unidad y el documento de respaldo del que se obtiene.

Tabla 6

Datos de actividad, unidades y fuentes documentales por alcance

Alcance	Dato de actividad	Unidad	Fuente documental
1	Diésel consumido por la flota	L	Vales y órdenes de combustible; registros de despacho
1	Gasolina consumida por la flota	L	Vales y órdenes de combustible; registros de despacho
1	Combustible de fuentes fijas, en caso de existir	L o Kg	Registros de adquisición y consumo
1	Residuos dispuestos en el botadero	tn	Registros operativos de disposición final
2	Energía eléctrica consumida	kWh	Recibos de la empresa concesionaria

3.4.3. Período de referencia y representatividad temporal

El período de referencia del inventario es el año 2025, de enero a diciembre. Para el alcance 1 en su componente de combustión y el alcance 2, los datos de actividad corresponden a los doce meses del año base, y se documenta la cobertura efectiva de ese período a fin de evidenciar su representatividad. La estimación del metano del botadero constituye una excepción: dado que el gas emitido en 2025 procede de la descomposición de residuos acumulados durante años anteriores, su cálculo requiere la serie histórica del tonelaje dispuesto y el año de apertura del sitio, y no solo el dato del año base (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

3.4.4. Tratamiento de datos faltantes y supuestos de estimación

Cuando un dato de actividad no se encuentra disponible o presenta vacíos en parte del período, se recurre a supuestos de estimación que se documentan de forma explícita junto con el dato afectado. Entre estos supuestos se incluyen la atribución íntegra a la entidad del consumo eléctrico del medidor del terminal terrestre a falta de submedición que aísle a otros usuarios del recinto, la extrapolación de meses faltantes a partir de los meses con registro y la adopción de valores por defecto para los parámetros de los modelos de descomposición de residuos cuando no existan datos locales. Cada vacío y cada supuesto se registran de manera que el lector pueda identificar qué fracción del inventario se sustenta en datos medidos y cuál en estimaciones, en línea con el principio de transparencia (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

3.5.Factores de emisión y GWP

3.5.1. Factores de emisión

El factor de emisión es la cantidad de un gas emitida por unidad de dato de actividad. En este inventario, cada factor se documenta con su fuente y su año de publicación, y se prioriza el uso de factores nacionales publicados por el MINAM; en ausencia de un factor nacional aplicable, se recurre a los factores por defecto de las Directrices del IPCC de 2006 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). La tabla 7 indica, para cada fuente, la procedencia del factor de emisión empleado; sus valores numéricos se reportan en los resultados y en los anexos del inventario, junto con el año de la fuente.

En el caso del metano del botadero, los factores no se aplican de forma directa sobre el dato de actividad, sino a través de los parámetros de los modelos de descomposición la tasa de

generación, el carbono orgánico degradable y el factor de corrección del metano, entre otros, cuyos valores por defecto provienen de las Directrices del IPCC para el sector de residuos y del modelo LandGEM (Alexander et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Para la electricidad, el factor corresponde al de la red del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional publicado por el MINAM(Ministerio del Ambiente del Perú, 2021).

Tabla 7

Procedencia de los factores de emisión por fuente

Fuente de emisión	Procedencia del factor de emisión
Combustión móvil de la flota (diésel, gasolina)	Directrices del IPCC 2006; factores nacionales del MINAM cuando estén disponibles
Combustión estacionaria de fuentes fijas	Directrices del IPCC 2006; factores nacionales del MINAM
Metano del botadero	Parámetros por defecto del IPCC 2006 (sector residuos) y del modelo LandGEM
Electricidad de la red	Factor de red del SEIN publicado por el MINAM

Nota. Se priorizan los factores nacionales del MINAM y, en su defecto, los factores por defecto del IPCC. Los valores numéricos de cada factor, con su año, se reportan en los anexos del inventario.

3.5.2. Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global expresa, en relación con el dióxido de carbono, la capacidad de un gas de retener calor en la atmósfera a lo largo de un horizonte temporal determinado. El presente inventario adopta los valores del potencial de calentamiento global a 100 años del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013), presentados en la tabla 2. Se opta por el AR5, y no por el informe más reciente, para alinear el cálculo con la plataforma Huella de Carbono Perú del MINAM, que emplea ese conjunto de valores (MINAM, 2020); ello facilita que la entidad pueda reportar el inventario en dicha plataforma sin recalcular. Conforme a esos valores, las emisiones de metano y de óxido

nitroso se multiplican por su potencial respectivo para convertirlas en dióxido de carbono equivalente, de modo que el inventario se expresa en una unidad homogénea: la tonelada de dióxido de carbono equivalente.

3.6.Cálculo de emisiones

El cálculo de las emisiones combina los datos de actividad con los factores de emisión y los potenciales de calentamiento global, y agrega los resultados por gas, por fuente y por alcance hasta obtener la huella de carbono total de la entidad, expresada en toneladas de dióxido de carbono equivalente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006; World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004).

3.6.1. Ecuación general de cuantificación

Para las fuentes de combustión y de consumo de energía, las emisiones se obtienen como el producto del dato de actividad, el factor de emisión y el potencial de calentamiento global de cada gas, según la ecuación (3.1):

$$E_{\mathrm{CO_2e}} = \sum_{i} \sum_{g} DA_i \times FE_{i,g} \times GWP_g,$$

donde DAi, FEi,g y GWPg conservan la notación introducida en la ecuación (2.1). La suma sobre los gases convierte cada emisión a una base común de dióxido de carbono equivalente, y la suma sobre las fuentes agrega las emisiones de un mismo alcance.

3.6.2. Estimación de metano del botadero

El metano del botadero no se calcula mediante la ecuación (3.1), sino a través de modelos de descomposición de primer orden, en los que la generación del gas en el año base depende de

los residuos acumulados en años anteriores. La capacidad potencial de generación de metano y su liberación en el tiempo se estiman con el método FOD del IPCC y el modelo LandGEM cuyos parámetros se describieron en el marco teórico (Alexander et al., 2005; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). El metano así estimado se convierte luego a dióxido de carbono equivalente mediante su potencial de calentamiento global, de modo que se integra con el resto de las fuentes del alcance 1.

Los parámetros del modelo se fijan a partir de las condiciones del sitio y de los valores por defecto de las fuentes metodológicas. Dado que la ciudad de Huanta registra una precipitación media anual de 494 mm y una temperatura media de 16,4 °C, el sitio se clasifica en la zona climática templada seca del IPCC, a la que corresponde una constante de generación de metano de $k = 0{,}04$ año^{-1} para residuos sólidos municipales (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). El potencial de generación de metano se fija en L0 = 170 m3/Mg, valor por defecto del modelo LandGEM (Alexander et al., 2005). Por tratarse de un botadero a cielo abierto, sin confinamiento controlado, se aplica un factor de corrección de metano de MCF = 0,6, correspondiente a los sitios de disposición no categorizados en las directrices del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). Dada la incertidumbre inherente a estos parámetros por defecto, su efecto sobre el resultado se examina mediante un análisis de sensibilidad que los varía dentro de sus rangos admisibles

3.6.3. Procesamiento y agregación de resultados

El cálculo se implementa en una hoja de cálculo estructurada por alcance y por fuente, que aplica de forma sistemática las ecuaciones anteriores a cada dato de actividad y conserva, para cada fuente, el factor de emisión y el potencial empleados junto con su referencia. Los resultados

se reportan en tres niveles de agregación: por fuente de emisión, por alcance (alcances 1 y 2) y como total de la entidad. Esta desagregación permite identificar las fuentes de mayor contribución y expresar la participación relativa de cada alcance en la huella de carbono total.

3.6.4. Tratamiento de incertidumbres

La estimación de las emisiones está sujeta a incertidumbre, originada principalmente en el uso de factores de emisión por defecto en lugar de factores medidos localmente, en los vacíos de los datos de actividad y en los supuestos de los modelos de descomposición de residuos. Siguiendo las orientaciones del IPCC, esta incertidumbre se aborda documentando la calidad y la procedencia de cada dato y de cada factor, y señalando las fuentes cuya estimación descansa en mayor medida en supuestos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). De este modo, el inventario distingue de forma explícita las emisiones sustentadas en datos medidos de aquellas derivadas de estimaciones.

3.6.5. Tratamiento estadístico de los resultados

El tratamiento estadístico de los resultados no persigue estimar un parámetro poblacional desconocido ni someter conjeturas a prueba: el inventario cubre el universo de las fuentes bajo control operacional de la entidad y su magnitud se obtiene directamente de los datos de actividad documentados, conforme al nivel descriptivo del estudio declarado (Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018). En consecuencia, el tratamiento se organiza en dos planos: la caracterización descriptiva de la magnitud y de la composición del inventario, y la cuantificación de la incertidumbre que arrastran los parámetros del modelo de metano y los factores de emisión.

Estadística descriptiva

El tratamiento descriptivo caracteriza la magnitud y la composición del inventario. Para cada fuente y cada alcance se reportan el valor estimado en tCO2e y su participación porcentual en el total, y para la serie de disposición del botadero, la masa dispuesta por año y el aporte de cada cohorte a la generación de metano del año base. Sobre la distribución obtenida en el tratamiento de la incertidumbre se calculan además la media, la mediana, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada componente, medidas que permiten comparar la dispersión relativa de fuentes de magnitud muy distinta.

Propagación de la incertidumbre

El inventario no se construye a partir de una muestra, sino sobre el universo de las fuentes bajo control operacional de la entidad, de modo que no existe error de muestreo. La incertidumbre que sí existe es paramétrica: el metano del botadero no se mide, se estima con un modelo cuyos parámetros (k, L0 y el MCF) se toman por defecto dentro de rangos documentados, y los factores de emisión de la combustión y de la red llevan asimismo una incertidumbre declarada por sus fuentes. El valor verdadero de las emisiones es, por tanto, desconocido, y lo que el inventario entrega es una estimación sujeta a esa incertidumbre.

Para propagarla se aplica el enfoque 2 de las directrices del IPCC, es decir, la simulación de Monte Carlo (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006). El procedimiento extrae al azar un valor de cada parámetro incierto conforme a su distribución, calcula el inventario completo con esa combinación y repite la operación diez mil veces, de modo que se obtiene una distribución de probabilidad de cada magnitud. De ella se derivan el intervalo de confianza del 95 % de cada componente, junto con su media, su mediana y su desviación estándar.

Los intervalos así obtenidos se leen como el rango dentro del cual se sitúa cada magnitud con una confianza del 95 %, dada la incertidumbre de los parámetros del modelo. Su utilidad no se agota en acompañar la cifra puntual: cuando los intervalos de dos componentes no se solapan, la diferencia de magnitud entre ambos se sostiene en todo el rango de incertidumbre examinado, de modo que el ordenamiento de las fuentes puede afirmarse con independencia de la elección de parámetros. Ese criterio es el que se aplica al interpretar los resultados del capítulo 4.

CAPÍTULO 4

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

Los resultados se presentan en dos planos, conforme al tratamiento estadístico fijado en el capítulo 3. El primero es descriptivo: cuantifica las emisiones por fuente y por alcance y reporta su participación en el total. El segundo cuantifica la incertidumbre de esas estimaciones y evalúa si el ordenamiento obtenido se sostiene en todo el rango de los parámetros del modelo; se desarrolla en el apartado de análisis de incertidumbre.

4.1.1. Datos de actividad recopilados

Esta sección no responde a un objetivo específico: reporta los datos de actividad que alimentan el cálculo, cuya recolección es una etapa del método. El inventario se construyó sobre datos de actividad reales del ejercicio 2025, obtenidos de los registros operativos de la entidad. En el alcance 1, la combustión móvil de la flota se cuantificó a partir del consumo anual de combustible, que ascendió a 155 675,1 litros de diésel y 26 910,5 litros de gasolina; el registro de gasolina no presenta consumo en octubre y noviembre de 2025, lo que corresponde a un valor real de cero y no a un dato faltante. La segunda fuente del alcance 1, el metano del botadero municipal a cielo abierto, se alimentó de la masa de residuos dispuesta; para 2025 se registraron 7 566,0 toneladas, y la serie histórica 2008 – 2025 se completó con tonelaje real para 2023 – 2025 y reconstruido para 2008 – 2022 a partir de la población urbana proyectada (INEI) y una producción per cápita calibrada. En el alcance 2, el consumo de electricidad de la red interconectada (SEIN) totalizó 89 786 kWh distribuidos en tres suministros: el Terminal Terrestre (38 412 kWh) y dos centrales de cámaras de videovigilancia (51 374 kWh en conjunto). El consumo del Terminal

Terrestre se atribuye en su totalidad a la entidad, criterio conservador que se declara como limitación, dado que no se dispuso de información para prorratear el suministro entre la administración municipal y los concesionarios.

Tabla 8

Datos de actividad recopilados por fuente y alcance, GSMGA Huanta 2025

Fuente	Alcance	Dato de actividad	Unidad
Combustión móvil – diésel	1	155 675,1	L
Combustión móvil – gasolina	1	26 910,5	L
Botadero - residuos dispuestos (2025)	1	7 566,0	T
Electricidad - Terminal Terrestre	2	38 412	kWh
Electricidad - centrales de cámaras (2)	2	51 374	kWh

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operativos 2025 de la GSMGA. El dato de actividad del botadero corresponde a la masa dispuesta en 2025; el modelo de metano emplea además la serie 2008–2025. El alcance 3 se excluye del inventario por falta de datos de actividad.

4.1.2. Emisiones por alcance

Esta sección responde al OE1 y al OE2: cuantifica las emisiones directas del alcance 1, desagregadas por fuente, y las indirectas por energía del alcance 2. Las emisiones directas del alcance 1 ascienden a 9 039,4 tCO2e y las emisiones indirectas por energía del alcance 2 a 15,3 tCO2e. Dentro del alcance 1, el metano del botadero aporta 8 559,7 tCO2e y la combustión de la flota 479,7 tCO2e. Las fuentes de combustión y de energía se cuantificaron con la ecuación general $E = DA \times FE \times GWP$, mientras que el botadero requirió el modelo de descomposición de primer orden FOD/LandGEM. Las subsecciones siguientes detallan cada fuente.

Combustión móvil de la flota (alcance 1)

La combustión de la flota vehicular emitió 479,7 tCO2e durante 2025. El diésel, combustible predominante de la maquinaria y los vehículos pesados del servicio de limpieza pública, explica el 87,1 % de esta fuente: sus 155 675,1 litros consumidos generaron 418,0 tCO2e, de las cuales 416,6 corresponden a dióxido de carbono, 0,9 a óxido nitroso y 0,6 a metano, ya

convertidas con sus potenciales respectivos. La gasolina añadió 61,7 tCO2e a partir de 26 910,5 litros (61,5 de CO2; 0,2 de CH4; 0,04 de N2O). La composición confirma que, en la combustión móvil, el dióxido de carbono domina con más del 99 % de la emisión de la fuente, mientras que el metano y el óxido nitroso resultan marginales incluso tras aplicar sus potenciales de calentamiento de 28 y 265.

Metano del botadero: aplicación del modelo FOD/LandGEM (alcance 1)

La aplicación del modelo FOD/LandGEM al botadero municipal arroja una emisión de 8 559,7 tCO2e para 2025, resultado de un flujo estimado de 305,7 toneladas de metano convertidas con un GWP de 28. Esta cifra es el producto de una cadena de cálculo en cuatro pasos (construcción de la serie de residuos, generación bruta de metano, ajuste por gestión del sitio y conversión a dióxido de carbono equivalente) que se detalla a continuación.

El primer paso fue construir la serie de disposición 2008–2025, pues en el modelo de descomposición de primer orden la generación del año base depende de los residuos acumulados desde la apertura del sitio. La masa acumulada asciende a 141 351 toneladas: 26 622 provienen del registro operativo de la entidad (2023 - 2025) y los 114 729 restantes (2008 - 2022) se reconstruyeron multiplicando la población urbana proyectada a partir de los censos de 2007 y 2017 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018) con una tasa de crecimiento de 1,69 % anual, por una producción per cápita de 0,483 kg/hab/día, calibrada sobre el promedio de los tres años con registro real. La serie registrada muestra, además, una disposición decreciente: de 10 019 toneladas en 2023 a 7 566 en 2025, una reducción del 24,5 % que equivale a pasar de unas 27 a unas 21 toneladas diarias.

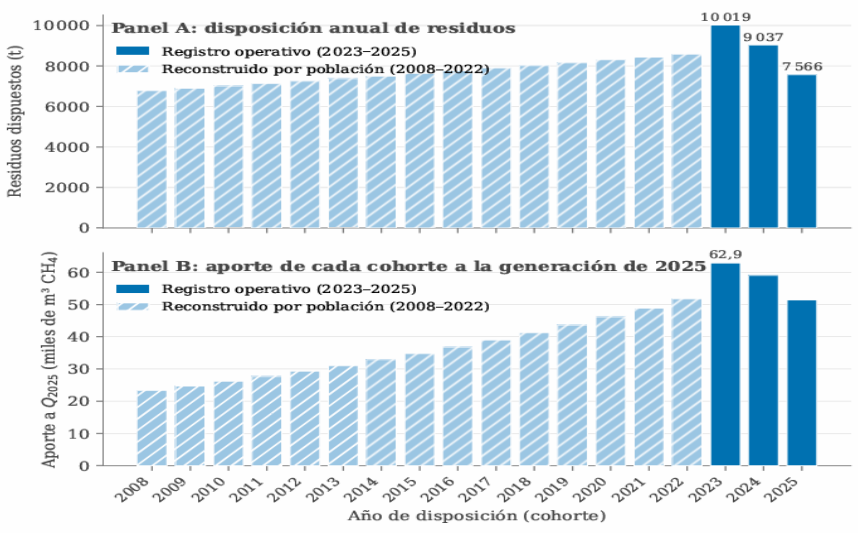
El segundo paso aplicó el modelo de generación a la serie. Conforme a la ecuación (2.3), implementada en incrementos anuales, cada cohorte de residuos Mi aporta al año base una generación k L0 Mi e−k(2025−i), con k = 0,04 año−1 (zona templada seca del IPCC, consistente con los 494 mm de precipitación anual de Huanta) y L0 = 170 m3/Mg (valor por defecto de LandGEM).

$$Q_{\mathrm{CH_4},\,2025} = \mathrm{MCF} \sum_{i=2008}^{2025} k\, L_0\, M_i\, e^{-k\,(2025-i)}$$

La suma de los aportes de las dieciocho cohortes rinde una generación bruta de 710 806 m3 de metano para 2025. La estructura de esos aportes refleja el equilibrio entre dos fuerzas del modelo: las cohortes recientes son las de mayor masa, pero las antiguas acumulan más años de descomposición con decaimiento exponencial. El mayor aporte individual corresponde a la cohorte de 2023 (62 891 m3; 8,8 % de la generación bruta), seguida de las de 2024 (59 041 m3) y 2022 (51 747 m3); los tres años con registro real aportan en conjunto el 24,4 % de la generación, y el 75,6 % restante proviene de las cohortes reconstruidas, lo que subraya el carácter acumulativo de la fuente: el metano emitido hoy es, en su mayor parte, memoria de los residuos dispuestos en años anteriores.

Figura 3

Serie de disposición de residuos y aporte de cada cohorte a la generación de metano de 2025



Nota. El panel A muestra la masa de residuos dispuesta cada año en el botadero municipal: las barras sólidas corresponden al registro operativo de la GSMGA (2023–2025) y las barras claras con trama, a los años reconstruidos con la población urbana proyectada y una producción per cápita calibrada de 0,483 kg/hab/día. El panel B muestra el aporte de cada cohorte a la generación de metano de 2025, antes del ajuste MCF: se lee que las cohortes recientes aportan más, pero ninguna domina, pues la generación acumula la descomposición de dieciocho años de disposición.

El tercer paso ajustó la generación por las condiciones de gestión del sitio. Por tratarse de un botadero a cielo abierto sin confinamiento controlado, se aplicó el factor de corrección de metano MCF = 0,6 de los sitios no categorizados del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006), que reduce la generación bruta a 426 484 m3 de metano efectivamente emitido; este ajuste reconoce que una fracción de la materia orgánica se descompone aeróbicamente en sitios someros y abiertos, sin producir metano.

El cuarto paso convirtió el volumen a masa y a unidades equivalentes: con la densidad del metano (0,7168 kg/m3), los 426 484 m3 equivalen a 305,7 toneladas de CH4, que multiplicadas por su potencial de calentamiento global de 28 (Intergovernmental Panel on Climate Change,

2013) resultan en las 8 559,7 tCO2e reportadas. La sensibilidad de esta estimación a los parámetros k, L0 y MCF.

Tabla 9

Serie de disposición de residuos y aporte de cada cohorte a la generación de metano de 2025 (modelo FOD/LandGEM)

Año	Población (hab)	Residuos (t)	Edad (años)	Aporte a Q2025 (m^3CH_4)	Origen del dato
2008	38 493	6 783	17	23 366	Reconstruido
2009	39 145	6 897	16	24 731	Reconstruido
2010	39 808	7 014	15	26 176	Reconstruido
2011	40 482	7 133	14	27 706	Reconstruido
2012	41 167	7 254	13	29 325	Reconstruido
2013	41 864	7 377	12	31 039	Reconstruido
2014	42 573	7 501	11	32 852	Reconstruido
2015	43 294	7 629	10	34 772	Reconstruido
2016	44 027	7 758	9	36 804	Reconstruido
2017	44 773	7 889	8	38 955	Reconstruido
2018	45 531	8 023	7	41 231	Reconstruido
2019	46 302	8 159	6	43 641	Reconstruido
2020	47 086	8 297	5	46 191	Reconstruido
2021	47 884	8 437	4	48 890	Reconstruido
2022	48 694	8 580	3	51 747	Reconstruido
2023	49 519	10 019	2	62 891	Registro operativo
2024	50 358	9 037	1	59 041	Registro operativo
2025	51 210	7 566	0	51 449	Registro operativo
Total		141 351		710 806	

Nota. El aporte de cada cohorte se calcula como k L0 Mi e−k(2025−i), con k = 0,04 año−1 y L0 = 170 m3/Mg, antes del ajuste MCF = 0,6. Los años 2008–2022 se reconstruyeron con la población urbana proyectada (censos INEI 2007 y 2017; crecimiento de 1,69 % anual) y una producción per cápita calibrada de 0,483 kg/hab/día; 2023–2025 provienen del registro operativo de la GSMGA. La generación bruta total (710 806 m3), ajustada por el MCF, equivale a 305,7 t CH4 y a 8 559,7 tCO2e (GWP CH4 = 28, AR5).

Electricidad adquirida de la red (alcance 2)

El consumo de electricidad de la red generó 15,3 tCO2e, la totalidad del alcance 2. El factor de la red SEIN, de 0,17081 kg CO2e/kWh (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021), aplicado a los 89 786 kWh consumidos, distribuye la emisión entre las dos centrales de cámaras de videovigilancia (8,8 tCO_2e por 51 374 kWh) y el Terminal Terrestre (6,6 tCO_2e por 38 412

kWh, atribuidos íntegramente a la entidad conforme al criterio conservador declarado). La magnitud reducida de esta fuente refleja tanto el bajo consumo eléctrico de la gerencia como el factor de emisión comparativamente bajo de la red peruana, cuya matriz de generación tiene una participación hidroeléctrica importante.

Tabla 10

Emisiones de GEI por fuente y alcance, GSMGA Huanta 2025

Fuente	Alcance	Emisiones (Tco_2e)	Participación (%)
Botadero (metano)	1	8 559,7	94,5
Combustión de la flota	1	479,7	5,3
Electricidad (red SEIN)	2	15,3	0,2
Alcance 1 (directas)		9 039,4	99,8
Alcance 2 (energía)		15,3	0,2
Huella de carbono total		**9 054,8**	**100,0**

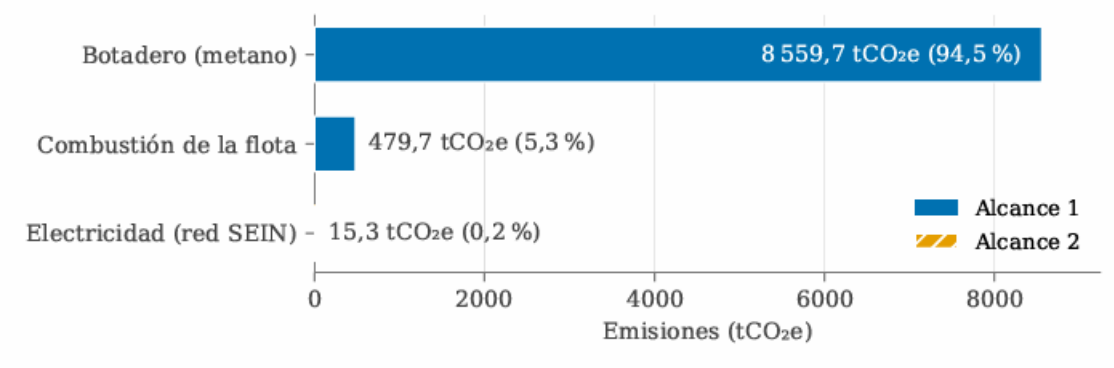
Nota. Emisiones en tCO2e calculadas como E = DA × FE × GWP, con GWP a 100 años del IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013) (CH4 = 28; N2O = 265). El metano del botadero se estima con el modelo FOD/LandGEM (k = 0,04; L0 = 170; MCF = 0,6). Factor de la red SEIN: 0,17081 kgCO2e/kWh (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021). Los porcentajes se calculan sobre el total del inventario (alcances 1 y 2); el alcance 3 se excluye. Las participaciones pueden no sumar 100 % por redondeo.

4.1.3. Emisiones totales y fuentes principales

Esta sección responde al OE3: determina la participación de cada fuente en la huella total e identifica la de mayor contribución. La huella de carbono total de la GSMGA para 2025 asciende a 9 054,8 tCO2e. El inventario está dominado por el alcance 1, que concentra el 99,8 % del total, frente a un 0,2 % del alcance 2 (tabla 10). El ordenamiento de las fuentes por participación es inequívoco (figura 3): el metano del botadero municipal representa el 94,5 % de la huella; la combustión de la flota vehicular, el 5,3 %; y la electricidad adquirida de la red, el 0,2 % restante. Una sola fuente el botadero define, por tanto, la magnitud del inventario, mientras que las dos fuentes de combustión y consumo eléctrico, en conjunto, aportan menos del 6 %.

Figura 4

Emisiones y participación de cada fuente en la huella de carbono de la GSMGA, 2025



Nota. Cada barra representa las emisiones de una fuente en tCO2e, con su participación porcentual en el total del inventario (alcances 1 y 2); el color distingue el alcance. La escala lineal muestra la asimetría del inventario: el metano del botadero excede en más de un orden de magnitud a las demás fuentes.

Análisis de incertidumbre de los resultados

El análisis de incertidumbre sigue el procedimiento fijado en el tratamiento estadístico de los resultados y se desarrolla en dos planos. El descriptivo caracteriza la magnitud y la dispersión de cada componente del inventario. El segundo propaga la incertidumbre de los parámetros mediante simulación de Monte Carlo y entrega el intervalo de confianza del 95 % de cada magnitud, con el que se evalúa si el ordenamiento de las fuentes se mantiene en todo el rango examinado.

Tratamiento descriptivo

La tabla *Estadística descriptiva de los componentes del inventario* resume la distribución de cada componente del inventario sobre las diez mil simulaciones. El contraste entre los coeficientes de variación es lo que más informa: la combustión de la flota y la electricidad presentan una dispersión reducida, porque sus datos de actividad son registros administrativos y

sus factores de emisión están bien caracterizados, mientras que el metano del botadero concentra prácticamente toda la variabilidad del inventario, al estimarse con un modelo de parámetros tomados por defecto. Como la huella total está dominada por esa fuente, su coeficiente de variación arrastra al del total.

Tabla 11

Estadística descriptiva de los componentes del inventario

Componente	Caso base (tCO_2e)	Media (tCO_2e)	Desviación estándar	CV (%)	IC 95 %	
					Inferior	Superior
Metano del botadero	8 559,7	7 800,8	2 022,3	25,9	4 350,9	12 136,4
Combustión de la flota	479,7	479,8	12,7	2,6	455,0	504,7
Electricidad de la red	15,3	15,3	1,5	10,1	12,4	18,4
Alcance 1	9 039,4	8 280,6	2 022,1	24,4	4 831,8	12 602,3
Alcance 2	15,3	15,3	1,5	10,1	12,4	18,4
Huella total	9 054,8	8 296,0	2 022,1	24,4	4 848,6	12 618,1

Intervalos de confianza y robustez del ordenamiento

El alcance 1 reúne 9 039,4 tCO2e, equivalentes al 99,8 % del total, y sus dos fuentes son, en ese orden, el metano del botadero (8 559,7 tCO2e) y la combustión de la flota (479,7 tCO2e). Ese predominio del alcance 1 se verifica en la totalidad de las diez mil simulaciones.

Las emisiones directas del alcance 1 superan a las indirectas por energía del alcance 2 en una relación de 589 a 1: 9 039,4 tCO2e (99,8 %) frente a 15,3 tCO2e (0,2 %). El intervalo de confianza del 95 % del alcance 1 (4 832 a 12 602 tCO2e) no se solapa con el del alcance 2 (12,4 a 18,4 tCO2e), de modo que la diferencia se sostiene en todo el rango de incertidumbre.

Dentro del alcance 1, el metano de la disposición final supera a la combustión de la flota: 8 559,7 tCO2e frente a 479,7 tCO2e, esto es, el 94,7 % del alcance 1 y un factor de 17,8. El límite

inferior del intervalo de confianza del botadero (4 351 tCO2e) excede con holgura el límite superior del de la flota (505 tCO2e).

El ordenamiento de las tres fuentes es botadero (94,5 %) > flota (5,3 %) > electricidad (0,2 %). La flota ocupa la segunda posición y supera a la electricidad en un factor de 31,3, sin solapamiento entre sus intervalos de confianza. Ese ordenamiento se conserva en la totalidad de las simulaciones.

4.2.Discusiones

Primer objetivo específico: emisiones directas del alcance 1

El primer objetivo específico cuantificó las emisiones directas del alcance 1, desagregadas por fuente, y es sobre ese resultado que se ordena la primera comparación. Los resultados sitúan a la GSMGA de Huanta dentro del patrón observado en los inventarios de gobiernos locales de la región, a la vez que revelan una particularidad de escala asociada a la gestión de residuos. El antecedente regional más próximo, la Municipalidad Distrital de Tambo (Ayala Junco & Cordero Cuadros, 2021), también reporta un inventario dominado por el alcance 1 (57,51 % del total), lo que coincide con el predominio de las emisiones directas hallado en el presente estudio. No obstante, la magnitud difiere en órdenes de escala: mientras Tambo estimó 109,53 tCO2e, la GSMGA de Huanta alcanza 9 054,8 tCO2e. Esta diferencia se asocia con la inclusión, en el presente inventario, del metano del botadero a cielo abierto que opera la entidad, fuente que concentra el 94,5 % de la huella.

Segundo objetivo específico: emisiones indirectas por energía del alcance 2

El segundo objetivo específico cuantificó las emisiones indirectas por energía del alcance 2, cuya magnitud resulta marginal en este inventario. El peso reducido del alcance 2 (0,2 %) también difiere de inventarios corporativos sin fuentes de residuos propias, como el de Laboratorios Clínicos Roe (Salazar Davila et al., 2025), donde la electricidad constituyó la fuente más representativa de un inventario circunscrito a los alcances 1 y 2. En la GSMGA, el consumo eléctrico es cuantitativamente marginal frente al metano del botadero, aunque su inclusión responde al carácter de reporte obligatorio del alcance 2 en el GHG Protocol (World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development, 2004). La estimación del metano del botadero es, además, metodológicamente comparable a la de otros trabajos que aplicaron modelos de generación de gas de relleno en la región andina (Ambuludi-Paredes et al., 2021; Díaz-Archundia et al., 2017), que igualmente advierten sobre la sensibilidad de los resultados a la calidad de los datos y a la selección de coeficientes.

Tercer objetivo específico: participación de cada fuente y fuente de mayor contribución

El tercer objetivo específico determinó la participación de cada fuente e identificó la de mayor contribución; la comparación con otros inventarios organizacionales ilumina por qué esa fuente es, en este caso, la disposición final. La composición del inventario contrasta con la de los estudios de huella de carbono en universidades e instituciones educativas, donde el transporte y la electricidad suelen encabezar las emisiones. En el campus colombiano analizado por Cano et al. (2023), el alcance 3 transporte de la comunidad representó el 83,13 % del total; en la Universidad Nacional de Ingeniería (Palomino Ochante, 2019), el transporte aportó el 49,80 % y los residuos

el 38,24 %; y en la Universidad Científica del Sur (Loayza Pastor, 2023), la electricidad (38,76 %) y el transporte (31,20 %) fueron las fuentes principales. La diferencia esencial radica en la naturaleza de la organización: en una institución educativa, la disposición de residuos es una actividad indirecta, aguas abajo, propia del alcance 3; en cambio, en la GSMGA la operación del botadero es una actividad bajo control operacional de la entidad, por lo que su metano se contabiliza como emisión directa del alcance 1. Esta distinción explica que una fuente habitualmente menor o excluida en otros inventarios sea, en este caso, la determinante.

Incertidumbre y análisis de sensibilidad

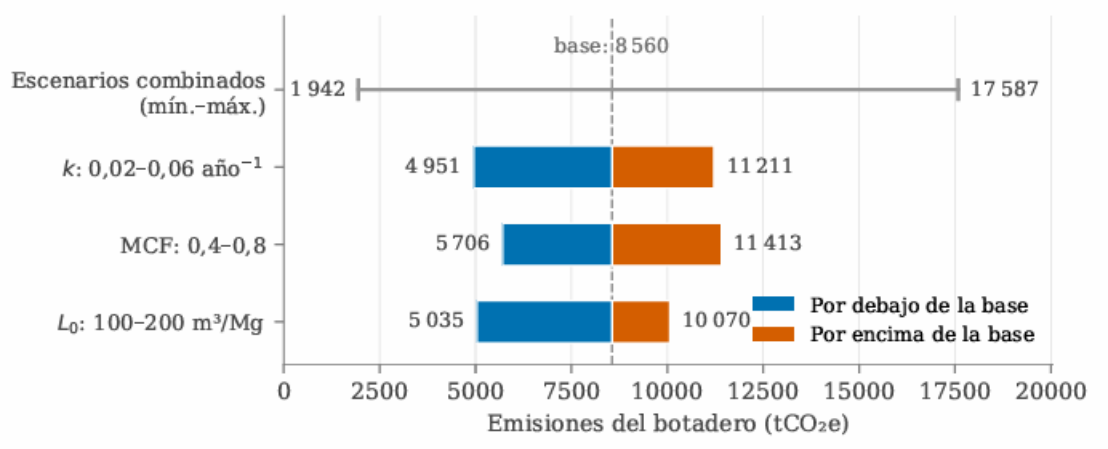
Dado que el botadero define la magnitud del inventario, la incertidumbre de sus parámetros es la principal fuente de variabilidad del resultado. Se examinó la sensibilidad de la estimación a los tres parámetros del modelo FOD/LandGEM donde la constante de generación de metano k, el potencial de generación L0 y el factor de corrección de metano MCF variándolos, de a uno y en combinación, dentro de sus rangos documentados. En los escenarios extremos combinados, la estimación del botadero oscila entre 1 942 y 17 587 tCO2e, esto es, un factor cercano a nueve veces entre el mínimo y el máximo. Esta amplitud confirma que la cifra puntual debe interpretarse con cautela.

No obstante, la conclusión cualitativa del inventario es robusta: aun en el escenario mínimo, el botadero mantiene una participación del 79,7 % del total, de modo que el predominio de las emisiones directas del alcance 1 y el ordenamiento de las fuentes se conservan en todo el rango examinado. Dicho de otro modo, la incertidumbre afecta la magnitud, no la jerarquía de las fuentes. La figura 4 resume esta estructura: de los tres parámetros, k y MCF generan las mayores

amplitudes individuales, y solo la combinación simultánea de los tres extremos produce el rango completo.

Figura 5

Sensibilidad de las emisiones del botadero a los parámetros del modelo FOD/LandGEM



Nota. Cada barra muestra el rango de emisiones del botadero (tCO2e) al variar un parámetro dentro de su rango documentado, manteniendo los demás en su valor base (línea discontinua: 8 560 tCO2e); el color indica si el escenario queda por debajo o por encima de la base. La fila superior muestra el rango de los escenarios combinados mínimo y máximo. Rangos de parámetros según IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006) y USEPA (Alexander et al., 2005).

CAPÍTULO 5

V. CONCLUSIONES

- Se cuantificó la huella de carbono de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta para el año 2025, la cual asciende a 9 054,8 tCO2e, conforme al GHG Protocol Corporate Standard y la norma ISO 14064-1, con potenciales de calentamiento global del IPCC AR5. Esta cifra corresponde a los alcances 1 y 2, de reporte obligatorio, y constituye un límite inferior de las emisiones totales de la entidad, dado que el alcance 3 se excluyó por falta de datos de actividad. El alcance 1 concentra la mayor proporción de la huella, con el botadero municipal y la flota vehicular como fuentes de mayor contribución.

- Se cuantificaron las emisiones directas del alcance 1, que suman 9 039,4 tCO2e y se reparten entre dos fuentes. El metano del botadero municipal aporta 8 559,7 tCO2e: la aplicación del modelo FOD/LandGEM con k = 0,04 año−1, L0 = 170 m3/Mg y MCF = 0,6 sobre dieciocho cohortes de disposición arrojó un flujo de 305,7 toneladas de metano. La combustión de la flota aporta 479,7 tCO2e, calculadas sobre 155 675,1 litros de diésel y 26 910,5 litros de gasolina, y está dominada por el dióxido de carbono del diésel. El botadero supera a la flota en la totalidad de las simulaciones del análisis de incertidumbre.

- Se cuantificaron las emisiones indirectas por energía del al-cance 2, que ascienden a 15,3 tCO2e y proceden en su totalidad de los 89 786 kWh de electricidad adquiridos de la red en los tres suministros de la entidad. El alcance 1 supera al alcance 2 en una relación de 589 a 1, sin solapamiento entre sus intervalos de confianza.

- Se determinó la participación de cada fuente y se identificó la de mayor contribución. El inventario presenta una estructura altamente concentrada: el metano del botadero representa el 94,5 % del total, la combustión de la flota el 5,3 % y la electricidad el 0,2 %. La flota es el segundo componente del inventario, por delante de la electricidad. La simulación de Monte Carlo sitúa la huella total entre 4 849 y 12 618 tCO2e con una confianza del 95 %, y el ordenamiento de las fuentes se mantiene en la totalidad de las simulaciones, de modo que la identificación de la fuente prioritaria no depende de la elección de parámetros.

VI. RECOMENDACIONES

Recomendaciones de gestión

- Dado que una sola fuente concentra el 94,5 % de la huella, el potencial de reducción de la entidad se juega casi por completo en la gestión de la disposición final. Se recomienda evaluar, en orden de profundidad: la cobertura y compactación periódicas del frente de descarga, que reducen la fracción de descomposición anaerobia; la captura y quema controlada del biogás, que convierte el metano en dióxido de carbono con un potencial de calentamiento veintiocho veces menor; y, en el horizonte que fija la normativa de residuos, la conversión del sitio hacia un relleno sanitario con manejo técnico de gases.

- El modelo FOD muestra que el metano de cada año es resultado acumulado de los residuos dispuestos en los años anteriores; por ello, la desviación de la fracción orgánica mediante compostaje municipal o valorización en el marco del programa de segregación en la fuente

reduce las emisiones futuras de manera persistente, además de prolongar la vida útil del sitio.

- Las 479,7 tCO2e de la combustión móvil admiten medidas de bajo costo: optimización de rutas de recolección, mantenimiento preventivo y registro de consumo por vehículo, que además afinaría el inventario. La renovación gradual de unidades puede evaluarse con criterios de costo-beneficio en el mediano plazo.
- El presente estudio deja una línea base, una plantilla de cálculo y una ficha de registro reutilizables; repetir la medición cada año con el mismo método permitiría verificar el efecto de las medidas adoptadas y acceder al reconocimiento oficial de la plataforma del MINAM, cuyo esquema de estrellas premia la medición, la verificación y la reducción sostenida.

Recomendaciones para mejorar la calidad del inventario

- Instalar submedición eléctrica en el Terminal Terrestre o, en su defecto, estimar la superficie ocupada por la administración municipal, para prorratear el suministro hoy atribuido al cien por ciento a la entidad como criterio conservador. Dado el peso marginal del alcance 2, esta mejora no altera las conclusiones, pero eleva la fidelidad del límite organizacional.
- Establecer el pesaje sistemático de los residuos que ingresan al botadero, la serie 2008–2022 debió reconstruirse por población; un registro continuo de báscula eliminaría la principal fuente de incertidumbre estructural del modelo de metano en inventarios futuros.

- Caracterizar localmente los residuos y afinar los parámetros del modelo, el análisis de sensibilidad mostró que la estimación del botadero varía entre 1 942 y 17 587 tCO2e según los parámetros k, L0 y MCF. Una caracterización de la composición de los residuos de Huanta en particular su fracción orgánica permitiría sustituir los valores por defecto del IPCC y de LandGEM por parámetros de sitio, y una medición directa de flujo de metano en superficie serviría para contrastar el modelo.

Finalmente, el estudio abre una agenda de investigación aplicada: extender la medición a las demás gerencias de la Municipalidad Provincial de Huanta hasta consolidar un inventario institucional completo, y contrastar la estimación modelada del botadero con mediciones de campo, en línea con los antecedentes que combinan modelización y verificación directa.

VII. REFERENCIAS

Alejandro Paspuezan, J. J., & Mozo Pillajo, A. N. (2023). *Determinación de huella de carbono y desarrollo de un plan piloto basado en la ISO 14064 en dos Obras Salesianas, ubicadas en Quito, Ecuador* [bachelorThesis]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24413

Alexander et al.,. (2005). *Document Display | NEPIS | US EPA*.

Ambuludi-Paredes, R. R., Carvajal-Padilla, V. P., & Santana, K. D. (2021). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología en Marcha*, Pág. 67-78. https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5413

Armenta-Rivas, M. E., Sierra-Camargo, L. D., Vélez-Pereira, A. M., Armenta-Rivas, M. E., Sierra-Camargo, L. D., & Vélez-Pereira, A. M. (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta). *Ingeniería, investigación y tecnología*, *18*(2), 183-192.

Ayala Junco, J. N., & Cordero Cuadros, Z. (2021). Estimación de la huella de carbono de la Municipalidad Distrital de Tambo-Provincia La Mar-Región de Ayacucho—2020. *Repositorio Institucional - UCV*. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61149

Balouktsi, M. (2020). Carbon metrics for cities: Production and consumption implications for policies. *Buildings & Cities*, *1*(1). https://doi.org/10.5334/bc.33

Bulkeley, H. (2010). Cities and the Governing of Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, *35*(Volume 35, 2010), 229-253. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-072809-101747

Cano, N., Berrio, L., Carvajal, E., & Arango, S. (2023). Assessing the carbon footprint of a Colombian University Campus using the UNE-ISO 14064–1 and WRI/WBCSD GHG Protocol Corporate Standard. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(2), 3980-3996. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22119-4

Castro Rodríguez, A. R. (2022). *Huella de carbono según metodo greenhouse gas protocol y la norma ISO14064-1 en la I.E. Nº22299 Carlos Cueto Fernandini, Ica*.

Congreso de la República del Perú. (2018). *Ley Marco sobre Cambio Climático—LEY - N° 30754—CONGRESO DE LA REPUBLICA*. https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/undefined/dispositivo/NL/1638161-1

Congreso de la República del Perú. (2023). *Ley N.° 27972—Ley Orgánica de Municipalidades*. https://www.gob.pe/institucion/munivillaelsalvador/normas-legales/4886882-27972-ley-organica-de-municipalidades

Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañón-Salas, M. del C., Hernández-Berriel, M. del C., Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañón-Salas, M. del C., & Hernández-Berriel, M. del C. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, *18*(2), 149-159.

Gao, T., Liu, Q., & Wang, J. (2014). A comparative study of carbon footprint and assessment standards. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, *9*(3), 237-243. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt041

Gestión, R. (2026, marzo 27). *¿Medir la huella de carbono? Hay 52 empresas que son las "primeras de la clase"*. Gestión. https://gestion.pe/g-de-gestion/reportaje/huella-de-

carbono-hay-52-empresas-que-lideran-la-medicion-del-minam-y-ya-tienen-4-estrellas-que-significa-noticia/

Hernández-Sampieri, & Mendoza Torres. (2018). *Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta | RUDICS*. https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612

Huang, Y. A., Weber, C. L., & Matthews, H. S. (2009). Categorization of Scope 3 Emissions for Streamlined Enterprise Carbon Footprinting. *Environmental Science & Technology*, *43*(22), 8509-8515. https://doi.org/10.1021/es901643a

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA FRANCISCO COSTA APONTE*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (inf. Téc.). IGES. Hayama, Japan.* https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC*. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (inf. Téc.)*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.). (2022). *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14064-1:2018*. ISO. https://www.iso.org/standard/66453.html

Loayza Pastor, D. (2023). *Análisis de la huella de carbono de la Universidad Científica del Sur y propuesta de alternativas de mitigación en el contexto de la Covid-19*.

Madrigal Perez, G. B., SAAVEDRA, J., & HUAMAN, Y. (2018). Calculo de la generación de biogás para el relleno sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y estimación del potencial de producción eléctrica. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, *4*. https://doi.org/10.17162/rictd.v4i2.1096

Martinez, G. L. (2003). Revista Tecnura. *Tecnura*, *7*(13), 31-43. https://doi.org/10.14483/22487638.6187

Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Weber, C. L. (2008). The Importance of Carbon Footprint Estimation Boundaries. *Environmental Science & Technology*, *42*(16), 5839-5842. https://doi.org/10.1021/es703112w

MINAM. (2019). *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático—DECRETO SUPREMO - N° 013-2019-MINAM - AMBIENTE*. https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/undefined/dispositivo/NL/1842032-2

MINAM. (2020). *Aprueban la Guía para el funcionamiento de la herramienta Huella de Carbono Perú | SINIA*. https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-guia-funcionamiento-herramienta-huella-carbono-peru

Ministerio del Ambiente del Perú. (2014). *Decreto Supremo N° 013-2014-MINAM*. Ministerio del Ambiente. https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-013-2014-minam/

Ministerio del Ambiente del Perú. (2017). *Aprueban Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos—DECRETO SUPREMO - N° 014-2017-MINAM - AMBIENTE*. https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/undefined/dispositivo/NL/1599663-10

Ministerio del Ambiente del Perú. (2020). *Contribuciones Nacionalmente Determinadas*. Dirección General de Cambio Climático y Desertificación. https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/ndc/

Ministerio del Ambiente del Perú. (2021). *HC PERÚ*. https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/inicio

Municipalidad Metropolitana de Lima. (2020). *Municipalidad Metropolitana de Lima. (2020). Huella de Carbono Corporativo 2019 de la Municipalidad Metropolitana de Lima (inf. Téc.)*. https://smia.munlima.gob.pe/documentos-publicacion/detalle/287

Municipalidad Provincial de Huanta. (2023). *Reglamento de Organización y Funciones (ROF) 2023*. https://www.gob.pe/institucion/munihuanta/informes-publicaciones/4107569-reglamento-de-organizacion-y-funciones-rof-2023

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | SINIA*. https://sinia.minam.gob.pe/normas/convencion-marco-las-naciones-unidas-cambio-climatico

Naciones Unidas. (1997). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París [Adoptado en la COP21 el 12-dic-2015. Compro mete a las Partes a presentar Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC).* https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris

Oefa, O. de E. y F. A.-. (2014). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial: Informe 2013-2014. Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional*. https://hdl.handle.net/20.500.12788/56

Organización Meteorológica Mundial. (2025, octubre 10). *WMO Greenhouse Gas Bulletin—No. 21*. World Meteorological Organization. https://wmo.int/resources/publication-series/greenhouse-gas-bulletin/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-21

Palomino Ochante, C. J. (2019). *Cálculo de la huella de carbono de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima-Perú*.

Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *178*(1), 135-160. https://doi.org/10.1007/s10661-010-1678-y

Pietrapertosa, F., Tancredi, M., Giordano, M., Cosmi, C., & Salvia, M. (2020). How to Prioritize Energy Efficiency Intervention in Municipal Public Buildings to Decrease CO2 Emissions? A Case Study from Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(12), 4434. https://doi.org/10.3390/ijerph17124434

Poder Ejecutivo del Perú. (2017). *Decreto Legislativo N° 1278*. Ministerio del Ambiente. https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-legislativo-n-1278/

Salazar Davila et al.,. (2025). *Cálculo de la huella de carbono según el GHG Protocol – Corporate Standard y propuesta de ejes temáticos para la elaboración de un plan para la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero en Laboratorios Clínicos Roe en la ciudad de Lima*. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/entities/publication/28f749b6-78a7-530c-bd5f-eec2a7ded474

SPDA, webmaster. (2020, diciembre 18). [PDF] Perú presentó de manera oficial nueva ambición climática ante Naciones Unidas. *Actualidad Ambiental*. https://www.actualidadambiental.pe/reporte-ambicion-climatica-naciones-unidas/

US EPA, O. (2015, diciembre 23). *Overview of Greenhouse Gases* [Overviews and Factsheets]. https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases

US EPA, O. (2022, diciembre 5). *Determine Organizational Boundaries* [Data and Tools]. https://www.epa.gov/climateleadership/determine-organizational-boundaries

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). A Definition of Carbon Footprint. *CC Pertsova, Ecological Economics Research Trends*, *2*, 55-65.

World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *Corporate Standard | GHG Protocol*. https://ghgprotocol.org/corporate-standard

World Resources Institute et al. (2014). *GHG Protocol for Cities | GHG Protocol*. https://ghgprotocol.org/ghg-protocol-cities

Zerón Cancha, M. L., & Arias Chávez, J. B. (2019). *Huella de Carbono según la ISO 14064-1:2011 de las actividades académicas de la Universidad Peruana Unión, sede Lima*. https://hdl.handle.net/20.500.12840/2898

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia de investigación

Problema	Objetivo	Variable, dimensiones e indicadores	Instrumento y fuente documental
General: ¿Cuál es la magnitud y la composición de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta durante el año 2025?	General: Cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de la Gerencia de Servicios Municipales y Gestión Ambiental de la Municipalidad Provincial de Huanta para el año 2025.	Variable única: emisiones de GEI de la GSMGA (tCO_2e). Dimensiones: alcances 1 y 2.	Ficha de registro; vales y órdenes de combustible; registros operativos de disposición final; recibos de la concesionaria eléctrica.
¿A cuánto ascienden las emisiones directas del alcance 1 de la GSMGA durante el año 2025, expresadas en tCO2e y desagregadas por fuente?	Cuantificar las emisiones directas del alcance 1 de la GSMGA para el año 2025, desagregadas por fuente y expresadas en tCO2e.	Emisiones de la combustión móvil de la flota vehicular (diésel, gasolina) y emisiones de metano del botadero municipal, estimadas con el modelo FOD/LandGEM.	Ficha de registro; vales y órdenes de combustible; registros operativos de disposición final (serie histórica).
¿A cuánto ascienden las emisiones indirectas por energía del alcance 2, expresadas en tCO2e?	Cuantificar las emisiones indirectas por energía del alcance 2, expresadas en tCO2e.	Emisiones de la electricidad adquirida de la red (SEIN).	Ficha de registro; recibos de la concesionaria eléctrica.
¿Qué participación tiene cada fuente en la huella total de la Gerencia y cuál de ellas la encabeza?	Determinar la participación de cada fuente en la huella total e identificar la de mayor contribución.	Participación porcentual de cada fuente en la huella total e identificación de la fuente de mayor contribución.	Resultados del cálculo de las tres fuentes, consolidados por fuente y por alcance.

Anexo 2: Adquisición mensual de combustible de la flota 2025

Mes	Órdenes	Diesel (gal)	Gasolina (gal)	Diésel (L)	Gasolina (L)
Enero	6	356,0	3047,0	1347,6	11534,1
Febrero	13	1949,0	1800,0	7377,8	6813,7
Marzo	11	8378,0	1100,0	31714,2	4164,0
Abril	8	3257,0	99,0	12329,1	374,8
Mayo	6	7115,0	765,0	26933,2	2895,8
Junio	9	5641,0	50,0	21353,5	189,3
Julio	6	888,0	85,0	3361,4	321,8
Agosto	4	2006,0	33,0	7593,5	124,9
Septiembre	6	4020,0	50,0	15217,4	189,3
Octubre	3	1908,0	0,0	7222,6	0,0
Noviembre	4	746,0	0,0	2823,9	0,0
Diciembre	5	4861,0	80,0	18400,9	302,2
Total	**81**	**41125,0**	**7109,0**	**155675,1**	**26910,5**

Anexo 3: Consumo mensual de energía eléctrica por suministro 2025

Mes	Terminal Terrestre	Centro de monitoreo y videovigilancia 65941535	Centro de monitoreo y videovigilancia 65941544	Total (kWh)
Enero	2879	772	3894	7545
Febrero	3021	681	3343	7045
Marzo	3290	765	3682	7737
Abril	3115	721	3600	7436
Mayo	3315	725	3701	7741
Junio	3295	750	3495	7540
Julio	3374	745	3629	7748
Agosto	3313	741	3516	7570
Septiembre	3355	711	3337	7403
Octubre	3029	710	3459	7198
Noviembre	3207	659	3434	7300
Diciembre	3219	672	3632	7523
Total	**38412**	**8652**	**42722**	**89786**

Anexo 4: Panel fotográfico

Figura 6

Frente de descarga activo del botadero municipal, donde se aprecia la disposición de residuos sin cobertura ni compactación técnica.



Figura 7

Vista panorámica del área de disposición final, que permite apreciar la extensión del sitio.



Figura 8

Unidad compactadora de la flota de recolección de la Sub Gerencia de Servicios Municipales.



Figura 9

Terminal Terrestre de Huanta, cuyo suministro se atribuye íntegramente a la entidad ante la ausencia de la submedición.



Figura 10

Terminal Terrestre de Huanta, cuyo suministro se atribuye íntegramente a la entidad ante la ausencia de la submedición.

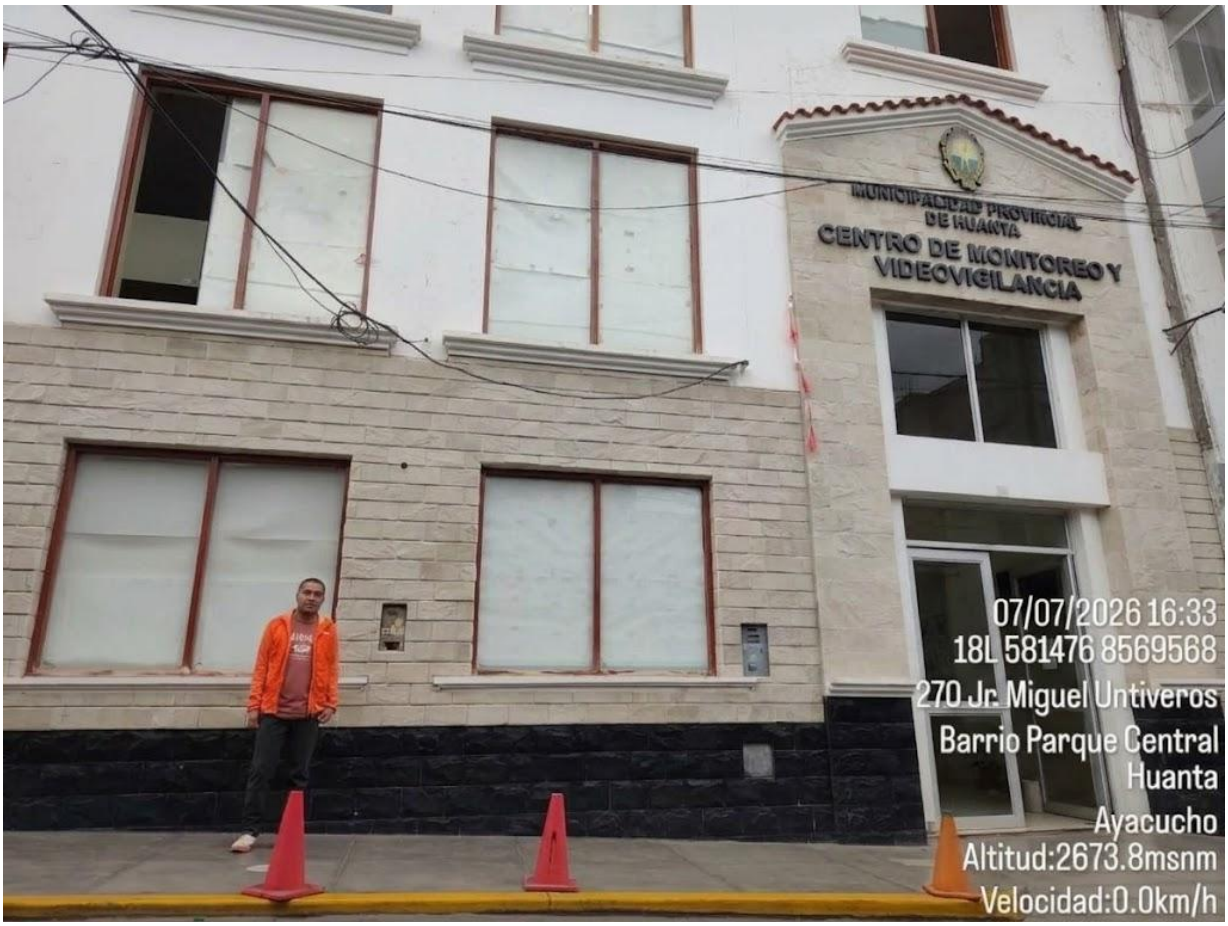


Figura 11

Búsqueda de recibo de pago de consumo eléctrico



Figura 12
Centro de monitoreo de videovigilancia



Anexo 5: Cálculo del inventario de emisiones

ALCANCE 1 — METANO DEL BOTADERO (modelo FOD/LandGEM)

El metano de 2025 proviene de TODA la basura acumulada desde 2008, no solo de la de 2025.

PASO 1 — Parámetros derivados

Tasa de crecimiento poblacional anual	**0.016934**	*Fórmula: (44 773 / 37 852) ^ (1/10) − 1 → raíz décima, porque el crecimiento es compuesto*
Producción per cápita de residuos	**0.4827**	*kg/hab/día — CALIBRADA con los 3 años que sí se pesaron (2023–2025)*

PASO 2 — Serie de disposición y aporte de cada cohorte

Año	Exponente (año − 2017)	Población proyectada	Residuos REALES (t, báscula)	Residuos usados (t)	Edad (años)	Factor decaimiento e^(−k·edad)	Aporte a Q2025 (m^3 CH_4)	Origen
2008	-9	38,493		6,782.5	17	0.506617	**23,366**	Reconstruido
2009	-8	39,145		6,897.4	16	0.527292	**24,731**	Reconstruido
2010	-7	39,808		7,014.2	15	0.548812	**26,176**	Reconstruido
2011	-6	40,482		7,133.0	14	0.571209	**27,706**	Reconstruido
2012	-5	41,167		7,253.7	13	0.594521	**29,325**	Reconstruido
2013	-4	41,864		7,376.6	12	0.618783	**31,039**	Reconstruido
2014	-3	42,573		7,501.5	11	0.644036	**32,852**	Reconstruido
2015	-2	43,294		7,628.5	10	0.670320	**34,772**	Reconstruido
2016	-1	44,027		7,757.7	9	0.697676	**36,804**	Reconstruido
2017	0	44,773		7,889.1	8	0.726149	**38,955**	Reconstruido
2018	1	45,531		8,022.7	7	0.755784	**41,231**	Reconstruido
2019	2	46,302		8,158.5	6	0.786628	**43,641**	Reconstruido
2020	3	47,086		8,296.7	5	0.818731	**46,191**	Reconstruido
2021	4	47,884		8,437.2	4	0.852144	**48,890**	Reconstruido
2022	5	48,694		8,580.1	3	0.886920	**51,747**	Reconstruido
2023	6	49,519	**10,018.96**	10,019.0	2	0.923116	**62,891**	Registro operativo
2024	7	50,358	**9,036.86**	9,036.9	1	0.960789	**59,041**	Registro operativo
2025	8	51,210	**7,565.98**	7,566.0	0	1.000000	**51,449**	Registro operativo
TOTALES				**141,351**			**710,806**	*← masa acumulada (t) y generación BRUTA (m^3)*

PASO 3 — De generación bruta a tCO_2e

Concepto	Operación	Resultado	Unidad
Generación bruta de metano	*Suma de los aportes de las 18 cohortes (fila 28)*	**710,806**	m^3 CH_4
Ajuste por tipo de sitio (MCF)	*Anterior × MCF = 0,6 (sitio no gestionado)*	**426,484**	m^3 CH_4
Conversión a masa (densidad)	*Anterior × densidad del CH_4 = 0,0007168 t/m^3*	**305.7**	t CH_4
Conversión a CO_2 equivalente (GWP)	*Anterior × GWP del CH_4 = 28 (IPCC AR5)*	**8,559.7**	tCO_2e

ALCANCE 1 — COMBUSTIÓN MÓVIL DE LA FLOTA

Dato de actividad: órdenes de compra de combustible 2025 (data/raw). E = litros × factor × GWP

PASO 1 — Conversión de galones a litros

Combustible	Galones (US)	L por galón	Litros
Diésel (DIESEL B5 S50 + PETROLEO DIESEL D5)	41,125.0	3.785412	**155,675.1**
Gasolina (GASOHOL + GASOLINA 90)	7,109.0	3.785412	**26,910.5**

Nota: se excluyeron 2 órdenes de «solución acuosa de urea 32,5 % para vehículo» (AdBlue): es un reactivo del sistema de escape, no un combustible.

PASO 2 — Emisiones por gas

Combustible	Litros	Gas	Factor (kg gas/L)	kg de gas	GWP	tCO_2e
Diésel	155,675.1	CO_2	2.676000	416,586.46	1	**416.5865**
	155,675.1	CH_4	0.000133	20.70	28	**0.5797**
	155,675.1	N_2O	0.000021	3.32	265	**0.8787**
Gasolina	26,910.5	CO_2	2.284000	61,463.56	1	**61.4636**
	26,910.5	CH_4	0.000247	6.65	28	**0.1861**
	26,910.5	N_2O	0.000006	0.16	265	**0.0421**

PASO 3 — Totales

Subtotal diésel	**418.0**	tCO_2e
Subtotal gasolina	**61.7**	tCO_2e
TOTAL COMBUSTIÓN MÓVIL	**479.7**	tCO_2e
Participación del diésel	**87.1%**	
Participación del CO_2 en esta fuente	**99.6%**	

Lectura: el CH_4 y el N_2O son marginales aunque se multipliquen por 28 y 265, porque salen en cantidades minúsculas.

ALCANCE 2 — ELECTRICIDAD ADQUIRIDA DE LA RED

Dato de actividad: recibos de la concesionaria 2025. E = kWh × factor SEIN

Consumo por suministro

Suministro	Consumo (kWh)	Factor SEIN (kg CO_2e/kWh)	tCO_2e
Terminal Terrestre	38,412	0.170810	**6.5612**
Central de cámaras 65941535	8,652	0.170810	**1.4778**
Central de cámaras 65941544	42,722	0.170810	**7.2973**
TOTAL ALCANCE 2	**89,786**		**15.3**

Nota: el consumo del Terminal Terrestre se atribuye al 100 % a la entidad, como criterio conservador, por no existir submedición que permita aislar la fracción de otros usuarios del recinto.