

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del**  
**Ambiente**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**



**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL BIOMETANO COMO COMBUSTIBLE  
PARA EL TRANSPORTE EN COMPARACIÓN CON EL DIÉSEL Y EL GAS  
NATURAL. AREQUIPA, 2018**

Tesis presentada por la Bachiller:  
**Alvarez Huamani, Milagros Yasmin**

para optar el Título Profesional de:  
**Ingeniera Ambiental**

Asesora:  
**M. Sc. Ing. Paredes Zavala, Joshelyn M.**

**Arequipa – Perú**

**2020**

## DICTAMEN APROBATORIO

UCSM-ERP

### UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA INGENIERIA AMBIENTAL DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 18 de Noviembre del 2020

**Dictamen: 001114-C-EPIA-2020**

Visto el borrador de tesis del expediente 001114, presentado por:

**2013800522 - ALVAREZ HUAMANI MILAGROS YASMIN**

Titulado:

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL BIOMETANO COMO COMBUSTIBLE PARA EL TRANSPORTE  
EN COMPARACIÓN CON EL DIÉSEL Y EL GAS NATURAL. AREQUIPA, 2018**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**3043 - PAREDES ZAVALA JOSHELYN MARIANGELA  
DICTAMINADOR**



**3124 - CAMPOS OLAZAVAL LIZBETH MARIANELLA  
DICTAMINADOR**



**9377 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA  
DICTAMINADOR**



## DEDICATORIA

*A mi mamá, la personas a quien más admiro y amo desde que tengo uso de razón, por todo su cariño y apoyo incondicional, por compartir conmigo esta gran aventura, por ser mi familia, mi ejemplo de fortaleza, mi mejor amiga, mi lugar feliz y la mejor madre. Con todo mi corazón y esfuerzo, para ti.*



## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por que sus planes y tiempos son perfectos, y por todas las experiencias que viví para cumplir este sueño. Gracias por todo en mi vida.*

*A mi mamá Haydee, por darme la oportunidad ser profesional, por enseñarme a perseguir mis sueños con esfuerzo, por celebrar mis triunfos y por ayudarme a encontrar el lado positivo a mis caídas.*

*A mis papitos, Toribio y Margarita, quienes me dan fortaleza para seguir adelante, por todo su cariño y preocupación.*

*A Jorge, por todo su apoyo, paciencia y cariño, por tener siempre los mejores consejos, y por acompañarme en el desarrollo de toda esta investigación.*

*A Biometrans, por la oportunidad de ser parte del proyecto.*

*A las instituciones que contribuyeron a mi conocimiento en el Análisis de Ciclo de Vida: a la Red Peruana de Ciclo de Vida, por su entrenamiento introductorio en el tema; a Fondecyt, por el financiamiento de la pasantía de investigación en España; al Centro Tecnológico de Cataluña - Eurecat, por su valioso aporte y enseñanzas en el software SimaPro.*

*A la M. Sc. Ing. Joshelyn Paredes por ser un gran ejemplo e inspiración para mí, por la confianza y apoyo a lo largo de estos años, por haber creído en mi desde el primer momento y por su amistad.*

*Al Mg. Berly Cárdenas y al Mg. Kevin Tejada por sus valiosos aportes, por compartir conmigo sus conocimientos y por la paciencia y tiempo en el desarrollo de esta investigación.*

*A los miembros del jurado: a la Ing. Rosario Benegas y a la Ing. Lizbeth Campos, por su tiempo y comprensión.*

*A mis amigos de la universidad, entre ellos a Mauricio por su compañía, apoyo y buen humor.*

*A mis amigos y familiares en Lima y España, por hacerme sentir en casa con su compañía y muchas enseñanzas.*

*Y a todos aquellos que hicieron posible esta investigación. Muchas gracias.*

## RESUMEN

En este estudio se evaluaron los impactos del ciclo de vida de la planta de biometano del fundo La Católica en Majes, Arequipa, alimentada de estiércol de vaca y con una producción de  $60 \text{ Nm}^3/\text{día}$  de biogás purificado, utilizando la herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) de acuerdo a las ISO 14040:2006 y 14044:2006. Se estableció el objetivo y alcance del estudio, seguido por el inventario de ciclo de vida, la evaluación de los impactos y la interpretación. La unidad funcional elegida para el análisis y comparación fue 1 MJ de energía producido por la planta de biometano. El estudio fue modelado con el software SimaPro 9.0.0.48, la base de datos Ecoinvent versión 3.6 y la metodología de evaluación de impacto ReCiPe Midpoint (H), según las categorías de impacto de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles. El análisis de los impactos estuvo limitado al enfoque del pozo al tanque o *well to tank* (WTT) que implica el transporte de la materia prima, el mezclado con agua del sustrato, la conversión o digestión anaeróbica, la purificación del biogás, el almacenamiento y finalmente la inyección del combustible en un vehículo del sector transporte. Se obtuvo como resultado que el proceso de conversión fue el que generó la mayor cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$  ( $1.79\text{E}-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MJ-biometano}$ ) y un mayor agotamiento de recursos fósiles ( $6.58\text{E}-03 \text{ kg oil eq/MJ-biometano}$ ) a comparación de los otros procesos de la producción del combustible, debido al consumo energético y al transporte de la infraestructura, respectivamente. Posteriormente se comparó este biometano con los combustibles fósiles diésel y gas natural en base a las mismas categorías de impacto, resultando que el gas natural fue el que generó la menor cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$  ( $1.23\text{E}-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MJ-gas natural}$ ), seguido por el diésel ( $2.39\text{E}-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MJ-diésel}$ ) y finalmente el biometano ( $3.72\text{E}-02 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/MJ-Biometano}$ ), principalmente por el nivel de producción de las plantas consideradas, siendo las de diésel y gas natural plantas con producciones industriales donde recae la carga ambiental. Finalmente, para la categoría de agotamiento de recursos fósiles, el biometano presentó la menor cantidad de consumo de combustibles fósiles ( $1.37\text{E}-02 \text{ kg oil eq/MJ-biometano}$ ), seguido por el gas natural ( $4.29\text{E}-02 \text{ kg oil eq/MJ-gas natural}$ ) y el diésel ( $6.00\text{E}-02 \text{ kg oil eq/MJ-diésel}$ ).

**Palabras clave:** Análisis de Ciclo de Vida, biometano, diésel, gas natural, SimaPro, Ecoinvent.

## ABSTRACT

In this study, the life cycle impacts of the biomethane plant of the La Católica farm in Majes, Arequipa, fed with cow manure and with a production of 60 Nm<sup>3</sup>/day of purified biogas, were evaluated using life cycle analysis (LCA) according to ISO 14040: 2006 and 14044: 2006. The objective and scope of the study are established, followed by the life cycle inventory, the impact assessment, and the interpretation. The functional unit chosen for analysis and comparison was 1 MJ of energy produced by the biomethane plant. The study was modeled with the SimaPro 9.0.0.48 software, the Ecoinvent database version 3.6, and the impact evaluation methodology ReCiPe Midpoint (H), using the impact categories of climate change and fossil depletion. Impact analysis was limited to the well-to-tank approach (WTT) that implies the transport of the raw material, the mixing with water from the substrate, the conversion or anaerobic digestion, the purification of the biogas, the storage and the injection of fuel in a vehicle in the transport sector. The result was the conversion process was the one that generated the highest amount of CO<sub>2</sub> emissions (1.79E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biomethane) and depletion of fossils (6.58E-03 kg oil eq/MJ- Biomethane) compared to other fuel production processes, due to energy consumption and transportation infrastructure, respectively. Subsequently, this biomethane was compared with diesel fossil fuels and natural gas based on the same impact categories, resulting the natural gas generated the least amount of CO<sub>2</sub> emissions (1.23E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-natural gas), followed by diesel (2.39E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-diesel) and finally biomethane (3.72E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biomethane), mainly due to the production level of the plants considered, being diesel and natural gas plants with industrial productions where the environmental burden falls. Finally, for the category of fossil depletion, biomethane presented the lowest amount of fossil fuel consumption (1.37E-02 kg oil eq/MJ-biomethane), followed by natural gas (4.29E-02 kg oil eq/MJ-natural gas) and diesel (6.00E-02 kg oil eq/MJ-diesel).

**Keywords:** Life Cycle Analysis, biomethane, diesel, natural gas, SimaPro, Ecoinvent.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la emisión del 78 a 80% del CO<sub>2</sub> al año ha sido producida por la quema de los combustibles de origen fósil alrededor de todo el mundo (IPCC, 2015), por lo que los países se enfrentan a la responsabilidad de reducir y controlar sus emisiones de gases de efecto invernadero los cuales contribuyen con el cambio climático (Khondaker, *et ál.*, 2016). Así mismo, la creciente población mundial, el hambre de energía y la preocupación por el cambio climático, exige el desarrollo de nuevas fuentes de energía. En este marco, la biomasa se destaca por su renovabilidad y disponibilidad, siendo el biometano utilizado cada vez más como combustible para el transporte (Ferreira, Buller, Berni, & Forster-Carneiro, 2019).

El biometano es producido por la digestión anaeróbica de desechos biológicos y puede ser utilizado para la generación de calor, electricidad y como combustible para el sector transporte. En Arequipa, se produce biometano a partir de residuos de biomasa en el Fundo La Católica en Majes, como parte del proyecto “Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa (Biometrans)”, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (Fondecyt) y por la Universidad Católica de Santa María (UCSM), bajo el Convenio Nro. 111-2017 (Peña G. , 2017a). A pesar de que la producción y uso de este combustible represente una buena oportunidad en varios aspectos, este debe ser justificado desde una perspectiva ambiental (Ravina & Genon, 2015). Sin embargo, existen pocos estudios donde se evalúen los impactos del ciclo de vida este combustible en comparación a otros en el sector transporte (Lyng & Brekke, 2019).

En varios países al rededor del mundo, se ha empezado a aplicar ampliamente la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la identificación de los impactos ambientales a lo largo la extracción de materia prima, la producción y el uso de los combustibles, sobre todo del biometano (Florio, *et ál.*, 2019; Ardolino & Arena, 2019; Collet, *et ál.*, 2017; Budzianowski & Brodacka, 2017). En Perú, se ha tenido una amplia aplicación del ACV en diferentes sectores, como herramienta que surge principalmente para el monitoreo de los impactos ambientales en la adecuación o adopción de tecnologías de bajas emisiones de carbono (Vázquez-Rowe, Kahhat, Larrea-Gallegos, &

Ziegler-Rodriguez, 2019). No obstante, en cuanto al sector transporte y combustibles, se evidenció una escasez de investigación en estos estudios.

Actualmente, no se han reportado algún estudio de ACV del biometano en el sector transporte o alguno relacionado a los impactos en su ciclo de vida en el país, necesario para el apoyo en la buena toma de decisiones, creación de leyes, normativas, entre otros. Es entonces que el presente proyecto busca la aplicación del ACV como herramienta de evaluación del impacto ambiental en todo el ciclo de vida del biometano en comparación a los combustibles no renovables usados en la ciudad de Arequipa.

Los resultados de este estudio se basan en la elaboración del diagnóstico situacional de los combustibles biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa para luego comprar sus impactos mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo a las ISO 14040:2006 y 14044:2006, modelado con el software SimaPro 9.0.0.48, la base de datos Ecoinvent versión 3.6 y la metodología de evaluación de impacto ReCiPe Midpoint (H) según las categorías de impacto de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles, para la utilización de los datos en la toma de decisiones.



## INDICE

<b>DICTAMEN APROBATORIO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	vii
<b>ABREVIATURAS</b> .....	10
<b>CAPÍTULO I</b> .....	12
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	12
<b>1.1. DIAGNÓSTICO SITUACIONAL</b> .....	12
<b>1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	15
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	15
<b>1.4. OBJETIVOS</b> .....	17
<b>1.4.1. Objetivo General</b> .....	17
<b>1.4.2. Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>CAPÍTULO II</b> .....	18
<b>2. FUNDAMENTO TEORICO</b> .....	18
<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	18
<b>2.2. MARCO TEÓRICO</b> .....	26
<b>2.2.1. Combustibles</b> .....	26
<b>2.2.1.1. Poder calorífico</b> .....	26
<b>2.2.1.2. Clasificación de los combustibles</b> .....	27
<b>2.2.2. Combustibles no renovables</b> .....	28
<b>2.2.2.1. Diésel</b> .....	29
<b>2.2.2.2. Gasolina</b> .....	30
<b>2.2.2.3. Gas Licuado de Petróleo</b> .....	30
<b>2.2.2.4. Gas Natural</b> .....	31
<b>2.2.3. Combustibles renovables</b> .....	31
<b>2.2.3.1. Energía de biomasa</b> .....	32
<b>2.2.3.2. Digestión Anaeróbica</b> .....	33
<b>A. Sistema de recolección de los residuos orgánicos</b> .....	34
<b>B. Sistema de manejo de los residuos orgánicos</b> .....	35
<b>C. Sistema de digestión anaeróbica</b> .....	35
<b>D. Sistema de manejo de biogás</b> .....	38

2.2.4.	<b>Biometano</b>	40
2.2.4.1.	Técnicas de purificación y mejora	41
2.2.4.2.	Almacenamiento del biometano	43
2.2.4.3.	Producción de biometano en el Perú	43
2.2.4.4.	Proyecto BIOMETRANS	44
2.2.5.	<b>Impactos Ambientales</b>	45
2.2.5.1.	Impactos Ambientales de combustibles	45
2.2.6.	<b>Gestión de Impacto Ambiental</b>	47
2.2.6.1.	Instrumentos Gestión Ambiental	47
2.2.6.2.	Análisis de sistemas ambientales	47
2.2.7.	<b>Análisis de Ciclo de Vida</b>	48
2.2.7.1.	Metodología del ACV	49
2.2.7.2.	Definición del objetivo y alcance	49
2.2.7.3.	Análisis de inventario de ciclo de vida	51
2.2.7.4.	Evaluación de impacto de ciclo de vida	51
2.2.7.5.	Herramientas para el cálculo	52
2.2.7.6.	Metodologías de evaluación de impacto	53
2.2.7.7.	Categorías de impacto	54
2.2.7.8.	Interpretación de resultados	55
2.2.8.	<b>Análisis de ciclo de vida en combustibles</b>	55
2.3.	<b>MARCO CONCEPTUAL</b>	58
2.4.	<b>MARCO LEGAL</b>	60
2.4.1.	Internacional	60
2.4.2.	Nacional	61
<b>CAPÍTULO III</b>		63
3.	<b>METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b>	63
3.1.	<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	63
3.2.	<b>CAMPO DE VERIFICACIÓN</b>	63
3.2.1.	Lugar de ejecución	63
3.2.2.	Ubicación espacial	63
3.2.2.1.	Arequipa Metropolitana	63
3.2.2.2.	Fundo La Católica, Majes	64
3.2.2.3.	Centro Tecnológico de Cataluña – Eurecat, Barcelona	65
3.3.	<b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOPIACIÓN DE DATOS</b>	65
3.3.1.	Observación directa	66

3.3.2.	Ficha de recolección de datos.....	66
3.3.3.	Análisis documental.....	66
3.4.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	67
3.4.1.	Softwares .....	67
3.5.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	67
3.5.1.	Elaboración del diagnóstico situacional del uso del biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa. ....	67
3.5.2.	Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos óptimos obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.....	68
3.5.2.1.	Objetivo y alcance.....	68
3.5.2.2.	Inventario de ciclo de vida y adquisición de datos .....	68
3.5.2.3.	Evaluación de Impacto e interpretación .....	71
3.5.3.	Comparación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con el diésel y el gas natural como combustibles en el sector transporte en la ciudad de Arequipa utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.....	71
CAPÍTULO IV	.....	73
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	73
4.1.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
4.1.1.	Elaboración del diagnóstico situacional del uso del biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa .....	73
4.1.1.1.	Biometano en el sector transporte en Arequipa .....	73
4.1.1.2.	Diésel en el sector transporte en Arequipa .....	78
4.1.1.3.	Gas Natural en el sector transporte en Arequipa.....	79
4.1.2.	Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos óptimos obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.....	83
4.1.2.1.	Objetivo y alcance.....	83
4.1.2.2.	Límites del sistema y unidad funcional .....	84
4.1.2.3.	Inventario de ciclo de vida y adquisición de datos .....	89
A.	<i>Etapa del transporte de la materia prima .....</i>	94
B.	<i>Etapa de producción de biometano .....</i>	95
4.1.2.4.	Evaluación de Impacto e interpretación .....	101
4.1.3.	Comparación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con el diésel y el gas natural como combustibles en el sector transporte en la ciudad de Arequipa utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.....	109

<b>CAPÍTULO V</b> .....	118
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	118
<b>5.1. CONCLUSIONES</b> .....	118
<b>5.2. RECOMENDACIONES</b> .....	119
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	121
<b>ANEXOS</b> .....	142



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Etapas para la recuperación del biogás. ....	34
<b>Figura 2.</b> Reacciones bioquímicas interdependientes en la digestión anaeróbica. ....	36
<b>Figura 3.</b> Sistema de manejo del biogás y coproductos.....	39
<b>Figura 4.</b> Fases del análisis de ciclo de vida.....	49
<b>Figura 5.</b> Categorías de impacto en la metodología ReCiPe .....	55
<b>Figura 6.</b> Delimitación geográfica de Arequipa Metropolitana.....	64
<b>Figura 7.</b> Localización geográfica de la planta de biogás y laboratorio de presurizado en el Fundo La Católica.....	65
<b>Figura 8.</b> Línea de tiempo del uso biometano en el sector transporte en la ciudad de Arequipa .....	77
<b>Figura 9.</b> Línea de tiempo del uso del diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa.....	81
<b>Figura 10.</b> Demanda de energía de combustibles en el sector transporte en el Perú, 2016. ....	82
<b>Figura 11.</b> Producción de Biometano en el Fundo La Católica y la delimitación del sistema de estudio bajo el enfoque del pozo al tanque (WTT).....	86
<b>Fuente:</b> Elaboración propia.....	86
<b>Figura 12.</b> Límites del sistema del Biometano (BMC) obtenido de estiércol de vaca. .	87
<b>Figura 13.</b> Límites de los sistemas del diésel (DB5 S50) y gas natural (GN) .....	88
<b>Figura 14.</b> Recorrido del tractor para el transporte de materia prima desde el establo de vacas hasta la planta de biogás (línea azul). ....	95
<b>Figura 15:</b> Resultados de la evaluación de ciclo de vida de la planta de biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa en el software SimaPro. ....	102
<b>Figura 16.</b> Resultados de la evaluación de ciclo de vida según categorías de impacto de la planta de biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa: a) Cambio climático; b) Agotamiento de recursos fósiles. ....	103
<b>Figura 17.</b> Resultados de la comparación de la evaluación de ciclo de vida de los combustibles biometano del fundo La Católica, biometano de Ecoinvent, diésel de Ecoinvent y gas natural de Ecoinvent.....	111

**Figura 18.** Resultados de la comparación de la evaluación del impacto de ciclo de vida según categorías de impacto de los sistemas de estudio: a) Cambio climático; b) Agotamiento de recursos fósiles..... 112

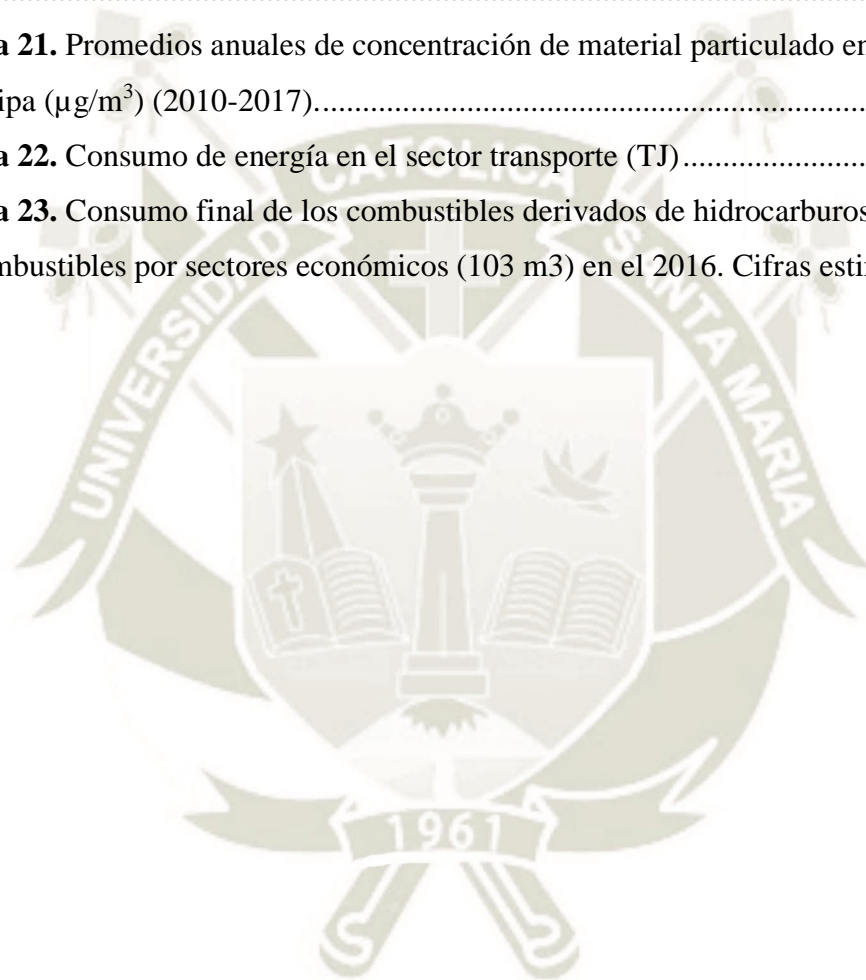
**Figura 19.** Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano, diésel y gas natural respecto a la categoría de cambio climático ..... 114

**Figura 20.** Reporte mensual de material particulado respirable PM<sub>10</sub>. Arequipa. 2018. .... 142

**Figura 21.** Promedios anuales de concentración de material particulado en la ciudad de Arequipa (µg/m<sup>3</sup>) (2010-2017)..... 142

**Figura 22.** Consumo de energía en el sector transporte (TJ)..... 143

**Figura 23.** Consumo final de los combustibles derivados de hidrocarburos y biocombustibles por sectores económicos (103 m<sup>3</sup>) en el 2016. Cifras estimadas..... 143



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Contenido de la mezcla de biodiesel B100 y diésel N° 2.....	30
<b>Tabla 2.</b> Rendimiento del metano en el biogás generado a partir del estiércol de diferentes animales .....	35
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de diferentes las configuraciones de digestión anaeróbica.....	37
<b>Tabla 4.</b> Estudios recientes de ACV aplicados a combustibles .....	57
<b>Tabla 5.</b> Localización geográfica de Arequipa Metropolitana .....	63
<b>Tabla 6.</b> Localización geográfica del Fundo La Católica .....	64
<b>Tabla 7.</b> Poder calorífico de los combustibles estudiados .....	85
<b>Tabla 8.</b> Inventario de ciclo de vida de la producción del biometano en el fundo La Católica.....	90
<b>Tabla 9.</b> Datos de inventario de la entrada de los productos de referencia diarios, anuales y en referencia a la unidad funcional.....	96
<b>Tabla 10.</b> Maquinarias utilizadas en la producción de biometano: Potencia, operación, consumo de electricidad anual y consumo en referencia a la unidad funcional.....	97
<b>Tabla 11.</b> Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano .....	104
<b>Tabla 12.</b> Procesos de la base de datos Ecoinvent para el diésel.....	109
<b>Tabla 13.</b> Procesos de la base de datos Ecoinvent para el gas natural.....	109
<b>Tabla 14.</b> Procesos de la base de datos Ecoinvent para el biometano .....	110
<b>Tabla 15.</b> Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano, diésel y gas natural .....	113
<b>Tabla 16.</b> Softwares comerciales para el cálculo para el análisis de ciclo de vida.....	144
<b>Tabla 17.</b> Softwares gratuitos para el cálculo para el análisis de ciclo de vida.....	145
<b>Tabla 18.</b> Detalles del vehículo para el transporte de la materia prima.....	156
<b>Tabla 19.</b> Detalles de infraestructura: Poza de alimentación.....	157
<b>Tabla 20.</b> Detalles de infraestructura: Cubierta de protección .....	157
<b>Tabla 21.</b> Detalles de maquinarias: Bomba de lodos.....	159
<b>Tabla 22.</b> Detalles de maquinarias: Compresor .....	159
<b>Tabla 23.</b> Detalles de infraestructura: Contenedores de metal .....	160
<b>Tabla 24.</b> Detalles de infraestructura: Base de hormigón.....	160
<b>Tabla 25.</b> Detalles de equipos: Tanque de hidrólisis .....	161

<b>Tabla 26.</b> Detalles de equipos: Biodigestor de geomembrana.....	161
<b>Tabla 27.</b> Detalles de equipos: Reservorio de gas .....	162
<b>Tabla 28.</b> Detalles de maquinarias: Compresor .....	163
<b>Tabla 29.</b> Detalles de maquinarias: Radiador .....	163
<b>Tabla 30.</b> Detalles de maquinarias: Enfriador de agua .....	164
<b>Tabla 31.</b> Detalles de maquinarias: Bomba de agua.....	164
<b>Tabla 32.</b> Detalles de infraestructura: Estructura de hierro .....	164
<b>Tabla 33.</b> Detalles de infraestructura: Base de hormigón.....	165
<b>Tabla 34:</b> Detalles de infraestructura: Techo de metal .....	166
<b>Tabla 35:</b> Detalles de equipos: Filtros Scrubber.....	166
<b>Tabla 36:</b> Detalles de equipos: Filtros PSA.....	167
<b>Tabla 37:</b> Detalles de equipos: Tanque de almacenamiento .....	167
<b>Tabla 38:</b> Detalles de accesorios: Tuberías .....	168
<b>Tabla 39.</b> Detalles de maquinaria: Compresor .....	170
<b>Tabla 40.</b> Longitud de las varillas por superficies .....	171
<b>Tabla 41.</b> Peso de las varillas de acero .....	172
<b>Tabla 42.</b> Resultados de la evaluación del impacto ambiental de la planta de Biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa, según categorías. ....	173
<b>Tabla 43.</b> Resultados de la evaluación del impacto ambiental según categorías de impacto de los combustibles biometano, diésel y gas natural .....	175



## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Promedios mensuales y anuales de material particulado en la ciudad de Arequipa .....	142
<b>Anexo 2.</b> Combustibles con mayor demanda en el Perú .....	143
<b>Anexo 3.</b> Herramientas de cálculo para el análisis de ciclo de vida .....	144
<b>Anexo 4.</b> Ficha de recolección de datos para el inventario de ciclo de vida de la producción del biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa, 2018 .....	147
<b>Anexo 5:</b> Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de transporte de la materia prima.....	156
<b>Anexo 6:</b> Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano. Proceso: Mezclado con agua .....	157
<b>Anexo 7:</b> Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano. Proceso: Conversión (Digestión Anaeróbica) .....	159
<b>Anexo 8:</b> Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano. Proceso: Purificación del biogás.....	163
<b>Anexo 9:</b> Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano. Proceso: Almacenamiento del biometano .....	170
<b>Anexo 10.</b> Procedimiento para el cálculo de la infraestructura: Cantidad de acero en la poza de alimentación .....	171
<b>Anexo 11.</b> Resultados del Análisis de Ciclo de Vida.....	173
<b>Anexo 12.</b> Registro fotográfico .....	177

## ABREVIATURAS

### Símbolos y fórmulas químicas

1,4-DB	: 1,4-diclorobenceno.
CH <sub>4</sub>	: Metano.
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de carbono.
HF <sub>6</sub>	: Hexafluoruro de azufre.
HFC	: Hidrofluorocarbonos.
N <sub>2</sub> O	: Óxido Nitroso.
PFC	: Perfluorocarbonos.
PM <sub>10</sub>	: Material Particulado menor a 10 micras.
PM <sub>2.5</sub>	: Material Particulado menor a 2.5 micras.

### Acrónimos

ACV	: Análisis de Ciclo de Vida.
AICV	: Análisis del Inventario de Ciclo de Vida.
BM	: Biometano.
BMC	: Biometano Comprimido.
CMNUCC	: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
DA	: Digestión Anaeróbica.
DB5	: Diésel B5.
DB5 S50	: Diésel B5 con bajo contenido de azufre.
DIGESA	: Dirección General de Salud Ambiental.
ECA	: Estándar de Calidad Ambiental.
EICV	: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida.
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
FONDECYT	: Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica.
GEI	: Gases de Efecto Invernadero.
GN	: Gas Natural.

GNC	: Gas Natural Comprimido.
GNL	: Gas Natural Licuado.
GNV	: Gas Natural Vehicular.
GREET	: Greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation (Gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en el transporte).
HDPE	: Polietileno de Alta Densidad.
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático).
ISO	: International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización).
LCA	: Life Cycle Assessment (Análisis de Ciclo de Vida).
LMP	: Límite Máximo Permisible.
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura y Riego.
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
NTP	: Norma Técnica Peruana.
OSINERGMIN	: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
PELCAN	: Peruvian Life Cycle Assessment and Industrial Ecology Network (Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial).
PUCP	: Pontificia Universidad Católica del Perú.
ROW	: Rest of the world (Resto del mundo).
SNGA	: Sistema Nacional de Gestión Ambiental.
TJ	: Terajoules.
TTW	: Tank to Wheel (Del tanque a la rueda).
UCSM	: Universidad Católica de Santa María.
UF	: Unidad Funcional.
WTT	: Well to Tank (del pozo al tanque).
WTW	: Well to Wheel (del pozo a la rueda).

## CAPÍTULO I

### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. DIAGNÓSTICO SITUACIONAL

El sector transporte es considerado uno de los principales responsables de la elevada emisión de GEI en el mundo, al cual se le atribuye el 39 % del total de emisiones generadas por el hombre (IPCC, 2014). La excedencia de dichas emisiones en la atmósfera, resultan la principal causa de la actual crisis climática (Samet & Woodward, 2019).

La gran mayoría de combustibles utilizados por este sector provienen de fuentes fósiles no renovables, teniendo como materia prima al 60 % del petróleo del mundo (Bartolozzi, Rizzi, & Frey, 2013). Al ser combustionado, el petróleo libera a la atmósfera compuestos tales como el dióxido de carbono, nitrógeno, azufre, metales pesados, así como material particulado (Pieprzyk, Kortluke, & Hilje, 2009).

Estas emisiones, al ser liberadas ocasionan incidencias directamente sobre el ambiente y la salud de las personas (Ministerio del Ambiente, 2014). Bajo determinadas circunstancias, las sustancias químicas suspendidas en el aire pueden ocasionar enfermedades crónicas, como las pulmonares, cardiovasculares, cerebrovasculares o hasta la muerte (Gonzales, Zevallos, Gonzales-Castañeda, & Nuñez, 2014).

El Perú no se encuentra exento de esta situación, siendo además el sector que representa la mayor demanda de energía en el país, en el que generalmente se emplea el 91 % de petróleo y el 8 % de gas natural (Ñiquen, 2017).

Así mismo, Arequipa tiende a ser una de las ciudades con mayor contaminación del país debido a su configuración geográfica en forma de hoya, es decir, un valle rodeado de volcanes que impiden que los vientos dispersen los contaminantes, por lo que se mantienen y concentran en la atmósfera de la ciudad (Llanque, 2003). Las

principales fuentes de contaminación de la calidad del aire son el parque automotor, las ladrilleras y las cementeras (Ministerio del Ambiente, 2016a).

A lo largo de los años, los monitoreos llevados a cabo por la Dirección General de Salud en Arequipa (DIGESA), registran concentraciones diarias promedio de material particulado (PM<sub>10</sub>) que no logran exceder los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de 24 horas. Sin embargo, las concentraciones máximas diarias, sí exceden estos estándares (Ministerio del Ambiente, 2016a). Las concentraciones mensuales y anuales promedio, mostradas en el Anexo 1, Figura 20 y 21, superan los ECA establecidos, por ejemplo, los datos registrados entre los años 2010 al 2017, presentan concentraciones de PM<sub>10</sub> de hasta 100 µg/m<sup>3</sup>, sobrepasando el ECA anual permitido de 50 µg/m<sup>3</sup> (Ministerio del Ambiente, 2017).

A pesar de la gran dependencia del país a los combustibles fósiles, hay quienes apuestan por combustibles renovables para un desarrollo económico sostenible, debido a sus beneficios ambientales que, a diferencia de los no renovables, ayudan a desacelerar los procesos que causan el cambio climático (Ñiquen, 2017). Siendo las principales fuentes de energía renovable en el Perú la hidráulica, que genera energía eléctrica gracias al movimiento del agua; la energía térmica, a través de cuerpos expuestos al calor; la energía eólica, a partir del viento mediante aerogeneradores; y la energía de la biomasa, generada a partir de residuos orgánicos ganaderos, forestales o agrícolas, mediante su combustión directa o mediante procesos de transformación resultado el biodiesel, etanol, biogás y biometano (EPA, 2020).

Entre estos, al utilizar el biometano en el sector transporte, compone una opción beneficiosa para el ambiente en este sector (IRENA, 2018; FAO, 2011). A pesar de poseer una composición química similar a la del gas natural, su uso no contribuye en gran medida al calentamiento global, debido a que el carbono que lo conforma ya se encuentra en la atmósfera, gracias a su origen en la biomasa. Además, su producción genera residuos útiles como el biofertilizante, el cual puede ser muy utilizado por agricultores como abono (Koido, Takeuchi, & Hasegawa, 2018; Peña, *et ál.*, 2018a).

En Arequipa se produce biometano a partir de residuos de biomasa en el Fundo La Católica en Majes, como parte de un proyecto de la Universidad Católica de Santa María (UCSM) para su posterior uso como combustible de transporte (Peña G. , 2017a). No obstante, hasta el momento, poco se ha estudiado sobre la identificación y evaluación de los impactos ambientales asociados a la producción y uso del biometano en comparación a otros combustibles comerciales o alternativas en el mercado a nivel mundial (Lyng & Brekke, 2019) y, sobre todo, en Arequipa (Peña, *et ál.*, 2018a).

La mayor cantidad de emisiones que genera un combustible se producen no solo en la combustión, sino también en las etapas previas, como en la extracción de materia prima, en el transporte a la planta, en los procesos que involucrados en la producción del combustible (Cuéllar, 2016) o hasta en la infraestructura utilizada (Mezzullo, McManus, & Hammond, 2013).

En el mundo, sobre todo en Europa (Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016), se ha aplicado ampliamente la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la identificación de los impactos ambientales a lo largo la extracción de materia prima, la producción y el uso de los combustibles, sobre todo del biometano (Florio, *et ál.*, 2019; Ardolino & Arena, 2019; Collet, *et ál.*, 2017; Budzianowski & Brodacka, 2017). Así mismo, en su comparación con otros combustibles (Lyng & Brekke, 2019; Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, 2018; Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, 2017).

En Perú, se ha tenido una amplia aplicación del ACV en diferentes sectores, como herramienta que surge principalmente para el monitoreo de los impactos ambientales en la adecuación o adopción de tecnologías de bajas emisiones de carbono (Vázquez-Rowe, Kahhat, Larrea-Gallegos, & Ziegler-Rodriguez, 2019). No obstante, en cuanto al sector transporte y combustibles, se evidenció una escasez de investigación en estos estudios.

Actualmente, no se han reportado estudios de ACV del biometano en el sector transporte o alguno relacionado a los impactos en su ciclo de vida en el país,

necesario para el apoyo en la buena toma de decisiones, creación de leyes, normativas, entre otros. Es entonces que el presente proyecto busca la aplicación del ACV como herramienta de evaluación del impacto ambiental en el ciclo de vida del biometano en comparación a los combustibles no renovables usados en la ciudad de Arequipa.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El desconocimiento del impacto ambiental en la producción del biometano como combustible renovable para el transporte obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con respecto a los combustibles no renovables diésel y gas natural, para la correcta toma de decisiones.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

La mayor parte de emisiones generadas por algún combustible se producen no solo en el tubo de escape del vehículo utilizado, sino también en las etapas previas, como la extracción y transporte de la materia prima, la producción, el almacenamiento, entre otros (Cuéllar, 2016). Adicionalmente, poco se ha estudiado sobre la identificación y evaluación de los impactos ambientales asociados a la producción y uso del biometano en comparación con otros combustibles en el sector transporte en Arequipa (Lyng & Brekke, 2019; Peña, 2018).

Por lo expuesto, es importante generar un estudio que identifique los impactos ambientales en la producción y transporte del biometano. Los tomadores de decisiones podrían explotar los resultados obtenidos para la introducción al sector transporte mediante un proyecto de la UCSM, basado en el desempeño ambiental.

### **1.3.1. Aspecto Social**

Las personas no conocen sobre los impactos del ciclo de vida de los combustibles sobre su propio bienestar. En estudio se dan a conocer estos impactos, para el conocimiento y toma de decisiones.

### **1.3.2. Aspecto Económico**

A causa del desconocimiento, nuestro país aún depende en gran medida de los combustibles fósiles, debido a los altos costos de instalación o adaptación de los biocombustibles (Ñiquen, 2017). Este estudio, además de dar a conocer los impactos que se generan en el ciclo de vida del biometano, será útil como una herramienta para la toma de decisiones en cuanto a temas económicos.

### **1.3.3. Aspecto Ambiental**

El uso de los combustibles fósiles en el parque automotor es un gran contribuyente a la crisis climática, atribuyéndose el 39% del total de las emisiones generadas por el hombre (IPCC 2014). Estos combustibles tienen como materia prima al 60% del petróleo del mundo (Bartolozzi, Rizzi, & Frey, 2013), el cual, al combustionar libera a la atmósfera compuestos agresivos con el ambiente como el dióxido de carbono, nitrógeno, azufre, metales pesados, así como material particulado (Pieprzyk, Kortluke, & Hilje, 2009).

Este estudio, identifica los impactos generados por el biometano sobre el ambiente y los compara con los ocasionados por los combustibles fósiles, para el conocimiento y puesta en acción de autoridades ambientales competentes que puedan decidir sobre el uso de energías limpias en Arequipa y en el país.

### **1.3.4. Aspecto Tecnológico**

Existe una necesidad de aplicar metodologías confiables, eficaces y realistas para evaluar el impacto de la producción de combustibles en el Perú. A su vez, dicha metodologías permitirán una toma de decisiones informada que contribuya a la diversificación energética del país.

Adicionalmente, en el Perú, el análisis de ciclo de vida ha tenido un amplio uso en diferentes sectores, como herramienta para la evaluación de impactos ambientales.



Sin embargo, no se han encontrado estudios publicados relacionados al análisis del biometano. Por lo que, este estudio será iniciador y guía para siguientes estudios sobre el biometano y otros combustibles.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo General**

Analizar el ciclo de vida del biometano de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte en comparación con el diésel y el gas natural mediante el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Elaborar el diagnóstico situacional del uso del biometano, el diésel y el gas natural en el sector transporte en la ciudad Arequipa.
- Evaluar el Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos óptimos obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.
- Comparar el Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con el diésel y el gas natural como combustibles en el sector transporte en la ciudad de Arequipa utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTO TEORICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En los últimos años, el interés por el uso de energías renovables sobre las no renovables ha incrementado en los diferentes sectores debido los beneficios ligados a la producción y consumo sostenibles que representan (Florio, *et ál.*, 2019). Entre ellos, se resalta la contribución a la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) establecidos en el protocolo de Kioto (CMNUCC, 1998). Sin embargo, algunos estudios resaltan la existencia de impactos generados por energías renovables en comparación a las energías de fuentes fósiles debido a las irregularidades climáticas (Collet, *et ál.*, 2017; Mezzullo, McManus, & Hammond, 2013).

En particular, dentro de las energías renovables que tienen como materia prima a los residuos orgánicos, se encuentra la digestión anaeróbica (DA) para la producción de biometano. La cual, aparenta ser una forma viable de generación de energía simultánea a la gestión de los residuos orgánicos (Long, Funqing, Xumeng, & Yebo, 2018).

Para el descubrimiento de dicha viabilidad, diferentes estudios a nivel mundial han evaluado exhaustivamente los impactos ambientales de diferentes plantas de biogás, tecnologías para su producción, actualización y almacenamiento, así como el uso final, entre otros sistemas, mediante la herramienta de ACV. La cual, además de ser indispensable en este tipo de estudios para la evaluación del efecto invernadero y otras emisiones gaseosas, determina las ventajas potenciales ambientales, económicas y sociales en comparación con otros combustibles (Lauer, Hansen, Lamers, & Thran, 2018). Además, cabe precisar que estos estudios o estudios relacionados se siguen siendo investigados hasta la actualidad en todo el mundo (Buchspies, Kaltschmitt, & Junginger, 2020; Okeke, Sahoo, Kaliyan, & Mani, 2020; Qyyum *et ál.*, 2020).

Respecto a los procesos y tecnologías, resalta el estudio de Ardolino & Arena (2019), en el que se evaluaron dos técnicas de producción de biometano en Italia utilizando el software de ACV, SimaPro: la conversión biológica de residuos húmedos mediante digestión anaeróbica y la conversión termoquímica de residuos secos, incluyendo la actualización del gas resultante en ambos casos. A pesar de encontrarse en etapa de demostración, la conversión termoquímica mostró un mejor desempeño ambiental además de poseer un gran interés por sus valores altos de eficiencia energética.

En el mismo país y utilizando el mismo software, Florio *et ál.* (2019) compararon diferentes tecnologías de actualización para el aumento del contenido de metano en el biogás a partir de materia prima de desecho, resultando la actualización por membranas la tecnología más ecológica. Adicionalmente, entre las categorías de impacto estudiadas, al evitar el uso de combustibles fósiles, se reconoció un ahorro de 0.5kg equivalente de petróleo por m<sup>3</sup> de biogás producido, aproximadamente.

Por su lado, Budzianowski & Brodacka (2017) estudiaron mediante el ACV, las tecnologías de almacenamiento del biometano en Polonia, describiendo su versatilidad, eficiencia, diversidad de costos y adaptación en diferentes usos finales del gas. Resultando que, en términos de reducción de impactos y viabilidad económica, la sostenibilidad del biometano mejora al aplicar sistemas almacenamiento de biometano adecuadamente diseñados.

Ferreira *et ál.* (2019) compararon los impactos del uso del biometano en hornos de cocina, vehículos pesados y ligeros para el transporte en Brasil utilizando el software OpenLCA, resultando beneficiada la categoría de impacto de cambio climático por el reemplazo de combustibles fósiles por biometano. No obstante, el estudio se realizó bajo un enfoque de la puerta a la rueda, considerando que un análisis de todo el ciclo de vida del combustible con enfoque del pozo a la rueda brindaría mayor detalle y certeza en los resultados.

En cuanto a estudios bajo perspectivas ambientales, económicas y tecno económicas que se determinaron con la herramienta de ACV, se exponen los siguientes:

Desde una perspectiva ambiental, Ardolino *et ál.* (2018) estudiaron el ACV una planta de biogás a partir de residuos orgánicos municipales en Italia, mediante el software SimaPro. Donde se destacó que, los impactos ambientales serían mayores si es que si los procesos se basaran únicamente en la obtención de energía eléctrica. Por lo tanto, destinar la planta a la producción de biometano traería consigo una mejora en las categorías de impacto, entre ellas, el potencial de calentamiento global.

Así mismo, Mezzullo *et ál.* (2013) evaluaron, el ciclo de vida de una planta de digestión anaeróbica a pequeña escala a partir de desechos de ganado en Reino Unido, por medio del software SimaPro. Se demostró que, a pesar de la notable reducción de combustibles fósiles y de GEI que significa la producción y uso del biogás, este podría tener un costo en la salud del ecosistema, debido a la presencia de amoníaco en la etapa de producción de la planta. A su vez, se propuso medidas de control de emisiones.

Desde una perspectiva tecno-económica, Collet *et ál.* (2017) evaluaron el ciclo de vida de la producción del metano con la tecnología de energía a gas en Francia, mediante el factor de caracterización del IPCC, para la conversión del agua en hidrógeno mediante electrólisis, seguido de síntesis de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono. El resultado fue que, el costo de operación de esta tecnología depende de los costos de electricidad y, desde una perspectiva ambiental, su impacto es mayor que las tecnologías convencionales, pero sigue siendo menor que las alternativas fósiles.

Desde una perspectiva económica, Koido *et ál.* (2018) calcularon el ACV una planta de biometano en Tailandia mediante el software japonés MiLCA, donde se determinó que los ingresos por la venta de electricidad y por el servicio de eliminación de desperdicios alimenticios generan considerables beneficios económicos, mientras que el costo de mantenimiento de la planta genera impacto en el gasto. Adicionalmente, para mayores beneficios económicos y ambientales, se

propuso la gestión del residuo sólido generado en la digestión anaerobia, como abono en actividades agrícolas.

De igual importancia, desde una perspectiva netamente económica en el estudio de huella de carbono de Chan Gutiérrez *et ál.* (2018), se consideró la aplicación de un subsidio por biometano vendido, equivalente a un porcentaje del costo del diésel como combustible para autobuses urbanos en México.

A primera vista, la mayoría de los estudios de ACV sobre sistemas de producción y purificación del biogás se han realizado en Europa. Estos estudios proporcionan una base sólida de conocimientos que se aplican en la mejora de la eficiencia de dichos sistemas y, por ende, en la reducción de los impactos ambientales (Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016). Además, brindan datos e información a los formuladores de políticas, operadores y planificadores que desean o deben abordar trabajos de gestión ambiental (Ardolino, Parrillo, & Arena, 2018) en países europeos y en el mundo.

Por otro lado, existen bastantes estudios que comparan los impactos de la producción y uso de combustibles fósiles con los combustibles alternativos en el sector transporte. Sin embargo, son pocos los que incluyen al biometano o al análisis de los impactos en su ciclo de vida (Lyng & Brekke, 2019), sobre todo en el contexto peruano, donde la existencia de tales estudios es nula.

Entre los estudios que no incluyen al biometano como sistema de estudio, destacan los que modelan los procesos de diferentes combustibles en el software SimaPro bajo el enfoque del pozo a la rueda, que además utiliza la metodología CML en Canadá (Bicer & Dincer, 2018), la metodología ReCiPe midpoint y endpoint en Australia (Sharma & Strezov, 2017) u otras metodologías para investigaciones a nivel nacional en España (Lechón, Cabal, Lago, Izquierdo, & Sáez, 2014).

Mientras que, los estudios que incluyen a los procesos del biometano entre sus sistemas de estudio son los siguientes:

En Noruega, Lyng & Brekke (2019) evaluaron el ciclo de vida del biometano obtenido a partir de desperdicios de alimentos y el biometano que se obtiene a partir del estiércol de ganado en comparación con el gas natural, el diésel, el biodiésel y la electricidad en función a la conducción de un autobús a lo largo de un kilómetro, con un enfoque del pozo a la rueda, mediante el software SimaPro y la metodología CMLIAb. Exponiendo que el combustible que posee la contribución más baja en las categorías de impacto ambiental, como el potencial de calentamiento global, es el biometano obtenido a partir de desperdicios de alimentos, superando al que es obtenido a partir del estiércol de ganado debido principalmente al consumo de agua en sus procesos.

En Suecia, Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018) compararon el uso del biometano licuado producido a partir de la DA de una planta de tratamiento de aguas residuales y el diésel, en función a 16000000 ton-km de la operación de tractores que transportan materiales, bajo el enfoque del pozo a la rueda, utilizando el software SimaPro y metodología ReCiPe. A pesar de demostrar que el biometano es preferido ambientalmente sobre el diésel, se advierte que este beneficio ambiental no es significativo si la electricidad utilizada en la planta de producción de biometano proviene de fuentes de carbón.

En Bélgica, Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, (2017) trabajaron en la comparación de tecnologías de vehículos que funcionan a gas natural, biometano, diésel, gasolina, vehículos eléctricos e híbridos en función a la conducción de un kilómetro, desde una perspectiva ambiental, bajo enfoque del pozo a la rueda y metodología ReCiPe. Sin embargo, se le da mayor atención al potencial de los vehículos eléctricos.

A nivel Latinoamericano, se ha desarrollado la tendencia de estudiar el ACV de la producción de combustibles renovables contextualizados al lugar donde se investiga. Mientras que, para combustibles fósiles, se tiende a evaluar su utilización (Alzamora, Villar, & González-Delgado, 2015).

En Brasil, el estudio de Ferreira *et ál.* (2019), mencionado anteriormente, asegura que no hay trabajos previos que se enfoquen en los usos finales del biometano y sus impactos ambientales en el escenario brasileño.

En Colombia, se han realizado varios estudios sobre la evaluación del impacto ambiental de combustibles, no solo con la herramienta de ACV, sino también con otras herramientas de evaluación, como Conesa, donde se analizan los impactos que generan unos biodigestores anaeróbicos sobre el suelo, aire, agua, población, entre otros (Tobón, 2017).

Así mismo, Cuéllar (2016) estudió el ACV de diversas fuentes energéticas como la gasolina, diésel, gas natural y electricidad, usadas en el transporte público de Bogotá, bajo el enfoque del pozo a la rueda, mediante el software OpenLCA y los factores de caracterización del IPCC. Resultando, por un lado, que la mayor cantidad de emisiones son generadas en la combustión del vehículo, pero, por otro lado, se reconoce que en los vehículos livianos existe una considerable emisión de GEI en etapas previas a la combustión.

Mencionado estudio complementó el de Buitrago (2014) quien, bajo la misma metodología y software, evaluó la comparación entre el etanol carburante, la gasolina, el biodiésel y el diésel. Concluyendo que la producción de bioetanol y biodiésel generan una menor cantidad de GEI en comparación a la gasolina y diésel fósil, respectivamente. Además, se planteó la posterior gestión de residuos agrícolas en el caso de los biocombustibles, a fin de evitar la quema de los cultivos, reduciendo aún más sus impactos.

En Argentina, se destacan dos estudios respecto al análisis de los impactos del biometano, donde uno aplicó netamente la herramienta de ACV y en el otro comparó el uso de otra herramienta de evaluación ambiental. En el primero, se estudió el ACV de la actualización del biogás mediante tres procesos de absorción-desorción que involucran polietilenglicol dimetil éter, diglicolamina y agua utilizando el software OpenLCA y la metodología CML 2001. Se rescató que, el proceso que utiliza como disolvente al agua resultó más factible a nivel ambiental y económico. Además, se

señaló que, influyó directamente en los impactos los diversos tipos de desecho con los que se alimentó la planta, así como los diferentes usos finales del biometano, tanto energía como combustible doméstico (Morero, Groppelli, & Campanella, 2015).

En el segundo, se comparó el ACV presentado anteriormente con un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del mismo caso, donde el primero siguió la normativa ISO 14040 y el segundo, los requisitos de legislación argentina. Los resultados del ACV fueron descritos anteriormente, mientras que los del EIA demostraron que es un proyecto factible donde los impactos negativos pueden ser mitigados mediante medidas de prevención y corrección. Finalmente, se determinó que el EIA es una herramienta que puede complementar al ACV (Morero, Rodríguez, & Campanella, 2015).

En Chile, Morales (2015) estudiaron los impactos relacionados al ciclo de vida de la gasolina, considerado el segundo combustible más usado en el país, bajo el enfoque del pozo a la rueda en función a un kilómetro conducido por un auto de mediano tamaño. Se expresó finalmente que, los procesos de refinación del combustible y la conducción son las etapas que afectan en mayor porcentaje a las categorías de impacto, sobre todo al cambio climático, por los GEI generados.

En Perú, se ha tenido una amplia aplicación del ACV en diferentes sectores, como herramienta que surge principalmente para el monitoreo de los impactos ambientales en la adecuación o adopción de tecnologías de bajas emisiones de carbono (Vázquez-Rowe, Kahhat, Larrea-Gallegos, & Ziegler-Rodríguez, 2019). No obstante, en cuanto al sector transporte y combustibles, se evidenció una escasez de investigación en estos estudios.

Entre lo desarrollado mediante ACV en el Perú, se encontró que la gran mayoría se tratan de proyectos elaborados por la Red Peruana de Ciclo de Vida (PELCAN) un grupo de investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), notándose en la mayoría, la preferencia del software SimaPro para el cálculo de los impactos ambientales junto con la base de datos Ecoinvent.



A su vez, gracias al esfuerzo conjunto del Ministerio del Ambiente, la ONU Medio Ambiente y el grupo de investigación mencionado, se desarrolló la base de datos peruana de ciclo de vida llamada Perú LCA, donde se muestra principalmente información vinculada a centrales hidroeléctricas, vertederos, productos de refinería, pesca y acuicultura. Esta base de datos pretende, además de obtener datos de futuros proyectos en el país, ser una conexión con plataformas globales (Vázquez-Rowe, Kahhat, & Sánchez, 2019).

Los estudios recientes de ACV realizados en el país trataron temas sobre construcción como la bioconstrucción (Ita-Nagy, *et ál.*, 2020), la producción de cemento (Vázquez-Rowe, *et ál.*, 2019), y carreteras (Verán-Leigh, Larrea-Gallegos, & Vázquez-Rowe, 2019); la industria alimentaria, como la optimización de dietas alimentarias (Larrea-Gallegos & Vázquez-Rowe, 2020), los productos marinos (Avadí, Henriksson, Vázquez-Rowe, & Ziegler, 2018) y la refinación de la anchoveta (Avadí, Fréon, & Quispe, 2014); la agricultura, como la aplicación de diferentes tecnologías agrícolas (Larrea-Gallegos, Vázquez-Rowe, Wiener, & Kahhat, 2019), la sostenibilidad en un sistema agroalimentario (García-Herrero, *et ál.*, 2018) y la producción de quinua orgánica (Cancino-Espinoza, Vázquez-Rowe, & Quispe, 2018); la gestión de residuos, como el cambio de contenedores de basura a vertederos (Ziegler-Rodríguez, Margallo, Aldaco, Vázquez-Rowe, & Kahhat, 2019) y el mejoramiento de estrategias (Margallo, *et ál.*, 2019); la minería, como la extracción de oro en la selva amazónica (Kahhat, Parodi, Larrea-Gallegos, Mesta, & Vázquez-Rowe, 2019); proyectos energéticos, como centrales hidroeléctricas (Verán-Leigh & Vázquez-Rowe, 2019), energía a partir de cascara de arroz (Quispe, Navia, & Kahhat, 2019), entre otros, como la producción de pisco (Vázquez-Rowe, Cáceres, Torres-García, Quispe, & Kahhat, 2017).

En cuanto al sector transporte, sobresalió el estudio de Quispe *et ál.* (2009) quienes compararon los biocombustibles: biodiésel y etanol, con los combustibles fósiles: diésel, gasolina y gas natural en función a un kilómetro recorrido en un vehículo, bajo el enfoque del pozo a la rueda, mediante el software SimaPro y la metodología Eco Indicador 99. Resultó que, a pesar de que los biocombustibles signifiquen una

menor carga ambiental a diferencia de los combustibles fósiles, estos generan mayor impacto en las etapas de producción que en las etapas de conducción del vehículo.

Según lo expuesto, no se han encontrado estudios de ACV publicados sobre el biometano aplicado al sector transporte o alguno relacionado a sus impactos ambientales en sus procesos, tecnologías o usos finales en el Perú. Dada la relevancia y la utilidad del método, se evidencia la necesidad y funcionalidad de su aplicación en para la identificación de los impactos ambientales de dicho combustible a lo largo de su ciclo de vida.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Combustibles**

Los combustibles son sustancias que generan calor o energía a partir de su combustión. La combustión se lleva a cabo por un conjunto de reacciones de oxidación que generan calor, producida por dos elementos, un combustible, explicado anteriormente, y un comburente, que es el oxígeno (García, 2001). Desde una perspectiva energética, una de las características principales de los combustibles es el poder calorífico.

#### **2.2.1.1. Poder calorífico**

El poder calorífico se trata de la cantidad de calor generada a partir de la oxidación completa, a presión atmosférica de una unidad de masa del combustible (Ramón-Ramón, Cárdenas-Gutiérrez, & Rojas-Suárez, 2018). Esta propiedad puede expresarse en las siguientes unidades: kWh/kg o MJ/kg en combustibles sólidos y kWh/Nm<sup>3</sup> o MJ/Nm<sup>3</sup> en combustibles gaseosos. El Nm<sup>3</sup> o Normal m<sup>3</sup>, es el gas que se contiene en un metro cúbico a cero grados centígrados y a presión atmosférica (García, 2001).

Según sea el estado del agua presente en los combustibles, el poder calorífico puede encontrarse según dos tipos: Poder Calorífico Inferior (PCI) y Poder Calorífico Superior (PCS). El primero, o también poder calorífico neto, es el calor generado en

la combustión de una unidad de combustible cuando el agua está en forma de vapor. El segundo, o también poder calorífico total, es el generado en la combustión de una unidad de combustible cuando el agua se encuentra en forma líquida, aprovechándose así todo el calor de oxidación (Chandra, 2018).

En el caso de combustibles generados a partir de biomasa, el poder calorífico es una indicación de la energía única de manera química en ella y en el proceso de combustión se convierte en energía térmica. El poder calorífico es la propiedad que tiene más importancia de un combustible, ya que determina el valor energético del mismo (Ozyuguran, Akturk, & Yaman, 2018) (Erol, Haykiri-Acma, & Küçükbayrak, 2010).

### **2.2.1.2. Clasificación de los combustibles**

Según diferentes características, combustibles se clasifican de la siguiente manera:

- Por su origen, en fósiles y no fósiles;
- Por su grado de preparación, en naturales, los cuales son de uso directo desde su origen, y elaborados, que son sometidos a procesos de transformación;
- Por su estado de agregación, en sólidos, encontrados en la naturaleza como el carbón o la madera, en líquidos, los cuales son utilizados como combustibles; y en gaseosos, como el gas natural y variedades (Eguruchela, 2020);
- Por su uso, en combustibles convencionales, como el fósil, en combustibles alternativos, los cuales son la relación entre materia fósil y biomasa actual como el biodiésel, gas natural, bioetanol, gas licuado de petróleo, entre otros, y en combustibles emergentes, los cuales son nuevos suministros de energía, como el biometano, biobutanol, entre otros (Goñi & Rojas, 2016);
- Por el tipo de recursos utilizados, en combustibles no renovables y renovables.

### 2.2.2. Combustibles no renovables

Los combustibles no renovables son producidos a partir de fuentes fósiles; las cuales, desde un enfoque orgánico, se formaron en depósitos subterráneos mediante condiciones óptimas de profundidad, grandes presiones, ausencia de oxígeno, temperatura, así como distintos procesos físicos y químicos para la descomposición de organismos que vivieron hace millones de años entre otros materiales orgánicos (Osinergmin, 2015).

Los productos de mayor importancia obtenidos al destilar el crudo de petróleo son el diésel, gasolina, gas licuado de petróleo, queroseno, nafta, combustible para calefacción y base de asfalto (Rasello & Manca, 2014).

A nivel mundial, estos productos tienen un rol dominante en los sistemas energéticos. Sin embargo, son la principal fuente de contaminación atmosférica, además de contribuir a la generación de gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub> (Ritchie & Roser, 2020). Se estima que la emisión del 78-80 % del CO<sub>2</sub> al año es producida por la quema de los combustibles de origen fósil (IPCC, 2015).

En el Perú, el abastecimiento de la demanda de combustibles fósiles está a cargo de siete refinerías de petróleo, donde las más importantes por su volumen de producción son la refinería de Talara y de la Pampilla (Catacora, 2013). No obstante, se necesita importar grandes volúmenes de crudo de petróleo procesado, debido a la ausencia de tecnologías, para satisfacer la demanda nacional de productos derivados (Osinergmin, 2015; Rios, 2011).

Según el más reciente Balance Nacional de Energía, el sector con mayor demanda de combustibles es el transporte, seguido por el sector industrial. En los cuales, el diésel B5 y el gas natural se encuentran entre los combustibles con mayor demanda respectivamente, detallado en el Anexo 2, Figura 22 y 23 (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

### 2.2.2.1. Diésel

El diésel es un combustible líquido compuesto, generalmente, por una fracción específica de petróleo destilado a temperaturas altas entre 200-350 °C, a presión atmosférica y con una densidad aproximada de 0.85 kg/L (Speight, 2011a). Su composición promedio es de  $C_{12.9}H_{23.9}$  y peso molecular de 211.7 g/gmol (Soares, 2015).

Además, su poder calorífico es de 42.6 MJ/kg (Engineering ToolBox, 2020), lo que significa que posee un alto contenido energético a diferencia de otros combustibles en el sector transporte por unidad en uso (Diesel Technology Forum, 2014).

La calidad del diésel como combustible puede expresarse como índice de cetano o número de cetano, el cual indica su calidad de ignición (Fahim, Alsahhaf, & Elkilani, 2010). Adicionalmente, el diésel ultra bajo en azufre, ULSD por sus siglas en inglés, se trata de un estándar que define al diésel con un bajo contenido bastante bajo de azufre (Speight, 2011a).

En el Perú, el diésel es considerado el combustible más usado en el sector transporte, siendo el diésel B5 el más consumido seguido por el diésel B5 S-50 con un total de 97.6 miles de barriles al día (Osinergmin, 2013).

El diésel B5 se trata del combustible de comercio obligatorio en el país compuesto por el 95 % de diésel N° 2 y el 5 % de biodiésel B100, derivados de hidrocarburos y de recursos naturales como aceites vegetales, respectivamente. Los porcentajes son detallados en la Tabla 1, quedando prohibida la comercialización de mezclas en diferentes proporciones, según el Decreto Supremo N° 021-2007-EM.

**Tabla 1.** Contenido de la mezcla de biodiesel B100 y diésel N° 2

Denominación	Volumen de biodiésel	Volumen de diésel N° 2,
	B100, %	%
<b>B2</b>	2	98
<b>B5</b>	5	95
<b>B20</b>	20	89

**Fuente:** Decreto Supremo N° 021-2007-EM

Por otro lado, el diésel B5 S50 tiene la misma composición que el diésel B5, diferenciándose por que el diésel N° 2 que lo compone presenta un nivel bajo de 50 partes por millón (ppm) de azufre, nivel requerido por motores con emisiones Euro IV (Petroperu, 2020). La prohibición del comercio del diésel B5 como medida para la reducción de la contaminación atmosférica, fue establecida a partir del 2012 en Arequipa y otros departamentos del país según la Resolución Ministerial N° 139-2012-MEM-DM.

#### 2.2.2.2. Gasolina

La gasolina es un combustible líquido usado en motores de combustión interna con encendido por chipa, obtenido a partir de la destilación directa de la fracción líquida del petróleo (Sarkar, 2015). Su densidad es aproximadamente entre un 15-20 % más baja que la del diésel. Del mismo modo, en la combustión, la gasolina libera energía hasta 34,9 MJ/L, mientras que el diésel libera más energía (Speight, 2011a).

#### 2.2.2.3. Gas Licuado de Petróleo

El gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible obtenido a partir de la fracción de hidrocarburos de punto de ebullición bajo proveniente de procesos del crudo de petróleo en refinería y plantas de procesamiento de gas natural que comprenden butano y propano. En condiciones ambientales, puede permanecer en estado gaseoso, pero tiende a convertirse en líquido cuando se somete el gas a presiones moderadas a temperatura ambiente (Speight, 2011b).

#### 2.2.2.4. Gas Natural

El gas natural (GN) es una mezcla gaseosa de hidrocarburos compuesta en gran parte por metano ( $\text{CH}_4$ ). Entre sus usos se encuentra el industrial, comercial, doméstico, para la generación de electricidad y sobre todo para el sector transporte como combustible vehicular alternativo, por su reducido contenido de azufre (Goñi & Rojas, 2016).

Este combustible de calidad alta, limpia, eficiente y de bajas emisiones de carbono respecto a otros combustibles fósiles (Academic Press, 2019) puede llegar a contribuir en la solución de dos problemas energéticos mundiales, por un lado, en la reducción de gases de efecto invernadero y, por otro, siendo una energía sostenible para el uso económico y social (Mokhatab, Poe, & Mak, 2019).

El GN puede usarse de dos maneras, como gas comprimido (GNC), que es la más común, y como gas licuado (GNL). Debido a requerimientos para su almacenamiento, la mayoría de los vehículos de gas natural funcionan con GNC o también llamado gas natural vehicular (GNV) que debe pasar por un proceso de compresión a 200 bar como máximo (Viswanathan, 2017).

#### 2.2.3. Combustibles renovables

En los últimos años, los problemas de contaminación atmosférica, la fluctuación en los precios del petróleo y las reservas limitadas del mismo han provocado que se incremente la tendencia a la investigación, promoción y uso de los combustibles renovables como una alternativa a la gran demanda de combustibles fósiles (Ali, *et ál.*, 2019). Aun así, la factibilidad en su uso aun depende, en su mayoría, del aumento de precios de los combustibles convencionales y, sobre todo, de las decisiones políticas del país en cuanto a la aceptación de proyectos de energías renovables (Osinermin, 2015).

Los combustibles renovables son producidos a partir de recursos renovables. Aquí se encuentran los biocombustibles, como el etanol y el aceite vegetal utilizado como

combustible y el de hidrógeno generado por procesos renovables. Así mismo, se incluyen los combustibles que provienen a partir de fuentes de energía renovable, como la bioenergía, la energía solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y oceánica (Gielen, *et ál.*, 2019; IPCC, 2011). Tanto la energía solar como la energía eólica, son fuentes de energía intermitentes, ya que varían debido a las diferentes condiciones ambientales. Por lo tanto, estas energías no pueden ser aplicadas en muchas industrias a gran escala (Deolalkar, 2016).

La energía solar se genera mediante reacciones nucleares en el sol y llega a la superficie terrestre en forma de radiación electromagnética (Breeze, 2019). Esta energía se encuentra disponible sin costo y en grandes cantidades alrededor del mundo (Haque, 2016). Se calcula que la cantidad anual de energía que requiere el ser humano es alrededor de  $4.6E+20$  Joules, cantidad equivalente a la energía que es entregada por el sol hacia la tierra en una hora. La energía total que el sol entrega al planeta es de  $1.2E+5$  TW, la cual sobrepasa a cualquier otra fuente de energía renovable o no renovable (Crabtree & Lewis, 2015).

La energía eólica es una fuente sostenible de energía libre de contaminación, siendo la más eficiente y utilizada en el mundo después de la energía solar (Hossain, 2019). Como alternativa al uso de los combustibles fósiles, es limpia, renovable, viene en cantidades abundantes, es de amplia distribución, utiliza poco espacio de tierra y, tanto en su producción y uso, no genera emisiones de gases de efecto invernadero (Bassam, Maegaard, & Schlichting, 2013). Según aproximaciones, 20% del potencial de energía eólica total mundial representaría hasta 123 petawatts-hora (PWh) de energía eléctrica al año, lo que correspondería a una producción anual promedio de 14 TW de energía, igual a 7 veces el consumo global actual de energía en el mundo (Barrett, Evans, Griffiths, & Perry, 2017; Lu, McElroy, & Kiviluoma, 2009).

### **2.2.3.1. Energía de biomasa**

La bioenergía es producida a partir de materia renovable debido a que la biomasa puede ser producida constantemente (Funabashi, 2016). Una provisión de este material que, en muchos casos no es utilizada, consiste en los residuos de tierras de



cultivo y residuos de desecho, estiércol animal, residuos de alimentos, desechos municipales, entre otros (Hughes & Qureshi, 2014). Sobre todo, se ha prestado gran atención en el uso del estiércol como una solución bastante significativa en cuanto a la conversión de residuos en energía (Skorek-Osikowska, Martín-Gamboa, Iribarren, García-Gusano, & Dufour, 2020).

Los desechos de animales, en muchos casos, se procesan con la motivación principal de mitigar el problema acumulación de los mismos y de los olores antes de la generación de energía. Además, debido a las regulaciones de cada país sobre la contaminación del suelo, del agua superficial y subterránea y de la calidad del aire, se están empezando a aplicar medidas de manejo correcto de estos desechos (Hurstboiler, 2020).

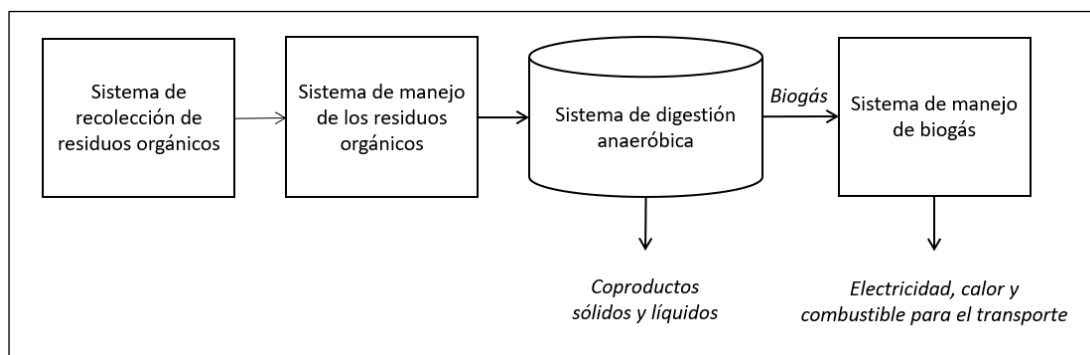
Las tecnologías de conversión más aplicadas para el tratamiento de la biomasa son el compostaje, la combustión y la digestión anaeróbica (Hurstboiler, 2020). Siendo esta última en la cual, mediante condiciones especiales y microorganismos naturales, se logra generar calor, electricidad y combustible de transporte (Zongliu, 2017).

### **2.2.3.2. Digestión Anaeróbica**

La digestión anaeróbica (DA) es la descomposición bacteriana de materiales orgánicos húmedos, estiércol de ganado o biosólidos, en ausencia de oxígeno para la generación de biogás, compuesto por mayormente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (EPA, 2020; Rogoff & Screve, 2019).

Estos procesos pueden darse de manera natural o en ambientes controlados; dependiendo el diseño del sistema y de la materia prima utilizada en el proceso, el contenido de metano en el biogás puede ser entre 55-75 % (Rogoff & Screve, 2019), además de contener trazas de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), amonio ( $\text{NH}_3$ ), entre otros (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019).

El uso del biogás, que es una energía renovable a partir del proceso de DA, además de ser una alternativa de los combustibles fósiles, contribuye a la disminución de los gases de efecto invernadero, como el metano. De ese modo, se ayuda al cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones, establecido por muchos países (Labatut & Pronto, 2018; Liao, Liu, & Hodge, 2014).



**Figura 1.** Etapas para la recuperación del biogás.

**Fuente:** Adaptado de (EPA, 2020).

Como se expone en la Figura 1, para realizar la recuperación de este gas se empieza por el sistema de recolección de los residuos orgánicos, seguido por el sistema de manejo de los residuos orgánicos recolectados, el sistema de digestión anaeróbica y finalmente el sistema de manejo de biogás (EPA, 2020).

#### **A. Sistema de recolección de los residuos orgánicos**

El rendimiento y la calidad del biogás dependen generalmente del tipo de materia prima que se utiliza (Molino, Iovane, & Migliori, 2016) o, en el caso del estiércol, de la especie animal de donde proceda esta materia, así como se muestra en la Tabla 2. Esto es debido, entre varios factores, al peso, el tipo de alimentación y el manejo de los volúmenes de estiércol. El poder calorífico del metano posee un rendimiento de entre 55-70%, lo cual equivale a 35.8 MJ/m<sup>3</sup> (Peña, *et ál.*, 2018a) mientras que el poder calorífico del biometano es 37.5 MJ/m<sup>3</sup> (Engineering ToolBox, 2020).

**Tabla 2.** Rendimiento del metano en el biogás generado a partir del estiércol de diferentes animales

<b>Origen</b>	<b>Peso promedio de la especie, kg</b>	<b>Cantidad de estiércol, kg/día</b>	<b>Porcentaje de metano, %</b>
Porcinos	50	4.5-6.1	65-70
Vacunos	400	25-40	65
Equinos	450	12-16	65
Ovinos	45	2.5	63
Aves	1.5	0.06	60
Caprinos	40	1.5	-

**Fuente:** Peña, *et ál.* (2018a); Adaptación de Hilbert (2011).

Así mismo, en la recolección de los residuos orgánicos debe controlarse que estos se encuentren libres de otros materiales, como antibióticos o químicos de limpieza, que puedan obstruir en los procesos o dañar la actividad bacteriana que ocurre en la DA (EPA, 2020).

### **B. Sistema de manejo de los residuos orgánicos**

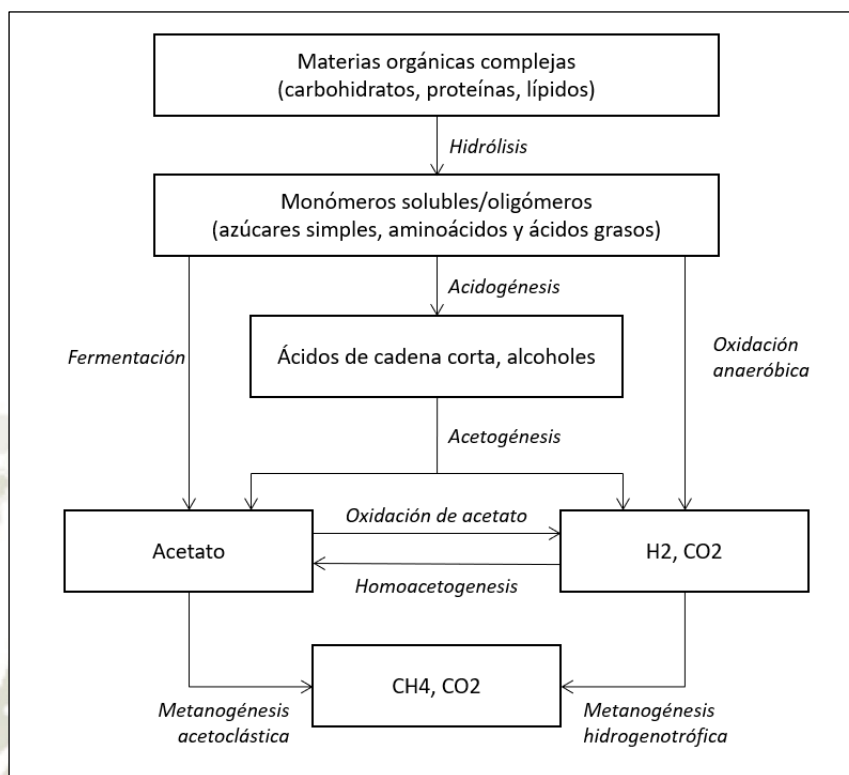
Previo a su ingreso al digestor, contenido total de sólidos de la materia orgánica y demás parámetros deben ser ajustados mediante diferentes técnicas, por ejemplo, el mezclado con agua, la separación de sólidos, el calentado, entre otros (EPA, 2020).

### **C. Sistema de digestión anaeróbica**

En la actualidad, existen muchos tipos de digestores y diferentes tecnologías disponibles, por lo que el tamaño de las plantas de donde se realiza la digestión anaeróbica puede variar desde un pequeño sistema doméstico hasta grandes plantas a nivel industrial, en ambos casos, el tamaño del digestor influye en la logística, y viceversa (Molino, Iovane, & Migliori, 2016).

El proceso de DA se lleva a cabo en tres etapas: la descomposición del material orgánico por bacterias en moléculas, la conversión de la materia descompuesta en

ácidos orgánicos y la conversión de esos ácidos en gas metano (Rogoff & Screve, 2019).



**Figura 2.** Reacciones bioquímicas interdependientes en la digestión anaeróbica.

Fuente: Adaptado de Nguyen *et ál.* (2019)

La conversión de la materia descompuesta involucra reacciones bioquímicas interdependientes divididas en las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, expuestas en la Figura 2. Primero, se da la hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos como los carbohidratos, proteínas y lípidos en productos simples y solubles como los azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos, respectivamente. Luego, en la acidogénesis, ocurre la conversión de los productos solubles simples en ácidos grasos de cadena corta o AGV, hidrógeno (H<sub>2</sub>), CO<sub>2</sub>, ácidos lácticos, etanol, entre otros. Seguidamente, ocurre la acetogénesis que es la oxidación anaeróbica de los AGV en ácido acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Finalmente, durante la metanogénesis, el acetato, el H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son convertidos en CH<sub>4</sub> (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019).

Desde el punto de vista técnico, la estabilidad y rendimiento del proceso depende del control de diferentes parámetros importantes, como la temperatura, el pH, los nutrientes, los ácidos grasos volátiles (AGV), los ácidos grasos de cadena larga, el amoníaco, la tasa de carga orgánica, el tiempo de retención hidráulica, entre otros (Labatut & Pronto, 2018).

Existen diferentes configuraciones de reactores de digestión anaeróbica que, según Nguyen *et ál.* (2019), se clasifican en reactores anaeróbicos de crecimiento suspendido, de crecimiento adjunto, de estado sólido y doméstico, como se detalla en la Tabla 3, siendo la primera la configuración más común, donde microorganismos y sustratos se encuentran suspendidos en el reactor.

En dicha configuración se incluyen el reactor continuo de tanque agitado (CSTR), el reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB), el reactor de contacto anaeróbico (ACR), el reactor discontinuo secuencial (ASBR) y el reactor anaeróbico desconcertado (ABR). Siendo la configuración CSTR es la más usada entre todas debido a su operación y diseño simple (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019).

**Tabla 3.** Clasificación de diferentes las configuraciones de digestión anaeróbica

Configuración de reactores	Tipos de reactores
Reactores anaeróbicos de crecimiento suspendido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor continuo de tanque agitado (CSTR)</li> <li>- Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)</li> <li>- Reactor de contacto anaeróbico (ACR)</li> <li>- Reactor discontinuo secuencial (ASBR)</li> <li>- Reactor anaeróbico desconcertado (ABR)</li> </ul>
Reactores anaeróbicos de crecimiento adjunto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro anaeróbico (AF)</li> <li>- Reactor de lecho expandido (EBR)</li> <li>- Reactor de lecho fluidizado (FRB)</li> </ul>
Reactores anaeróbicos de	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Digestor tipo Batch</li> </ul>

---

estado sólido	- Digestor continuo
Reactores anaeróbicos	- Digestor de domo fijo
doméstico	- Digestor de tambor flotante

---

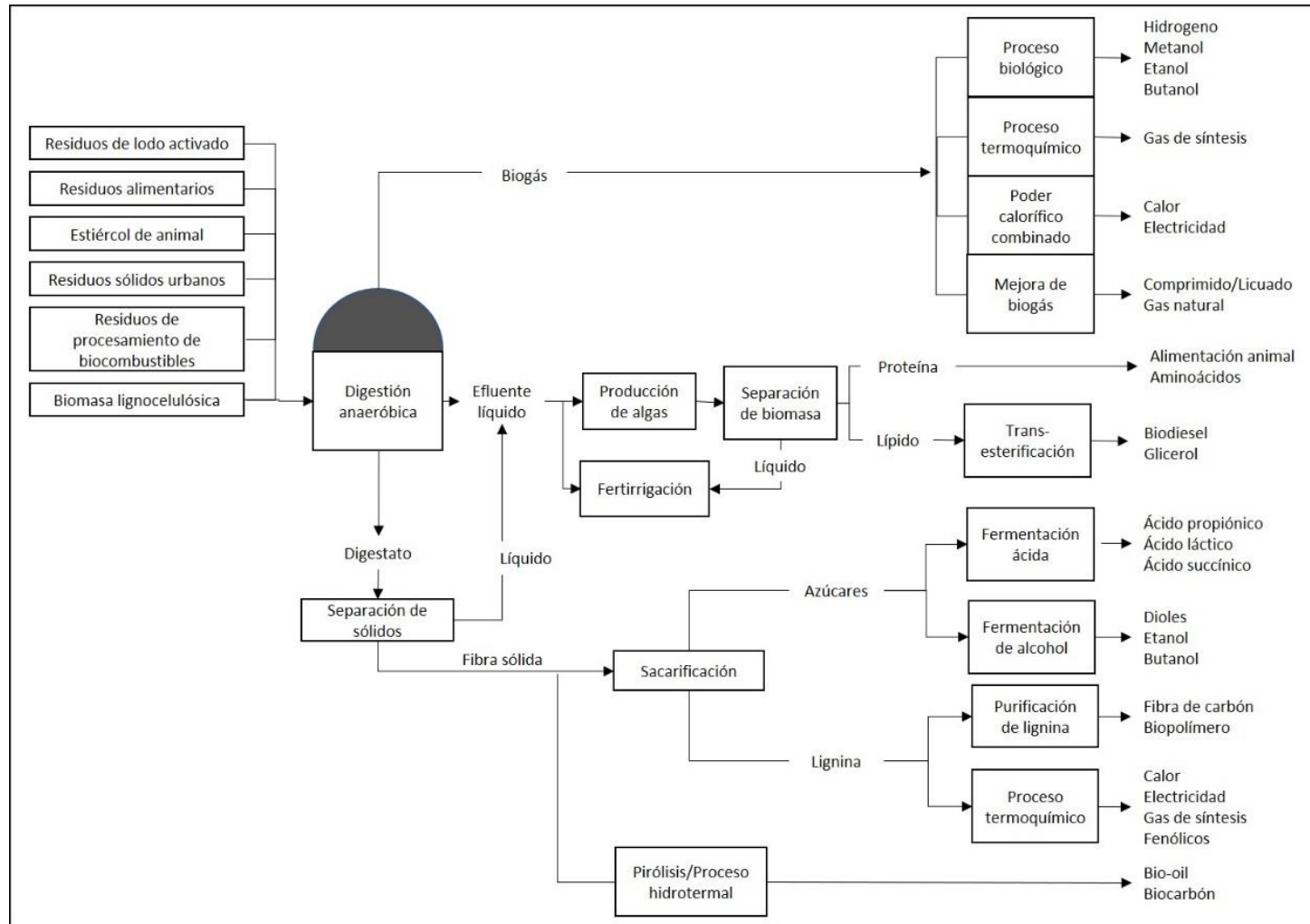
**Fuente:** Adaptado de Nguyen *et ál.* (2019)

#### **D. Sistema de manejo de biogás**

El biogás resultante pasa hacia un sistema de tratamiento de gas, en la mayoría de los casos, para la eliminación de la humedad antes de ser combustionado. No obstante, si el biogás contiene altas concentraciones de azufre, se elimina el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) para evitar la corrosión de los dispositivos donde se combustione el gas (EPA, 2020).

Dependiendo de los distintos tratamientos a los que se somete el biogás, este puede ser utilizado en electricidad, calor (Tyagi & Lo, 2016) o como combustible para el transporte (Barba, Dyckmans, Förster, & Schnekenburger, 2017; Yanga, Ge, Wan, Yu, & Lia, 2014). Del mismo modo, en el caso de existir un exceso de producción de biogás y si el objetivo principal de la planta fue únicamente la eliminación de desechos y olores, el gas procede a eliminarse mediante antorchas (EPA, 2020).

Según lo expuesto, en la Figura 3 se presenta el sistema de manejo del biogás y coproductos, demostrando que después de ser sometidos a diversos tratamientos, los coproductos en estado sólido como líquido, pueden ser utilizados como abonos, fertilizantes, además de otras aplicaciones emergentes, reduciendo así la utilización de químicos comerciales que muchas veces impactan negativamente en el ambiente (Sawatdeenarunat, *et ál.*, 2016).



**Figura 3.** Sistema de manejo del biogás y coproductos

**Fuente:** Adaptado de Sawatdeenarunat *et ál.* (2016)

El biogás que es utilizado como combustible para el transporte debe pasar previamente por un proceso de actualización o mejora, donde alcanza el  $> 95 \%$  de  $\text{CH}_4$  en su composición, de tal manera pasa a llamarse biogás actualizado o biometano (Peña, *et ál.*, 2018a; Beil & Beyrich, 2013).

#### 2.2.4. Biometano

El biometano es un producto energético obtenido a partir de la digestión anaeróbica y es considerado un combustible fácil y flexible de almacenar que puede ser usado en vehículos diseñados para el gas natural sin la necesidad de cambiar la configuración (Urban, 2013). Este combustible posee una menor propiedad corrosiva que el biogás, por lo que es deseable almacenarlo para su uso tanto dentro como fuera de la planta (Bhatia, 2014).

Económicamente, la producción de biometano como combustible para el transporte es costosa cuando se espera una calidad similar a la del gas natural. De hecho, este es el más adverso competidor del biometano, especialmente por fluctuaciones en los precios de venta (Svensson, 2013).

Para la conversión de biogás a biometano y su posterior uso directo como combustible para vehículos o en la inyección en las redes de gas natural, se necesita la aplicación de técnicas de purificación y actualización el biogás crudo, donde la purificación separa los compuestos gaseosos no deseados y la actualización separa el  $\text{CO}_2$  (Beil & Beyrich, 2013).

Aunque la producción y uso del biometano industrial en cualquier sector en el país representa una buena oportunidad, este debe ser justificado desde una perspectiva ambiental, debido a que implica un consumo de energía adicional y emisiones con respecto a otros combustibles ya establecidos (Ravina & Genon, 2015).



#### 2.2.4.1. Técnicas de purificación y mejora

Según Beil & Beyrich (2013), de quienes se basa gran parte de esta sección, para llevar a cabo la purificación del biogás combinada con la actualización de este, se debe tener en cuenta el origen y composición del crudo de biogás, además de la tecnología de actualización que se aplicará posteriormente. Primero, debido a que el biogás que sale del digestor está saturado de vapor de agua, se aplica la remoción de la humedad y el secado, para evitar interrupciones en procesos siguientes. Luego, sigue la desulfuración, donde se remueve el  $H_2S$  para evitar la corrosión de los equipos de la planta y alcanzar la calidad deseada de biometano como combustible para el transporte.

En cuanto a las principales tecnologías de actualización de biogás, con las cuales se busca la eliminación de las impurezas que, en su mayoría, es el  $CO_2$ , se encuentran los métodos físicos, químicos y biológicos (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019), los cuales, según Beil & Beyrich (2013), se agrupan en adsorción, absorción, permeación y mejora criogénica. Siendo las tecnologías más usadas la de adsorción por oscilación de presiones, depuración con agua, absorción física, absorción química, separación por membrana en alta presión y mejora criogénica.

Primero, la adsorción por oscilación o cambio de presión (PSA), es una tecnología adsorbente, lo que significa que los adsorbentes, como la zeolita, el carbón activado o los tamices moleculares de carbono retienen a los adsorbatos o, en este caso, a las impurezas gaseosas como el  $CO_2$  u otras, como el  $H_2S$ ,  $NH_3$  y  $H_2O$ , en condiciones de alta presión. El gas residual con presencia de azufre pasa a tratamiento, en general, en plantas a gran escala. Las concentraciones finales de metano resultan mayores al 96 % (Beil & Beyrich, 2013).

Por otro lado, la depuración con agua o “*water scrubber*”, en inglés, es una tecnología de absorción que implica la disolución de una sustancia gaseosa en un líquido, en este caso la disolución del  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$  en agua. El biogás crudo ingresa a la columna de absorción por la parte inferior y sale por la superior, el agua

fluye saturando a la sustancia gaseosa en dirección contraria. Luego, esta pasa a la columna de desorción donde se sopla aire para su desgasificación. El gas residual contiene  $\text{CH}_4$  que, por lo general, pasa hacia otro tratamiento (Beil & Beyrich, 2013).

Así mismo, la absorción física por solventes orgánicos, además de ser usada mayormente para la eliminación de gases ácidos del gas natural, hace posible la absorción paralela de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  del biogás crudo en la columna de lavado. Las concentraciones finales de metano en el biogás están entre 93-98 % (Beil & Beyrich, 2013).

La absorción química por solventes orgánicos, llamada también lavado por anima, es donde el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  teóricamente están unidos a un agente de lavado orgánico y se pueden utilizar distintas soluciones para lograr que el  $\text{CO}_2$  se separe. Las concentraciones finales de metano alcanzan el 99.9 % (Beil & Beyrich, 2013).

Adicionalmente, considerado un método químico, se realiza la conversión de  $\text{H}_2\text{S}$  presente en el biogás en sulfuro de hierro ( $\text{Fe}_2\text{S}_3$ ) mediante el uso de óxido de hierro hidratado ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Para la eliminación de  $\text{CO}_2$  se utiliza  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como una solución alcalina para la formación de bicarbonato [ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ] (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019).

Luego, en la separación por membrana, donde se utiliza la diferencia del tamaño molecular de los gases para su eliminación (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarunat, Surendra, & KumarKhanal, 2019), se pueden diferenciar tres flujos que conforman el sistema: la alimentación, que es el biogás crudo, el permeado, que es el gas con  $\text{CO}_2$  y el gas retenido, que es el gas enriquecido con  $\text{CH}_4$ . Las concentraciones finales de metano oscilan entre el 85-99 % (Beil & Beyrich, 2013).

En la mejora criogénica se utilizan diferentes puntos de ebullición del  $\text{CH}_4$ , así como puntos de sublimación del  $\text{CO}_2$ , así como otros componentes del gas para su separación del biogás crudo (Beil & Beyrich, 2013)

Adicionalmente, se considera también, como método biológico, a la oxidación biológica del sulfuro en fases acuosa y gaseosa mediante el uso de bacterias oxidantes de sulfuro, como *Thiomicrospira*, *Sulfolobus*, *Thiobacillus*, entre otras (Nguyen, Nitayavardhana, Sawatdeenarat, Surendra, & KumarKhanal, 2019).

Finalmente, surge el método bioelectroquímico o electro-metanogénesis que, según Buitrón, Cardeña & Arcila (2019), acompaña a la DA para aumentar la pureza y rendimiento del metano, con dos rutas para su producción: donde en la primera se reacciona el CO<sub>2</sub> con protones y electrones para su reducción en CH<sub>4</sub>, y en la segunda, se mejora la tasa de producción y rendimiento mediante microorganismos hidrogenotróficos.

#### **2.2.4.2. Almacenamiento del biometano**

El biometano puede ser almacenado como biometano comprimido (BMC), para el ahorro de espacio, en cilindros de acero utilizados normalmente para el almacenamiento de otros gases comerciales. Debido a que, en su mayoría, los lugares de producción de biometano son granjas, es poco probable que exista una demanda de vehículos para todo el biometano que se produce, por lo que suele transportarse a estaciones de reabastecimiento de combustible (Bhatia, 2014).

#### **2.2.4.3. Producción de biometano en el Perú**

En el Perú, la producción y uso del biogás y, por lo tanto, del biometano, es reducida en comparación a países europeos, como Alemania y Suecia (Peña G. , 2017b; Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016), o parte de Norteamérica (Beil & Beyrich, 2013). Esto se debe, en principio, al desconocimiento de sus usos aplicaciones fuente de energía, además los beneficios económicos y ambientales que conlleva, a diferencia de alternativas fósiles. Entre los pocos productores de biogás en el Perú, la mayoría basan sus procesos en la generación de calor para cocinas tradicionales y/o artesanales (Quispe J. , 2019).

Por ejemplo, entre las experiencias que tuvieron éxito en el uso de la tecnología de biodigestores destaca la granja de pollos La Calera, considerada la primera en el Perú en gestionar los desechos mediante digestores con una producción óptima de hasta 7000 m<sup>3</sup> de biogás al día y uso final en calefacción (Ministerio de Agricultura, 2011; Flores M. , 2011).

En Arequipa, en el año 2014 se puso en marcha la planta de biogás de la Universidad Católica de Santa María en Majes, Arequipa, como parte de un proyecto conjunto entre esta universidad, el instituto de Investigación y Desarrollo del Sur (Arequipa), la empresa Kepler Ingeniería y Ecogestión S. L. (España) y la empresa Snow Leopard (Alemania). Se trata de una planta piloto de biogás diseñada y construida en Burgos, España, y trasladada al Perú con fines de enseñanza e investigación (Diario El Búho, 2014).

Se trata de una planta de alto rendimiento con temperatura controlada o HPTC por sus siglas en inglés, que utiliza tecnología de proyectos Snow Leopard para la producción de biogás, calor y electricidad (Peña, *et ál.*, 2018a). Con este tipo de tecnología es posible una alta producción de biogás, debido a que está diseñada para que sea adaptada a la demanda, condiciones y biomasa disponible en zonas rurales. A la vez, se considera que la aplicación de la tecnología HPTC puede generar oportunidades laborales e ingresos a los agricultores y población local (Snow Leopard web, 2020).

#### **2.2.4.4. Proyecto BIOMETRANS**

A partir del año 2017, se inició la implementación del laboratorio de presurizado para la actualización del biogás en el fundo La Católica. A raíz de esto, se han desarrollado diferentes proyectos que tomaron como unidad de estudio al biometano producido en dicho laboratorio.

Entre ellos, el proyecto más resaltante fue en el que se produjo biometano presurizado a partir de estiércol de cerdo, para su uso en el sector agrícola como reemplazo de los combustibles fósiles, donde el biogás obtenido con un 85 % de

concentración de CH<sub>4</sub>, 9 % de CO<sub>2</sub> y un 1 % de H<sub>2</sub>S. Este fue aplicado en diferentes equipos con los que se desarrollan actividades agrícolas en el fundo, entre ellos un tractor y un auto Volkswagen (Peña, *et ál.*, 2018a).

Actualmente se viene desarrollando la segunda etapa de dicho proyecto, bajo el título de “Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa (Biometrans)”, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (Fondecyt) y por la Universidad Católica de Santa María (UCSM), bajo el Convenio Nro. 111-2017, el cual busca la aplicación del biometano a partir de biomasa, en el sector transporte.

El proyecto Biometrans es trabajado por una red de investigadores de universidades e instituciones de la Región Iberoamericana para la investigación de tecnologías diferentes para el pretratamiento de la biomasa y, sobre todo, para el refinado del biogás, evaluando su potencial impacto ambiental, social y económico, mediante un modelo de comercialización del biometano (Peña G. , 2017b).

### **2.2.5. Impactos Ambientales**

El impacto ambiental se trata de cualquier alteración positiva o negativa en los componentes del ambiente. Para identificar y evaluar estos impactos se requieren elaborados análisis cualitativos y cuantitativos, además de estrategias de manejo ambiental basándose en medidas preventivas, correctivas, de mitigación y compensación (Ley N° 27446, 2011).

#### **2.2.5.1. Impactos Ambientales de combustibles**

Los procesos de extracción, transporte y uso de los combustibles, sobre todo los de origen fósil, resultan tener gran impacto sobre el ambiente, causando daños a los cuerpos ambientales como el agua, suelo y aire, cambios en el paisaje, entre otros.

En la extracción de los combustibles fósiles, se produce la remoción de sólidos provocando que el agua deje de ser apta para el consumo humano. Así mismo, tanto

la perforación de pozos como la construcción de la infraestructura necesaria provocan la alteración de grandes extensiones de suelo, afectando de igual forma a la fauna y flora circundante debido al ruido y a la fragmentación de hábitats (UCS, 2016).

Así mismo, las emisiones generadas en el proceso de extracción contienen importantes cantidades de metano, el cual, aunque pueda ser capturado para su uso como fuente de energía, muchas plantas no recurren a este recurso, contribuyendo al calentamiento global con dichas emisiones (UCS, 2016).

Por otro lado, en la quema o combustión de los combustibles fósiles se emiten gases que pueden ser muy perjudiciales para el ambiente, estos son el monóxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y las partículas de cenizas y hollín, y sus principales efectos son el smog, el efecto invernadero y la lluvia ácida. Ligado estrechamente a la contaminación se encuentra el calentamiento global, refiriéndose al aumento de la temperatura en la tierra por las elevadas concentraciones de gases contaminantes en la atmósfera, considerado actualmente una amenaza para la vida (IPCC, 2014).

A pesar de estar ocurriendo este fenómeno desde hace millones de años, la tendencia actual es particularmente notable ya que posee una muy alta probabilidad de ser provocada por la actividad humana desde mediados del siglo XX, así como su avance a un ritmo sin precedentes durante las últimas décadas (IPCC, 2015). Adicionalmente, en el caso de que las emisiones de CO<sub>2</sub> no sean reducidas, la tierra podría experimentar un aumento de hasta 2 grados Celsius en los próximos 11 o 20 años, lo cual ocasionaría consecuencias alarmantes (IPCC, 2018).

Así mismo, el cambio climático se refiere a la alteración global del clima en el planeta, y este será inevitable en cuanto no exista una reducción drástica en las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en la combustión de combustibles fósiles. Sin embargo, pocos países han llevado a cabo algún tipo de gestión para la implementación de tecnologías con baja emisión de carbono (Covert, Greenstone, & Knittel, 2016).

## **2.2.6. Gestión de Impacto Ambiental**

### **2.2.6.1. Instrumentos Gestión Ambiental**

Los instrumentos de gestión ambiental se tratan de herramientas o mecanismos orientados a la ejecución de la política ambiental teniendo como base a los principios de la Ley General del Ambiente (OEFA, 2016), es decir, permiten tanto la contribución a la protección del ambiente, como la atenuación, prevención y mejora de los problemas ambientales, mediante diferentes regulaciones, mecanismos o incentivos (SINIA, 2015).

Dichos instrumentos pueden ser de prevención, corrección, control, fiscalización, financiamiento, planificación, información, promoción, participación, entre otros (OEFA, 2016).

La viabilidad económica, social y ambiental de los productos, tecnologías y servicios y la determinación de las opciones más sustentables, se estudia bajo el análisis de los sistemas ambientales (Azapagic & Perdan, 2014).

### **2.2.6.2. Análisis de sistemas ambientales**

El análisis de sistemas ambientales se enfoca en los sistemas para la determinación y evaluación de los impactos de las actividades humanas en el ambiente. Su importancia radica en considerar las interrelaciones entre todos los elementos que componen el sistema, entendiendo que el comportamiento de los sistemas es diferente a los elementos cuando estos se encuentran aislados entre sí. Se reconoce como sistema a algún producto, tecnología, servicio, organización, proyecto, entre otros (Azapagic, 2018).

Los métodos de análisis de sistemas ambientales se diferencian por los aspectos que involucran, como el enfoque, la aplicación, el alcance, además de los aspectos de sostenibilidad que consideran (Azapagic, 2018), estos métodos son los siguientes:

- Sistemas de gestión ambiental.
- Evaluación de riesgos ambientales.
- Análisis ambiental de entrada-salida.
- Análisis de flujo de materiales y sustancias.
- Análisis energético y de exergía.
- Análisis de costo-beneficio.
- Análisis de ciclo de vida.
- Análisis de ciclo de vida económico.
- Análisis de ciclo de vida social.

### 2.2.7. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) tuvo origen en la década de 1960 a raíz de la preocupación sobre las limitaciones de recursos energéticos y materias primas, y su proyección y suministro para el futuro. En 1969 se inició el primer estudio interno de ACV para la empresa Coca-Cola, sentándose las bases para los métodos actuales en Estados Unidos, donde se realizó la comparación entre los diferentes envases para el conocimiento de sus emisiones y el consumo de recursos naturales en sus procesos de fabricación. No fue sino hasta 1991 que, debido al uso inadecuado de la herramienta para la promoción de productos de manera engañosa, se fortaleció la necesidad de estandarizar la metodología, la cual se hizo mediante la Organización Internacional de Normalización (ISO) en el 2002 y tuvo una actualización en el 2006 (SAIC, 2006).

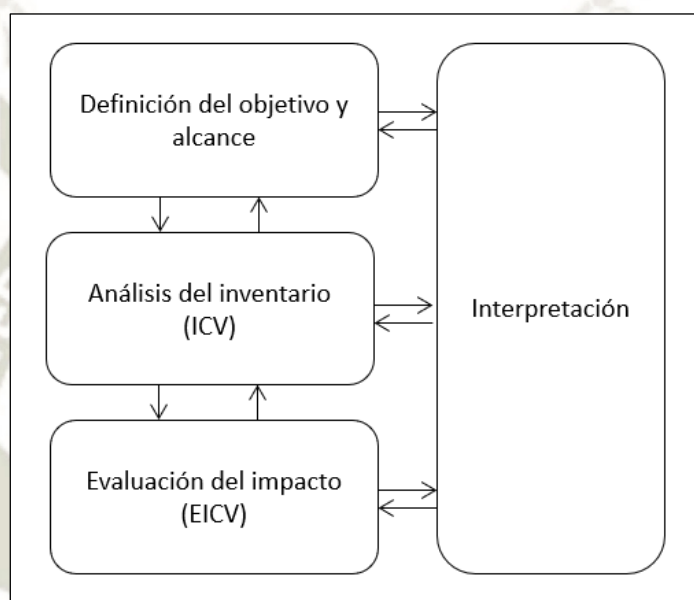
Esta herramienta que se encarga del estudio de los aspectos e impactos ambientales potenciales que se encuentran a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso, actividad o servicio, teniendo en cuenta las entradas y salidas del sistema evaluado (ISO 14040:2006, 2006a).

El ciclo de vida comprende desde la obtención de la materia prima, la transformación, los procesos de la producción, los diferentes usos, el tratamiento final, el reciclado y la disposición final (ISO 14040:2006, 2006a).



### 2.2.7.1. Metodología del ACV

Según la normativa ISO mencionada anteriormente, el estudio de ACV incluye cuatro fases principales, como la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario de ciclo de vida (ICV), la evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) y la interpretación, siendo esta última trabajada paralelamente a las demás fases, como se indica en la Figura 4.



**Figura 4.** Fases del análisis de ciclo de vida

**Fuente:** (ISO 14040:2006, 2006a)

### 2.2.7.2. Definición del objetivo y alcance

En el objetivo se establecen las razones por las que se lleva a cabo el estudio, la aplicación que tendrá, a quien se comunicarán los resultados y si estos se utilizarán en afirmaciones comparativas. En el alcance, se debe tomar en cuenta la definición de lo siguiente:

- El sistema del producto o los productos a estudiar y sus funciones,
- Los límites de estos sistemas,
- La unidad funcional,

- Las categorías de impacto ambiental y metodologías de evaluación de impactos utilizados,
- Las suposiciones, limitaciones, la calidad de los datos recopilados para el estudio.

Cuando se trata de un estudio comparativo entre sistemas, se deben evaluar las similitudes entre estos antes de la interpretación de los resultados. En el alcance se determina la manera en la que los sistemas serán comparados, además de considerarse la misma unidad funcional, metodologías, límites del sistema, calidad de datos y evaluación (ISO 14044:2006, 2006b).

La unidad funcional debe tener coherencia con el objetivo y el alcance establecidos en el estudio. Uno de los principales propósitos de esta unidad es proporcionar una referencia cuantitativa para normalizar las entradas y salidas del sistema. Esta referencia es necesaria para una comparación correcta de los sistemas sobre una base común (ISO 14044:2006, 2006b).

Los límites del sistema, determinan los procesos unitarios que serán incluidos en el estudio de ACV, ya que permiten la producción del producto estudiado. Dichos procesos deben estar alineados con el objetivo del estudio. A su vez, debe definirse el nivel de detalle aplicado al estudio, los criterios para la delimitación, así como mencionar si se realizó la omisión de algún proceso, etapa o producto de entrada o salida, lo cual puede realizarse siempre y cuando la información omitida no tenga mucha repercusión en los resultados. (ISO 14044:2006, 2006b).

Adicionalmente, para la definición de los límites es importante plasmar el sistema en un diagrama de flujo, donde se indicarán los procesos e interrelaciones. Así mismo, se determina el límite geográfico de las actividades estudiadas, debido a que pueden verse afectadas por las condiciones locales (Universitat Politècnica de Catalunya, 2015).

### 2.2.7.3. Análisis de inventario de ciclo de vida

El análisis del inventario de ciclo de vida (AICV) empieza por una recopilación los datos de entrada y salida, así como el balance de materia y energía del sistema que se estudia. Siendo los datos necesarios los siguientes:

- Entradas: Materias primas, energía eléctrica, calor, infraestructura.
- Salidas: Productos, coproductos, residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertimientos.

Este análisis es un proceso contante y repetitivo, los datos pueden ser actualizados durante el avance del estudio, ya que estos pueden ser redefinidos con mayor exactitud (Universitat Politècnica de Catalunya, 2015).

Una vez recolectados los datos, se requiere realizar la validación de estos, así como la formulación de la relación entre los datos y los procesos u operaciones unitarias de los sistemas a estudiar, así como con la unidad funcional (Cuéllar, 2016; ISO 14044:2006, 2006b).

### 2.2.7.4. Evaluación de impacto de ciclo de vida

La evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) se trata de un procedimiento cualitativo y cuantitativo donde se caracterizan y evalúan los efectos de los impactos identificados en el inventario (Universitat Politècnica de Catalunya, 2015).

La EICV consta de siete actividades (ISO 14040:2006, 2006a), siendo las tres primeras obligatorias y el resto opcionales, estas son: clasificación, caracterización, valoración, normalización, agrupación, ponderación y análisis de calidad de los datos. En la clasificación se trabaja de forma cuantitativa, donde las entradas y salidas del sistema se designan a las categorías de impactos esperados sobre el entono. Estas categorías pueden ser ambientales, económicas y sociales. En la caracterización, se trabaja de forma cuantitativa, donde se evalúa el aporte de cada entrada y salida en su categoría de impacto y se sumen los aportes de cada categoría.

Finalmente, en la valoración, se trabaja tanto de forma cualitativa como cuantitativa, considerando la importancia de los impactos generados al ambiente. Se pueden incluir valoraciones éticas o socioeconómicas (Wiloso & Heijungs, 2013).

#### **2.2.7.5. Herramientas para el cálculo**

Para el procesamiento de los datos del inventario de ciclo de vida se pueden utilizar diferentes herramientas de software, los cuales se encuentran disponibles de manera comercial, que implica el uso de alguna licencia de activación para su uso, o gratuita.

Según ello, en el Anexo 3, se hace una comparativa de los softwares de ACV más utilizados, ya sean comerciales, como SimaPro, GaBi, Regis y Umberto (Tabla 16), o gratuitos, como OpenLCA, CMLCA, Gemis y Greet (Tabla 17), haciendo referencia a los sectores y región geográfica donde pueden ser aplicados, el tipo de análisis que desarrolla, la flexibilidad de adaptación a las condiciones locales, la inclusión de bases de datos, la facilidad de importación y explotación de datos, la aplicación en estudios de combustibles en el Perú y demás detalles del software.

Entre los más usados en estudios referentes al sector transporte, se encuentra el software OpenLCA y SimaPro. El primero es de uso gratuito, fácil de usar y de rápido cálculo de la evaluación de sostenibilidad y evaluación de ciclo de vida. Permite el cálculo del costo de ciclo de vida y la evaluación social integrada (OpenLCA web, 2020).

El software SimaPro es de uso comercial y se trata de una herramienta para la recopilación, análisis y monitoreo de datos, aplicados a la elaboración de informes de sostenibilidad, la huella de carbono, la huella hídrica y la medición de los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de los productos o servicios que ofrece alguna empresa (SimaPro, 2020).

Así mismo, el software GaBi es mundialmente aplicado en diferentes sectores sin prioridad específica en de transporte, como los mencionados anteriormente, pero es igual de importante. Este programa cuyo nombre significa “balance holístico” en

alemán, y permite evaluar las materias primas y los procesos del ciclo de vida de un producto o servicio, realizar una determinación de riesgos estratégicos y potenciales de optimización ambiental, fortalecer la necesidad de acción ecológica, reconocer las medidas de mayor eficiencia, así como fomentar la innovación ambiental.

Dependiendo del software, la base de datos se encuentra o no integrada. Entre todas, la que se considera más completa y por lo tanto es más usada, es la base de datos Ecoinvent, la cual, se encuentra integrada a los softwares SimaPro y GaBi. Esta base proporciona acceso a los procesos unitarios, así como a inventarios de ciclo de vida de múltiples áreas industriales, como la de energía, agricultura, transporte, construcción, maderera, así como productos químicos, biomateriales y tratamiento de aguas y residuos sólidos (Ecoinvent, 2019).

#### **2.2.7.6. Metodologías de evaluación de impacto**

Según Cuéllar (2016), las distintas metodologías de EICV pueden ser agrupadas en función al objetivo final del estudio en metodologías de impactos con efecto intermedio y con efecto final. Las primeras, o también llamadas “*midpoint*”, definen un perfil ambiental a través de la cuantificación de efectos indirectos o intermedios sobre el ser humano, en diferentes categorías del sistema estudiado. Mientras que, las metodologías de impactos con efecto final o llamadas también “*endpoint*”, analizan los impactos generados directamente en el ambiente y que atañen directamente a la sociedad.

Los principales métodos de evaluación de impacto presentes en el software SimaPro, son los siguientes (SimaPro, 2020):

- CML-IA baseline
- CML-IA non-baseline
- Ecological Scarcity 2013
- EDIP 2003
- EPD (2013)
- EPD 2000

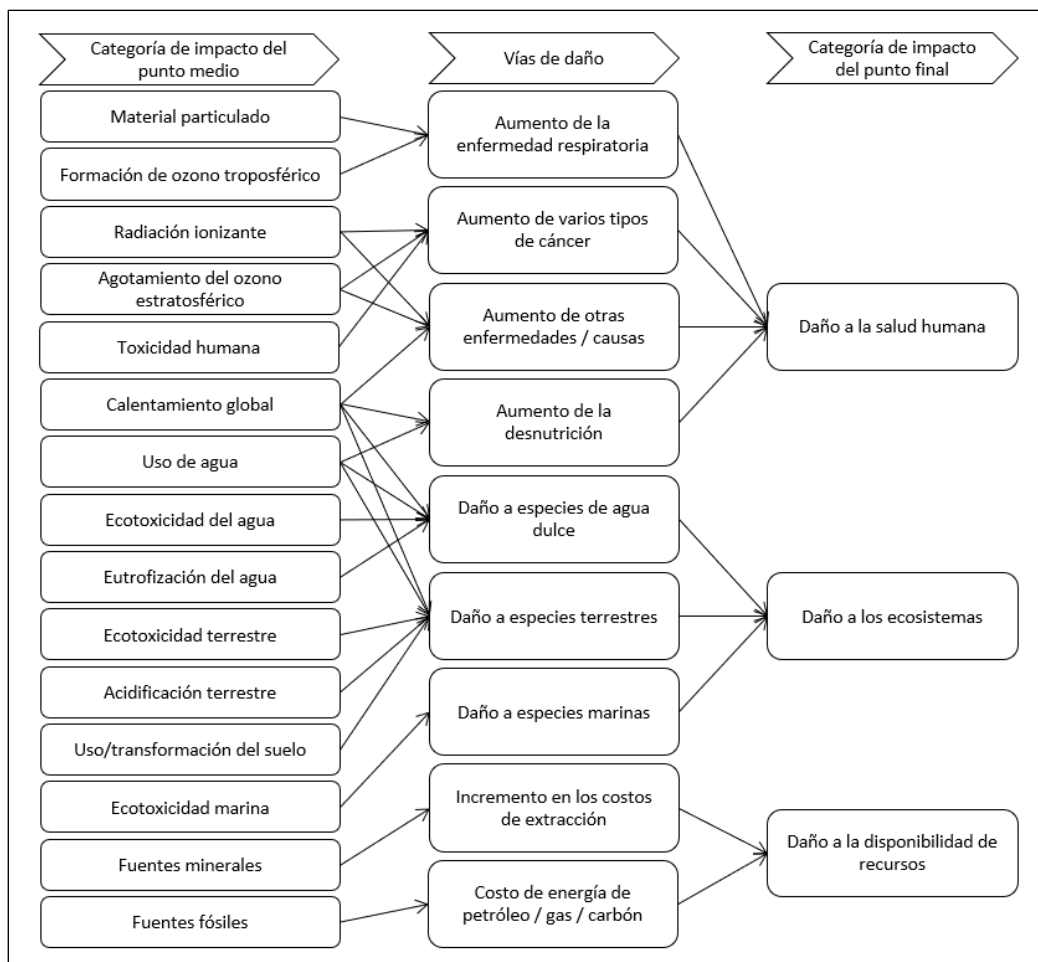
- ILCD 2011 Midpoint+
- IMPACT 2002+
- ReCiPe Endpoint (E), (H) & (I)
- ReCiPe Midpoint (E), (H) & (I)

#### 2.2.7.7. Categorías de impacto

En la EICV se traducen las emisiones y el uso de recursos en diversos puntajes de impacto ambiental, mediante factores de caracterización, los cuales son derivados en categorías de impacto de punto medio o punto final. Por ejemplo, el método ReCiPe permite el uso de 18 categorías de impacto de punto medio y de 3 de punto final (National Institute for Public Health and the Environment, 2018).

Las categorías de impacto de punto medio se basan en problemas ambientales únicos como son el cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, la acidificación terrestre, eutrofización del agua, eutrofización marina, toxicidad humana, material particulado, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad del agua, radiación ionizante, ocupación de tierra por agricultura y por zonas urbanas, agotamiento del agua, del metal y de sustancias fósiles. Los de punto final, se dividen en tres niveles de agregación, como son el efecto sobre la salud humana, la biodiversidad y la escasez de recursos (SimaPro, 2020).

En la Figura 5 se muestra la relación entre las categorías de impacto de punto medio, las vías de impacto y los impactos de punto final en la metodología ReCiPe.



**Figura 5.** Categorías de impacto en la metodología ReCiPe

**Fuente:** (National Institute for Public Health and the Environment, 2018)

### 2.2.7.8. Interpretación de resultados

La interpretación del ciclo de vida es la fase final del procedimiento, donde se resumen y discuten los resultados del ICV y de la EICV. Finalmente, se desarrollan conclusiones y recomendaciones de acuerdo con el objetivo y el alcance del estudio (ISO 14040:2006, 2006a).

### 2.2.8. Análisis de ciclo de vida en combustibles

En el caso de un estudio de ACV en combustibles, la unidad funcional puede establecerse en unidades de masa, volumen de producción, energía producida o distancia que ha sido recorrida por un vehículo. En la Tabla 4 se detalla la información sobre estudios recientes de ACV aplicados a combustibles, como la

unidad funcional, los límites del sistema, software, métodos, categorías de impacto, entre otros.

En cuanto a los límites de estudio, estos pueden clasificarse en utilizando los siguientes tres enfoques (Kollamthodi, *et ál.*, 2016): El primero se trata de las emisiones del pozo al tanque o “*well to tank*” (WTT), conocidas como las emisiones indirectas o que son emitidas de las actividades previas al uso del combustible, como en la extracción, refinación, purificación del biogás o transporte de las materias primas. El segundo, son las emisiones del tanque a la rueda o “*tank to wheel*” (TTW), conocidas como las que se emiten en el uso directo del combustible en el vehículo. El tercero, las emisiones del pozo a la rueda o “*well to wheel*” (WTW), son las que se emiten en el ciclo de vida completo del combustible, en otras palabras, desde la extracción de la materia prima hasta su combustión en un vehículo o destino final.

Así mismo, en la Tabla 4, se presentan los distintos enfoques utilizados para el desarrollo de estudios de ACV aplicado en combustibles.

En el Perú, el ACV en combustibles o en el sector transporte ha sido poco estudiado. Sobresale el estudio de Quispe *et ál.* (2009) quienes compararon los siguientes biocombustibles: biodiésel y etanol, con los combustibles fósiles: diésel, gasolina y gas natural en función a un kilómetro recorrido en un vehículo, bajo el enfoque del pozo a la rueda, mediante el software SimaPro versión 7.1 y la metodología Eco Indicador 99. Este estudio resultó que, a pesar de que los biocombustibles signifiquen una menor carga ambiental a diferencia de los combustibles fósiles, estos generan mayor impacto en las etapas de producción que en las etapas de conducción del vehículo.

Pese a los avances a nivel nacional, a la fecha, este es el único estudio de ACV de combustibles en el sector transporte realizado en el país con información disponible públicamente. Sin embargo, dada la relevancia y utilidad del método, se evidencia la necesidad y funcionalidad de su aplicación en la identificación de impactos ambientales en el ciclo de vida de combustibles en el Perú.



**Tabla 4.** Estudios recientes de ACV aplicados a combustibles

Estudio	Metodología						Impactos Económicos	Categorías de impacto*													
	Ubicación	Sistema estudiado	UF	Límites del sistema	Software y DB	Método de análisis		EC	AC	EP	GWP	HT	LU	OD	PO	RC	WC	ET	PM	IR	Otras
Florio et ál. (2019)	Italia	Biometano	1 m3	Pozo al tanque	SimaPro, Ecoinvent	ReCiPe Midpoint (H)	No	x	x	x	x		x		x	x					
Ferreira et ál. (2019)	Brasil	Uso final del Biometano	1 MJ	Tanque a la rueda	OpenLCA, Ecoinvent	Métodos predeterminados	No		x	x	x			x							
Ardolino & Arena (2019)	Italia	Biometano	1 MW	Pozo al tanque	SimaPro, Ecoinvent	Impact 2002+	No	x			x										
Lyng & Brekke (2019)	Noruega	Biometano, gas natural, diésel, biodiésel, electricidad	1 km	Pozo a la rueda	SimaPro, Ecoinvent	CMLiab v3.05, IPCC (GWP)	No		x	x	x		x	x							
Koido et ál. (2018)	Tailandia	Biometano	1 MJ	Pozo al tanque	MiLCA, IDEA	No menciona	Sí	x			x										
Bicer & Dincer (2018)	Canadá	Vehículos con diferentes combustibles	1 km	Pozo a la rueda	REET, SimaPro	CML	No		x	x	x	x		x				x			Agotamiento abiótico
Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018)	Suecia	Biogás	16,000,000 ton-km	Pozo a la rueda	SimaPro, Ecoinvent	ReCiPe Midpoint (H)	No		x	x	x	x		x	x	x		x	x		
Collet et ál. (2017)	Francia	Biometano	1 MJ	Pozo al tanque	No	Factor de caracterización del IPCC	Sí														Emisiones y consumo de recursos
Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, (2017)	Bélgica	Vehículos con diferentes combustibles	1 km	Pozo a la rueda	No menciona	ReCiPe	No				x	x			x					x	
Sharma & Strezov (2017)	Australia	Diesel, gasolina, GLP, biodiesel, etanol, hidrógeno, celdas de combustible y electricidad	1 MJ	Pozo a la rueda	SimaPro, Ecoinvent &REET Model	ReCiPe Midpoint (H) y ReCiPe Endpoint (H)	Sí			x	x	x	x		x		x	x	x		
Ravina & Genon (2015)	Italia	Biometano	1 ton	Pozo a la rueda	GNU Octave software	Huella de carbono	No														
Morales et ál. (2015)	Chile	Gasolina	1 km	Pozo a la rueda	SimaPro, Ecoinvent	ReCiPe 2008	No		x	x	x	x		x	x		x	x			Agotamiento de minerales y recursos fósiles
Morero, Groppelli & Campanella (2015)	Argentina	Biometano	1 kg	Puerta a la puerta	OpenLCA, Ecoinvent	CML 2001	No		x	x	x	x		x	x		x	x	x		

**Fuente:** Elaboración propia

\*Abreviaturas: UF = Unidad Funcional; DB = Base de datos; EC = Consumo de energía; AC = Acidificación; EP = Eutrofización; GWP = Potencial de Cambio Climático; HT = Toxicidad Humana; LU = Uso de tierras; OD = Agotamiento del ozono; PO = Oxidación fotoquímica; RC = Consumo de recursos; WC = Consumo de agua; ET = Ecotoxicidad; PM = Material particulado; IR = Radiación ionizante

## 2.3. MARCO CONCEPTUAL

Los siguientes términos se relacionan al análisis de ciclo de vida, extraídos de las normativas (ISO 14040:2006, 2006a; ISO 14044:2006, 2006b).

### 2.3.1. Ciclo de vida.

Etapas de un sistema de productos que siguen una secuencia y están interconectadas, empezando por la adquisición de materias primas, procesamiento, hasta su disposición final.

### 2.3.2. Unidad funcional.

Rendimiento medible de un sistema de producto que es usado como unidad de referencia.

### 2.3.3. Flujo de referencia.

Los resultados de los procesos del sistema de un producto requeridos para cumplir la función que es expresada por la unidad funcional.

### 2.3.4. Límites del sistema.

Grupo de criterios o especificaciones sobre los procesos unitarios que forman parte del sistema del producto estudiado.

### 2.3.5. Inventario de ciclo de vida.

El inventario es una de las fases del ACV, donde se compilan y cuantifican las entradas y las salidas del sistema de un producto en todo su ciclo de vida.

### 2.3.6. Evaluación del impacto de ciclo de vida.

Fase del ACV donde se analiza la importancia y magnitud de los impactos ambientales generados a lo largo de todo el ciclo de vida del producto estudiado.

### **2.3.7. Categoría de impacto.**

Problemas ambientales importantes que son asignados a los resultados del ACV. Se cuantifica mediante los indicadores de la categoría de impacto.

### **2.3.8. Interpretación del ciclo de vida.**

Se trata de la fase final del ACV, donde los resultados tanto del análisis del inventario, los de la evaluación del impacto, como de ambos, son evaluados en base al objetivo y alcance del estudio para desarrollar finalmente las conclusiones y recomendaciones.

### **2.3.9. Afirmación comparativa ambiental.**

Exposición de la superioridad o igualdad de productos comparados que cumplen funciones similares.

### **2.3.10. Impacto ambiental.**

El impacto ambiental se trata de cualquier alteración positiva o negativa en los componentes del ambiente (Ley N° 27446, 2011).

### **2.3.11. Evaluación de impacto ambiental.**

La evaluación de impacto ambiental se trata de una herramienta para la toma de decisiones que contribuyan a la administración eficiente de los recursos y a la creación de una economía verde, sobre todo en la etapa de planeación (Perevochtchikova, 2013).

## 2.4. MARCO LEGAL

### 2.4.1. Internacional

#### 2.4.1.1. Protocolo de Kioto

Documento internacional creado para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global, determina que los gases principales son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los gases fluorados, como los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ), siendo muchos de estos emitidos por las actividades en el sector transporte.

#### 2.4.1.2. Objetivos del Desarrollo Sostenible

Entre los diecisiete objetivos del desarrollo sostenible (ODS), adoptados para la protección del planeta tierra, la erradicación de la pobreza y el refuerzo de la prosperidad para las personas como parte de una agenda de desarrollo sostenible, se rescata el once y doce.

En el onceavo objetivo, sobre las ciudades y comunidades humanas resilientes y sostenibles. Donde se resaltan metas referentes a potenciar los esfuerzos para la protección y salvaguarda del patrimonio natural y cultural del mundo, así como la reducción del impacto negativo en el ambiente por parte de las ciudades, sobre todo en la calidad del aire (UN, 2015).

En el doceavo objetivo, sobre la producción y consumo responsable, se busca la gestión racional ecológica de productos químicos y de sus desechos a lo largo de su ciclo de vida, conforme a los convenios y marcos internacionales, además de reducir su emisión o liberación a la atmósfera, al agua y al suelo de manera significativa para la minimización de los efectos adversos en el ambiente y en la salud humana.

### **2.4.1.3.ISO 14040 y 14044 – Análisis de Ciclo de Vida**

En cuanto al Marco Normativo del ACV, el Comité Técnico ISO/TC 207, Gestión Ambiental, Subcomité SC5, elaboró tres normativas con objetivo de regular el uso de la metodología del ACV. A su vez, estas reemplazan a las normativas ISO 14040:1997, ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 y a la ISO 14043:2000 (ISO 14044:2006, 2006b). El Comité Técnico ISO/TC 207/SC5 – Evaluación del Ciclo de Vida, se encarga de normalizar el campo de la evaluación de ciclo de vida y de las herramientas usadas para la gestión ambiental de organizaciones y productos (Bächtold, 2014).

La primera normativa es la ISO 14040:2006, donde se encuentran los principios y el marco de referencia de ACV sin detalles sobre la metodología. La segunda, conocida como ISO 14044:2006, especifica los requisitos y directrices para llevar a cabo el ACV. Finalmente, la tercera es la ISO/TR 14047:2003 y brinda algunos ejemplos habituales al momento de llevar a cabo una evaluación de ACV (Ecointeligencia web, 2016).

## **2.4.2. Nacional**

### **2.4.2.1.Constitución Política del Perú**

En la Constitución Política del Perú se establece en el artículo 2º inciso 22 lo siguiente, “Toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de su vida”. Así mismo, en el artículo 67º se expone que “El estado determina la política nacional de ambiente y promueve el uso sostenible de los recursos naturales”

### **2.4.2.2.Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles**

En la Ley N° 28054, Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles, se promueve el uso de los biocombustibles en el país en base a la competencia libre, así como al acceso libre a la actividad económica para lograr hacer más diverso las

opciones de combustible en el mercado, generar empleos, incrementar el desarrollo de los sectores económicos relacionados y contribuir a la disminución de la contaminación del ambiente.

#### **2.4.2.3. Proyecto de Ley N° 3198/2018-CR**

Este proyecto de ley declara la necesidad pública y de interés nacional de la promoción y desarrollo de plantas de tratamiento de bioenergéticos en gobiernos locales para el aumento de opciones de producción, basada principalmente en la necesidad de disminución de grandes cantidades de desperdicios generados en el país depositados en rellenos sanitarios, botaderos clandestinos o regados en quebradas y ríos. Muchos de estos residuos pueden ser tratados con tecnologías de biodigestores y sistemas de biogás, beneficiando a varios sectores y a la sociedad.

#### **2.4.2.4. NTP-ISO 14044:2013**

En el Perú, en el mes de agosto del 2015, se realizó el evento “Normas Técnicas Peruanas para la Gestión Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida y Ecoeficiencia” donde se presentaron las Normas Técnicas Peruanas (NTP) adaptadas de la normatividad ISO internacional, entre ellas, dos son sobre el ACV. Estas son la NTP-ISO 14044:2013, sobre el ACV, directrices y requisitos; y la NTP-RT/ISO TR 14049:2014, que contiene ejemplos del uso de la NTP-ISO 14044:2013 para el ACV (Red Peruana de Ciclo de Vida, 2016; Ministerio del Ambiente, 2016c). Sin embargo, no se encuentra más información disponible de manera virtual sobre las normativas peruanas mencionadas.

#### **2.4.2.5. Ley General del Medio Ambiente**

En la Ley N° 28611, específicamente en el Art. 75, sobre el manejo integral y prevención en la fuente, se menciona que se deben adoptar, entre otras medidas, la protección y conservación ambiental relacionadas a cada etapa de las operaciones de un proyecto, bajo el enfoque de ciclo de vida de los bienes producidos o los servicios brindados.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio es de tipo descriptivo-cuantitativo.

#### 3.2. CAMPO DE VERIFICACIÓN

##### 3.2.1. Lugar de ejecución

Este estudio se aplicó en Arequipa Metropolitana. La mayor parte de información fue recolectada de la planta de biogás y el laboratorio de presurización en el Fundo La Católica, Majes, Arequipa. El cálculo del ACV y el análisis de los resultados se llevaron a cabo en el Centro Tecnológico de Cataluña (Eurecat), Barcelona, España.

##### 3.2.2. Ubicación espacial

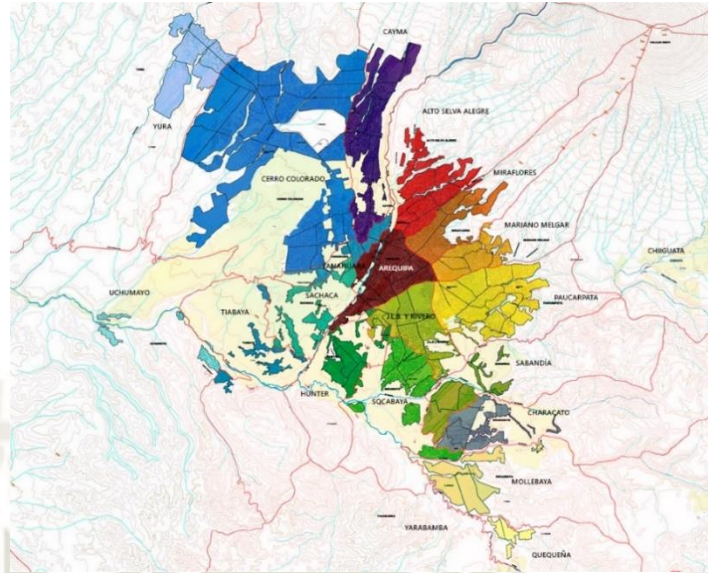
###### 3.2.2.1. Arequipa Metropolitana

Arequipa Metropolitana está ubicada en el sur del Perú. La conforman 21 distritos. Los detalles de su locación geográfica se encuentran en la Tabla 5 y la Figura 6.

**Tabla 5.** Localización geográfica de Arequipa Metropolitana

Ítem	Descripción
Coordenadas UTM	19K 229246.2 8185249.1
Superficie	3057 km <sup>2</sup>
Altitud media	2335 m.s.n.m.

**Fuente:** Municipalidad Provincial de Arequipa



**Figura 6.** Delimitación geográfica de Arequipa Metropolitana

**Fuente:** Municipalidad Provincial de Arequipa

### 3.2.2.2. Fundo La Católica, Majes

La recolección de datos de la planta de biogás y el laboratorio de presurizado fue hecha en el Fundo La Católica ubicado a 102 km del centro de la ciudad de Arequipa, en el distrito Majes, provincia de Caylloma en el departamento de Arequipa. Se encuentra en la administración del Gobierno Regional de Arequipa (Estado Peruano, 2020). En la Tabla 6 y la Figura 7 se muestran detalles de la localización geográfica.

**Tabla 6.** Localización geográfica del Fundo La Católica

Lugar	Ítem	Datos
Fundo La Católica	Coordenadas UTM	18K 798413.50
		8192215.89
	Perímetro	4.36 km
	Superficie	0.83 km <sup>2</sup>
Planta de biogás y laboratorio de presurizado	Coordenadas UTM	Altitud media
		1410 m.s.n.m.
	Perímetro	18K 798118.95
		8192110.39
		93.4 m

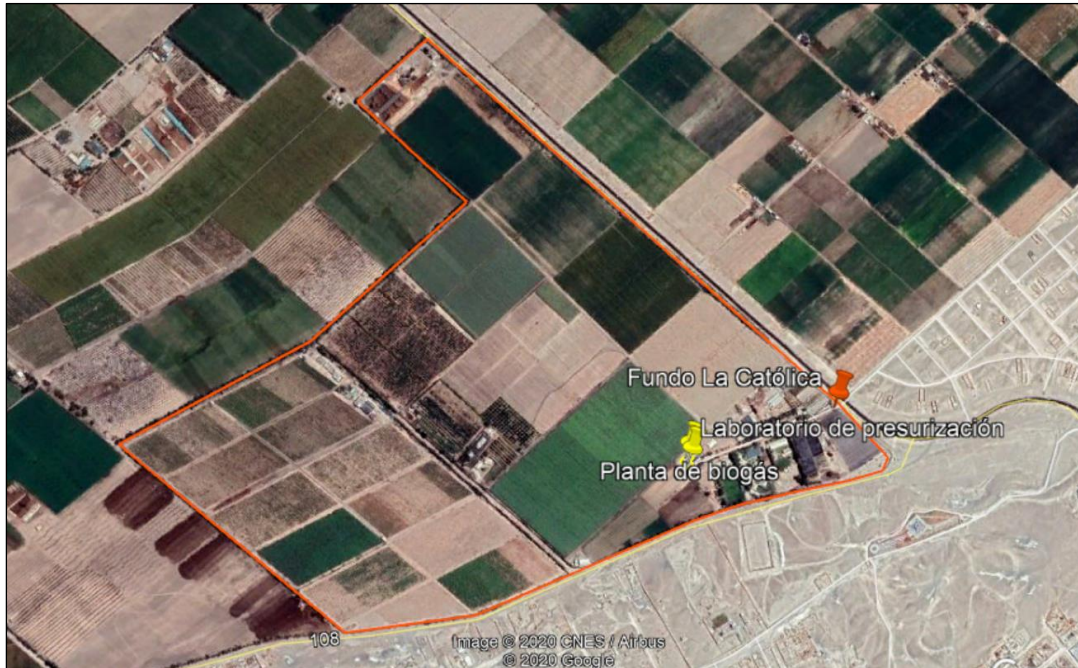


---

Superficie 470 m<sup>2</sup>

---

**Fuente:** Municipalidad Distrital de Majes y Google Earth Pro.



**Figura 7.** Localización geográfica de la planta de biogás y laboratorio de presurizado en el Fundo La Católica.

**Fuente:** Google Earth Pro.

### 3.2.2.3. Centro Tecnológico de Cataluña – Eurecat, Barcelona

El cálculo del ACV y el análisis de los resultados se realizó en el Centro Tecnológico de Cataluña (Eurecat), que se encuentra ubicado en la Plaça de la Ciència, 2, Manresa, Barcelona, España.

## 3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

Para la recolección de datos para el inventario de ciclo de vida se aplicó observación directa, una ficha recolección de datos y análisis documental:

### **3.3.1. Observación directa**

Se realizaron visitas al Fundo la Católica, en Majes, donde se observó el funcionamiento de la planta, se reconocieron los procesos y materiales utilizados, además de mediciones de la infraestructura, tanto de la planta de biogás y el laboratorio de presurizado como en las instalaciones del establo de vacas.

### **3.3.2. Ficha de recolección de datos**

Se elaboró y puso en práctica una ficha de recolección de datos para el inventario de ciclo de vida del biometano. Los datos fueron obtenidos mediante entrevistas dirigidas a los investigadores y operadores de la planta de biogás y del laboratorio de presurizado en el Fundo La Católica y en la Universidad Católica de Santa María, así como en visitas de campo. Estos datos fueron sobre los procesos para la producción del biometano, las cantidades de producción, las medidas de la infraestructura, las especificaciones de maquinarias, entre otros para la construcción del inventario de ciclo de vida.

### **3.3.3. Análisis documental**

Se hizo una revisión de artículos científicos, informes, libros y sitios web tanto nacionales como internacionales, para conseguir datos e información relacionada a la situación actual de los combustibles en el país, las plantas y los procesos de digestión anaeróbica y, sobre todo, estudios de ACV aplicado a diferentes sistemas y unidades funcionales en la línea de combustibles renovables y no renovables, plantas de producción y la conducción de vehículos con los diferentes combustibles.

### **3.4. MATERIALES Y EQUIPOS**

#### **3.4.1. Softwares**

Para el cálculo del ACV, en este estudio empleó el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent versión 3.6, disponibles en el Centro Tecnológico de Cataluña – Eurecat, Barcelona.

Para la elaboración del flujograma de los procesos para la producción de biometano se empleó el software SmartDraw. Además, se utilizó el paquete de Microsoft para el orden y la organización de datos, y Google Earth Pro para la ubicación geográfica del proyecto.

### **3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

#### **3.5.1. Elaboración del diagnóstico situacional del uso del biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa.**

Se recolectó información sobre la situación actual del uso del biometano, diésel y gas natural en Arequipa Metropolitana para evaluar el uso de combustibles renovables y no renovables.

En cuanto al diagnóstico del combustible biometano, se trabajó con fuentes bibliográficas virtuales del Ministerio de Agricultura, así como artículos, memorias y documentos generados por la extensa investigación del biometano en la UCSM, como los del proyecto “Producción y uso de biometano presurizado como sustituto de combustibles fósiles en el sector agrícola” (Peña, *et ál.*, 2018a; Peña G. , 2017a).

Por otro lado, la información de los combustibles diésel y gas natural fue extraída de fuentes bibliográficas virtuales como son principalmente, los documentos de OSINERGMIN, el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio del Ambiente, la Municipalidad Provincial, Petroperú, Repsol, entre otros documentos virtuales.

### **3.5.2. Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos óptimos obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.**

Los impactos ambientales se calcularon usando el enfoque de ACV y de acuerdo con la normativa existente, la ISO 14040-14044. Esta implica cuatro fases: la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario, la evaluación de impacto y la interpretación (ISO, 2006a; 2006b).

#### **3.5.2.1. Objetivo y alcance**

Se incluyó como el objetivo la razón por la que se realiza el estudio de ACV y como el alcance se establecieron los sistemas, los límites de cada sistema y el enfoque de estudio, lo que es igual a definir los combustibles y los procesos que se incluirán en el estudio. Así mismo, se eligió la unidad funcional, para la adecuada comparación posterior entre sistemas.

Para el establecimiento de los límites del sistema del biometano, se construyó previamente un flujograma, debido a la ausencia de uno detallado. La información recolectada sobre los procesos y funcionamiento para la construcción de dicho flujograma fue extraída del “Manual de producción y uso de biometano presurizado a baja y alta presión” (Peña, *et ál.*, 2018a).

#### **3.5.2.2. Inventario de ciclo de vida y adquisición de datos**

Los datos del inventario de ciclo de vida del biometano fueron brindados por los investigadores del proyecto general y operadores de la planta de biogás y del laboratorio de presurizado, mediante una ficha de recolección de datos. La información fue recolectada en 3 sesiones de 3 a 4 horas cada una, en el Fundo la Católica en los meses de octubre y noviembre del 2019.

Se analizó únicamente la producción óptima del biometano en la planta del fundo La Católica, debido a la reducida cantidad de información disponible. En la ficha se solicitaron datos sobre dicha producción del combustible, los consumos de agua y energía eléctrica, las dimensiones de la infraestructura, las especificaciones de las maquinarias y equipos, así como las emisiones hacia diferentes cuerpos ambientales. Adicionalmente, en las tres sesiones se realizó mediciones de la infraestructura, maquinarias y equipos.

Seguidamente, se realizó el procesamiento de los datos recolectados y la complementación de estos datos con información de sitios web, aplicándose, en muchos casos, diferentes fórmulas únicas para hallar los valores necesarios.

Finalmente, se llevó a cabo la construcción del inventario de ciclo de vida (ICV) del biometano, relacionando los datos recolectados, los procesos y las cantidades de producción de biometano con la unidad funcional. Cabe resaltar que, tanto la ficha de datos finalizada, como el inventario resultante, pasó a revisión por los encargados generales del proyecto Biometrans, para su corrección, complementación y posterior validación.

En el inventario de ciclo de vida se consignaron los siguientes datos: la etapa, los procesos, el nombre real de la infraestructura o equipo utilizado (Ej. Poza de alimentación), los materiales que lo conforman (Ej. Cemento), el valor real de los elementos, el valor amortizado que es consignado en el software y la esperanza de vida de la infraestructura o equipos.

El valor real (VR) considerado fue el peso real de los elementos (infraestructura o equipos) o los materiales que los componen, utilizados en la producción de biometano en un año. En el caso de las maquinarias, el peso considerado fue rescatado de sus especificaciones encontradas en la planta o asumidas de sitios web según su modelo. En el caso de la infraestructura y equipos, el peso fue determinado, en la mayoría de los casos, gracias a la densidad de los materiales que los componen.

Por ejemplo, el volumen de la estructura de los contenedores de metal, determinado por sus medidas recolectadas en campo, fue de 0.072 m<sup>3</sup>. El producto de este volumen con la densidad del hierro, 7870 kg/m<sup>3</sup> (Rojas-Sola & Molino-Delgado, 2015) y la cantidad de contenedores, resulta el peso total del material utilizado en los dos contenedores de hierro, el cual fue de 1132.78 kg.

Los productos de referencia considerados fueron las materias primas que alimentan a los procesos de producción de biometano. Se consideró como producto de referencia amortizado (PRA) a la cantidad de materia prima que fue utilizada en determinado proceso en función a la unidad funcional.

Se consideró como valor amortizado (VA) a la cantidad de elementos (infraestructura o equipos) por donde se transportan los productos de referencia en relación a la unidad funcional. Este valor fue hallado mediante la división de la cantidad de producto de referencia amortizado (PRA) que pasa por el elemento, entre el valor real anual del elemento (VR) por la esperanza de vida del elemento (E), como se detalla en la siguiente fórmula:

$$VA = \frac{(PRA)}{(VR) * (E)}$$

**Ecuación 1.** Cálculo del valor amortizado de los elementos con relación a la unidad funcional.

Esta ecuación es usada para el cálculo del valor amortizado de las estructuras de hierro, las estructuras de concreto, las maquinarias y los equipos utilizados para la producción del biometano.

Por ejemplo, en la poza de alimentación transitan 65700 kg/año de estiércol, el valor amortizado o en relación con la unidad funcional del estiércol es de 2.13E-01 kg y la esperanza de vida de la poza es de 65 años según datos de DCC (2017). El cálculo es expresado a continuación, resultando la cantidad de 5.00E-08 pozas en relación con la unidad funcional que serán necesarias para el paso de 2.13E-01 kg de estiércol.

$$VA = \frac{(2.13 * 10^{-01}kg)}{(65700kg/año) * (65años)}$$

$$VA = 5.00 * 10^{-08} p$$

### ***3.5.2.3. Evaluación de Impacto e interpretación***

Esta etapa tiene como finalidad evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales haciendo uso de los resultados del inventario. En otras palabras, se analizó el inventario de ciclo de vida del combustible respecto a las categorías de impacto elegidas, mediante el software SimaPro versión 9.0.0.48, la base de datos Ecoinvent versión 3.6 y la metodología de cálculo ReCiPe Midpoint (H). Al mismo tiempo, de las 18 categorías de impactos incluidas en dicha metodología, en este estudio se realizó la interpretación de, únicamente, la categoría de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles.

Seguidamente, se realizó la interpretación de los resultados obtenidos y se compararon con otros estudios.

### **3.5.3. Comparación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con el diésel y el gas natural como combustibles en el sector transporte en la ciudad de Arequipa utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6**

Se compararon cuatro escenarios diferentes, entre ellos, el primero fue el biometano producido en el fundo La Católica; el segundo fue el combustible biometano procedente de datos extraídos de la base de datos Ecoinvent; el tercero fue el diésel de bajo sulfuro extraído de ecoinvent; y finalmente, el cuarto fue el gas natural vehicular, igualmente, de Ecoinvent. Para dicha comparación entre combustibles, se utilizó la misma metodología de cálculo ReCiPe Midpoint (H), así como las mismas categorías de impacto aplicadas anteriormente: cambio climático y agotamiento de recursos fósiles.

Finalmente se realizó la interpretación de los resultados obtenidos comparándolos con resultados de otros estudios.





## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1.1. Elaboración del diagnóstico situacional del uso del biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa

###### *4.1.1.1. Biometano en el sector transporte en Arequipa*

En el Perú, a comparación a países europeos como Alemania, Suecia (Peña G. , 2017b; Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016) o Norteamérica (Beil & Beyrich, 2013), la producción y uso del biogás y del biometano es reducida. Esto, principalmente, se debe al desconocimiento de sus aplicaciones como fuente de energía, así como de los beneficios económicos y ambientales que conlleva, a diferencia de las alternativas fósiles. Entre los pocos productores de biogás existentes en el Perú, la gran mayoría enfocan sus procesos a la generación de calor para cocinas tradicionales y/o artesanales (Quispe J. , 2019).

En Arequipa, el Fundo América, ubicado en el distrito de Santa Rita de Siguan, maneja una planta de biogás desde el año 2008 con cantidades de producción de 350 m<sup>3</sup> y 14 m<sup>3</sup> de biogás y biol, respectivamente. Este fundo, junto con la Universidad Católica Santa Pablo y el financiamiento de Innóvate Perú, desarrollaron dos proyectos sobre el eficiente procesamiento del biogás mediante diferentes tecnologías en el año 2010, para el ahorro del consumo de energía en el fundo y por lo tanto la viabilidad económica de la producción de biogás y para iniciar la purificación del gas seguido de su aplicación en electricidad (Universidad Católica San Pablo, 2012; Ministerio de Agricultura, 2011).

Por otro lado, el Consorcio Perú-Murcia, finalizó el proyecto a nivel de laboratorio sobre el manejo de residuos agroindustriales de la región arequipeña en el 2011, con prototipos experimentales de reactor anaeróbico de flujo ascendente para la digestión

de agua residuos proveniente de las cosechas de alcachofa, pimiento y cebolla de la planta del consorcio. Finalmente, se logró la purificación del biogás eliminando el vapor de agua y el H<sub>2</sub>S (COPEMUR, 2012).

En cuanto a la tecnología de producción de biogás, a pesar de que la mayoría de los sistemas de producción de biogás en el país se componen por digestores tubulares o de tipo laguna, la Universidad Católica de Santa María desde el año 2014, cuenta con una planta de alto rendimiento con temperatura controlada o HPTC, por sus siglas en inglés, el cual produce tres veces más de biogás por metro cúbico de digestor (Peña, *et ál.*, 2018a). Dicha planta se ubica en el fundo La Católica en Majes, Arequipa y se construyó como parte del proyecto conjunto entre la mencionada universidad, el instituto de Investigación y Desarrollo del Sur (Arequipa), la empresa Kepler Ingeniería y Ecogestión S. L. (España) y la empresa Snow Leopard (Alemania). Así mismo, se trata de una planta piloto de biogás diseñada y construida en Burgos, España, y trasladada al Perú con fines educativos y de investigación (Diario El Búho, 2014).

Dicha planta utiliza tecnología de proyectos Snow Leopard para la producción de biogás, calor y electricidad (Peña, *et ál.*, 2018a). Con este tipo de tecnología es posible una alta producción de biogás, debido a que está diseñada para su adaptación a la demanda, condiciones y biomasa disponible en las zonas rurales donde se instale. Además, conlleva a oportunidades laborales e ingresos económicos a los agricultores y a la población local (Snow Leopard web, 2020). Adicionalmente, está compuesta por un sistema de dos etapas, donde la primera ocurre en dos tanques y se lleva a cabo la hidrólisis y acidificación, y la segunda ocurre en el digestor y se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis, resultando así, el biogás. Este es almacenado en un reservorio de gas de geomembrana para su posterior uso en calor o electricidad (Medina & Postigo, 2018).

Hasta entonces, la producción de biogás sobrepasaba la demanda de este, debido a la ausencia de tecnologías necesarias para la purificación de CO<sub>2</sub> y otros gases, y la obtención de biogás con mayores concentraciones de CH<sub>4</sub>. Por lo que, se considera que la Universidad Católica de Santa María fue la primera institución en incursionar

en la producción de biometano a nivel nacional (UCSM, 2018). En el año 2017, se desarrolló un sistema para la eliminación del vapor de agua y otros gases mediante de adsorción por PSA para la actuación del biogás en el fundo La Católica. Este sistema presuriza e introduce el biogás por una columna rellena de zeolita o carbón activado para la filtración de gases, el cual es controlado mediante válvulas (Peña & Dávila, 2017a).

A partir de lo expuesto, se han desarrollado diferentes proyectos que tomaron como unidad de estudio los diferentes procesos desarrollados en el laboratorio de presurizado, como el que evalúa tres presiones y tres temperaturas para la producción de biogás actualizado (Peña & Dávila, 2017b).

Entre ellos, el más resaltante fue el proyecto en el que se produjo biometano presurizado a partir de estiércol de cerdo, para su uso en el sector agrícola como reemplazo de los combustibles fósiles, desarrollado por la misma universidad junto con el Instituto de Investigación y Desarrollo del Sur y el Centro de Desarrollo y Entrenamiento de Biogás en New Delhi, India. En dicho proyecto, el biogás obtenido con un 85 % de concentración de CH<sub>4</sub>, 9 % de CO<sub>2</sub> y un 1 % de H<sub>2</sub>S, fue aplicado para su uso en diferentes equipos con los que se desarrollan actividades agrícolas, entre ellos un tractor y un auto Volkswagen (Peña, *et ál.*, 2018a).

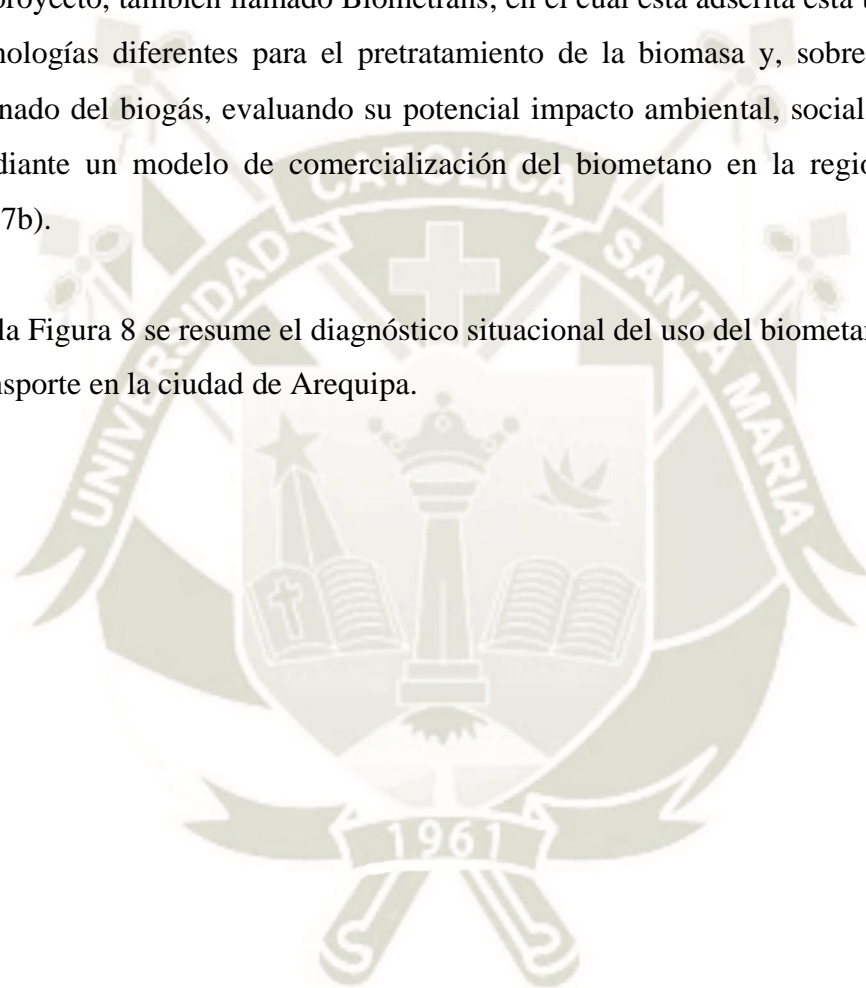
Así mismo, se publicó un manual de producción de biometano presurizado a baja y alta presión, en el cual se expone a detalle los procesos y tecnologías que fueron utilizadas en el proyecto mencionado anteriormente. Además, se creó una norma técnica de empresa, la cual tiene entre sus objetivos la determinación de los criterios técnicos para la producción, uso y posterior almacenamiento del gas (Peña, *et ál.*, 2018b).

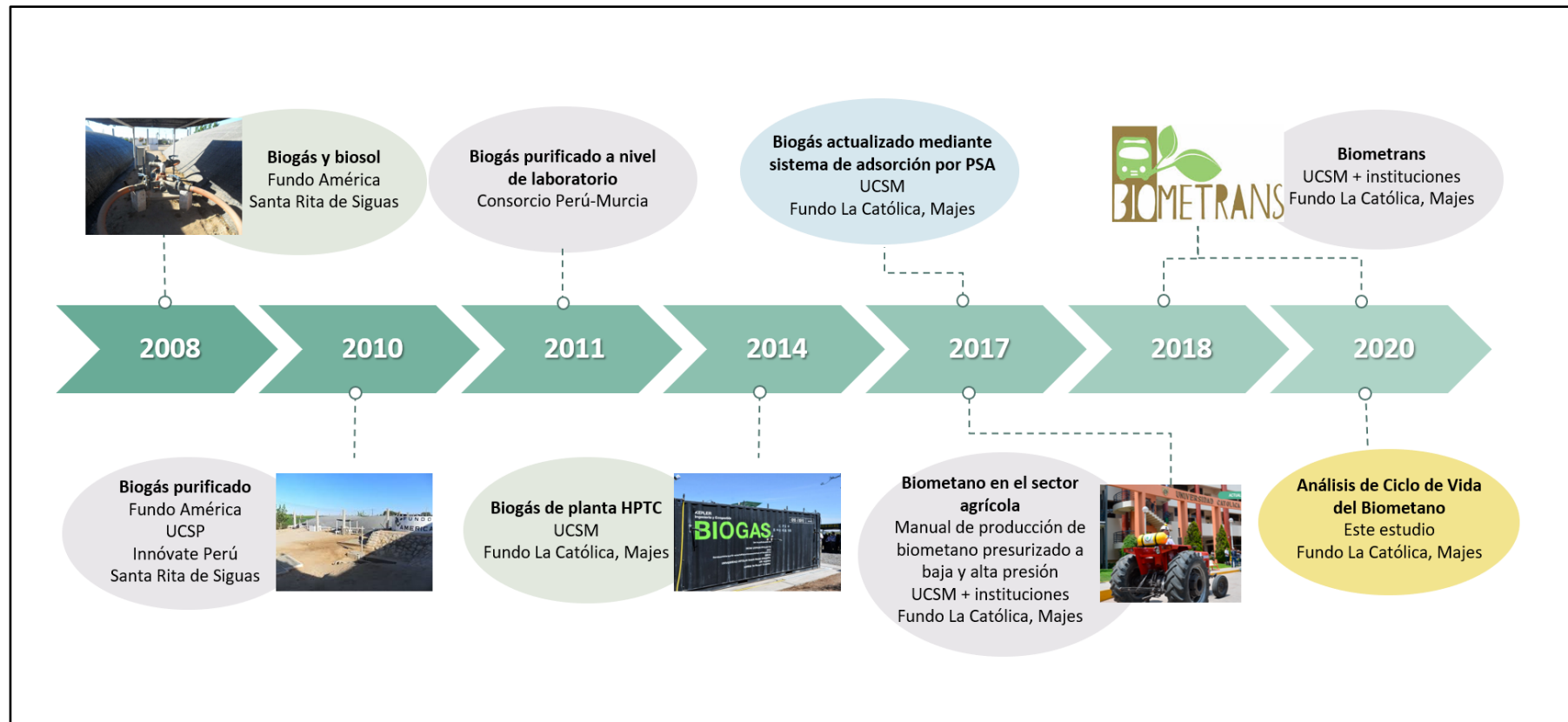
Actualmente, se viene desarrollando la segunda etapa del mencionado proyecto, el cual busca la aplicación del biometano a partir de biomasa, en el sector transporte. Este es trabajado por la UCSM y una red de investigadores de universidades e instituciones de la Región Iberoamericana, como la Fundación CARTIF (España), el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño de Jalisco (México), el

Instituto Polo Tecnológico de Pando (Uruguay), la Universidad de Santander (Colombia) y el Ingenio La Unión (Guatemala). Los cuales, a pesar de ser la primera vez coincidiendo en el mismo consorcio para el intercambio de capacidades y conocimientos, han colaborado con otros proyectos de la misma línea de investigación (Peña G. , 2017b).

El proyecto, también llamado Biometrans, en el cual está adscrita esta tesis, investiga tecnologías diferentes para el pretratamiento de la biomasa y, sobre todo, para el refinado del biogás, evaluando su potencial impacto ambiental, social y económico, mediante un modelo de comercialización del biometano en la región (Peña G. , 2017b).

En la Figura 8 se resume el diagnóstico situacional del uso del biometano en el sector transporte en la ciudad de Arequipa.





**Figura 8.** Línea de tiempo del uso biometano en el sector transporte en la ciudad de Arequipa

**Fuente:** Elaboración Propia

#### ***4.1.1.2. Diésel en el sector transporte en Arequipa***

El sector transporte es considerado el sector con mayor consumo de energía en el país, según el último balance nacional de energía publicado a la fecha. Así mismo, entre los combustibles más usados por este sector se encuentran el diésel B5 y el diésel B5 S50 (Ministerio de Energía y Minas, 2016). Respecto a su composición, estos dos combustibles son muy similares, diferenciándose por el nivel bajo de azufre que posee el diésel N° 2 que compone al diésel B5 S50 (50 partes por millón), nivel requerido por motores con emisiones Euro IV (Petroperu, 2020).

Como medida para la reducción de la contaminación atmosférica, en el 2006 bajo la Ley 28694 se prohibió el uso y comercio del diésel B5 con alto contenido de azufre a nivel nacional, pero finalmente esta ley no se cumplió. Años después, en el 2009, dicha prohibición se estableció únicamente para Lima y Callao mediante el Decreto Supremo N° 016-2009-EM, después, en el año 2012, mediante la Resolución Ministerial N° 139-2012-MEM/DM, se incluyó en esta prohibición a Arequipa y a otros departamentos como Madre de Dios, Puno y Cusco, y en el año 2015, mediante el Decreto Supremo N° 009-2015-MINAM, se amplió a los departamentos de Tacna, Junín y Moquegua, por lo que hoy en día el consumo de un combustible más limpio aplica únicamente a 8 departamentos del país, generando así el elevado uso del diésel B5 en los departamentos donde la normativa no aplica (Ministerio de Energía y Minas, 2016; Ministerio del Ambiente, 2016d).

En Arequipa, el diésel B5 S50 que se consume proviene de una serie de procesos que inician en las principales refinerías del país, siendo La Pampilla la más importante y moderna, ubicada en el Callao y operada por la compañía global Repsol. En el año 2016, dicha empresa inició los procesos de producción del diésel con bajo contenido de azufre en las plantas nuevas de la refinería, considerando el respectivo cuidado ambiental (Repsol, 2020; Gestión, 2015). Del mismo modo, Repsol distribuye el diésel B5 S50 y otros combustibles a los departamentos del país y los comercializa a través de estaciones de servicio, posee un aproximado de 34 estaciones de servicio en el departamento de Arequipa (Repsol, 2018).

El diésel B5 S50 se utiliza principalmente en vehículos terrestres como camiones, buses y autos, en plantas de generación eléctrica y en industrias en general como pesqueras, constructoras, mineras, entre otras (Petroperu, 2020). Cuando este combustible es usado en el parque automotor, sus emisiones contienen generalmente dióxido de azufre, debido al contenido alto de azufre del combustible, siendo necesaria su reducción mediante la implementación de plantas de desulfuración en las refinerías peruanas o la importación del crudo de petróleo con bajo azufre (Ministerio del Ambiente, 2016d), lo cual aumenta su impacto en el ambiente por emisiones si es que el transporte se realiza mediante camiones o también llamados gasoductos virtuales.

#### ***4.1.1.3. Gas Natural en el sector transporte en Arequipa***

El incremento de la demanda energética ha provocado la aparición de nuevos proyectos de inversión que se encargan de explorar y explotar las reservas de petróleo y gas natural a nivel mundial. Por su lado, en el 2004, en el Perú se marcó el inicio del proyecto Camisea, como una importante referencia para el abasto energético y el crecimiento económico del país gracias al gas natural (Osinergmin, 2014).

Este combustible puede llegar a contribuir en la solución de dos problemas ambientales del Perú y del mundo. Por un lado, aportando en la reducción de gases de efecto invernadero, y por otro lado, como una alternativa sostenible para su uso económico y social (Mokhatab, Poe, & Mak, 2019), ya que se posee una calidad alta, limpia, es eficiente y de bajas emisiones de carbono respecto a otros combustibles fósiles (Academic Press, 2019).

En tal sentido, se evaluó que el uso del gas natural en el país, como sustituto de los hidrocarburos como el diésel y la gasolina en la generación de energía eléctrica y en los sectores transporte e industrial, habría contribuido a la mitigación del CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero. Evidenciando así el alineamiento del proyecto Camisea con objetivos y normas internacionales sobre el mejoramiento de la calidad del

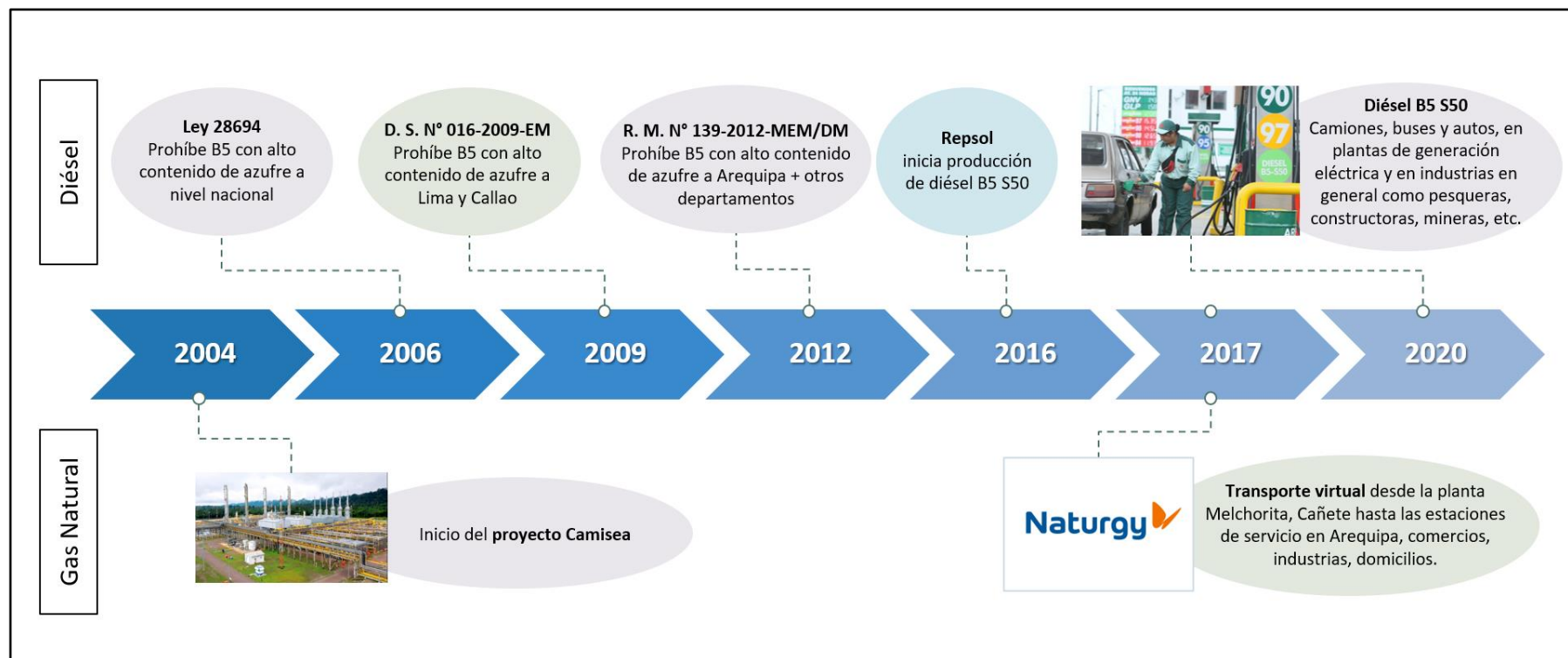
ambiente y el cambio climático (Osinermin, 2014). Por tal motivo, desde hace casi una década, el consumo del petróleo ha disminuido y el del gas natural ha ganado importancia en la composición de energías primarias a nivel nacional (Osinermin, 2013).

Así mismo, el gas natural suple ventajosamente a otros combustibles en el sector residencial, industrial, comercial y transporte, y para el abastecimiento de estos sectores, el transporte desde los pozos de extracción del combustible es esencial. Esta actividad se realiza tradicionalmente vía gasoductos. Sin embargo, en situaciones donde la construcción de ductos es inviable, como en la ciudad de Arequipa, se ha implementado la modalidad de transporte virtual (Osinermin, 2014).

El transporte virtual es el que traslada el gas natural mediante camiones desde su punto de origen en la planta Melchorita, Cañete hasta las estaciones de servicio donde se distribuye el combustible en Arequipa, Moquegua y Tacna. Este transporte es operado por la empresa Fenosa actualmente llamada Naturgy (Naturgy, 2020; RPP, 2017). La presión del gas, previo a su transporte es variable en cada país, pero suele encontrarse entre los 200 y 250 bar (Osinermin, 2014).

En la Figura 9 se resume el diagnóstico situacional del uso del gas natural y el diésel en el sector transporte en la ciudad de Arequipa.

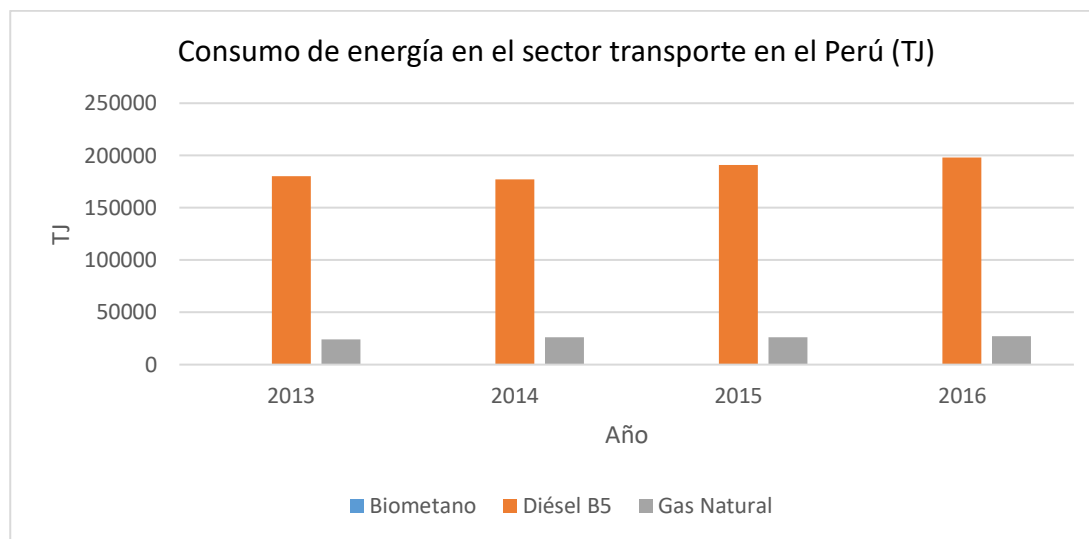




**Figura 9.** Línea de tiempo del uso del diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa

**Fuente:** Elaboración Propia

Finalmente, en la Figura 10 se compara del consumo anual de los combustibles estudiados, expresados en terajoules (TJ) del Perú de los últimos años consignados en el Balance Nacional de Energía según el Ministerio de Energía y Minas (2016).



**Figura 10.** Demanda de energía de combustibles en el sector transporte en el Perú, 2016.

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas (2016)

En la figura anterior se evidencia que en el Perú se consumió una cantidad mayor de diésel a diferencia del gas natural (Ministerio de Energía y Minas, 2016) y, por otro lado, el combustible biometano no posee consumo alguno en el sector transporte debido a la ausencia de una producción constante, que es únicamente para enseñanza e investigación (Diario El Búho, 2014), por lo que este no se encuentra a la venta (Peña G. , 2017b).

Adicionalmente, se encontraron únicamente datos sobre el diésel y el gas natural en otras unidades de medida diferentes a los terajoules dificultando la comparación entre estas, siendo los más recientes los siguientes: La demanda anual del diésel en Arequipa en el año 2018 fue de 160.43 MBPD (miles de barriles por día), mientras que la de todo el país fue de 1393.72 MBPD (Osinergmin, 2020). Por otro lado, el dato más reciente del consumo de gas natural es del año 2017, el cual fue de 71 MMpcd (millones de pies cúbicos diarios) (Promigas, 2018).

#### **4.1.2. Evaluación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos óptimos obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6.**

##### **4.1.2.1. Objetivo y alcance**

Este estudio se enmarca dentro de las actividades del proyecto “Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa (Biometrans)” financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (Fondecyt) y por la Universidad Católica de Santa María (UCSM), bajo el Convenio Nro. 111-2017 (Peña G. , 2017a).

Según lo expuesto, el objetivo del presente estudio fue evaluar los impactos ambientales de un combustible renovable como el biometano a partir del estiércol de vaca y compararlo con combustibles no renovables como el diésel y el gas natural mediante el análisis de ciclo de vida como herramienta de gestión para la toma de decisiones.

El alcance geográfico fue Arequipa Metropolitana, para su comparación con otros combustibles en el mismo espacio. Además, es donde el proyecto general de Biometrans será aplicado en primera instancia.

El software de cálculo utilizado fue SimaPro 9.0.0.48, herramienta informática comercial desarrollada por Pré Consultants para el ACV (SimaPro, 2020). Así mismo, se empleó la base de datos Ecoinvent versión 3.6 (Ecoinvent, 2019) y la metodología de cálculo ReCiPe Midpoint (H).

A pesar de haberse realizado la evaluación mediante el software de las 18 categorías de impacto que posee la metodología ReCiPe Midpoint (H), en este estudio se interpretaron únicamente las categorías de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles.

#### 4.1.2.2. Límites del sistema y unidad funcional

Para una mejor ubicación y organización de la información recolectada sobre la producción del biometano, se elaboró el diagrama de flujo de su producción, expuesto en la Figura 11. Dicho diagrama no existe en proyectos previos de la planta con tal nivel de detalle.

Los escenarios considerados en este estudio son los siguientes:

- Biometano comprimido (BMC) obtenido de estiércol de vaca,
- Diésel bajo en azufre (DB5 S50),
- Gas natural vehicular (GNV).

Los límites del sistema abarcaron el transporte del estiércol vacuno hacia la planta, la producción de biometano, el almacenamiento y el llenado del mismo en un vehículo, es decir, se considera un estudio hecho bajo el enfoque del pozo al tanque o “*well to tank*” (WTT) como en los estudios de Florio *et ál.* (2019), Ardolino & Arena (2019), Koido *et ál.* (2018), Collet *et ál.* (2017), entre otros. Así mismo, dicho enfoque fue aplicado en los combustibles diésel y gas natural. Los límites para la fase del inventario de ciclo de vida se muestran en la Figura 11 y 12.

Se seleccionó como unidad funcional cuantitativa a un MJ de energía producido en la planta de biometano, para la comparación en función a la energía entre los combustibles estudiados. La misma unidad funcional fue utilizada en otros estudios que tuvieron el biometano como sistema de estudio (Ferreira, Buller, Berni, & Forster-Carneiro, 2019; Koido *et ál.*, 2018; Collet, *et ál.*, 2017), así como otros combustibles (Sharma & Strezov, 2017).

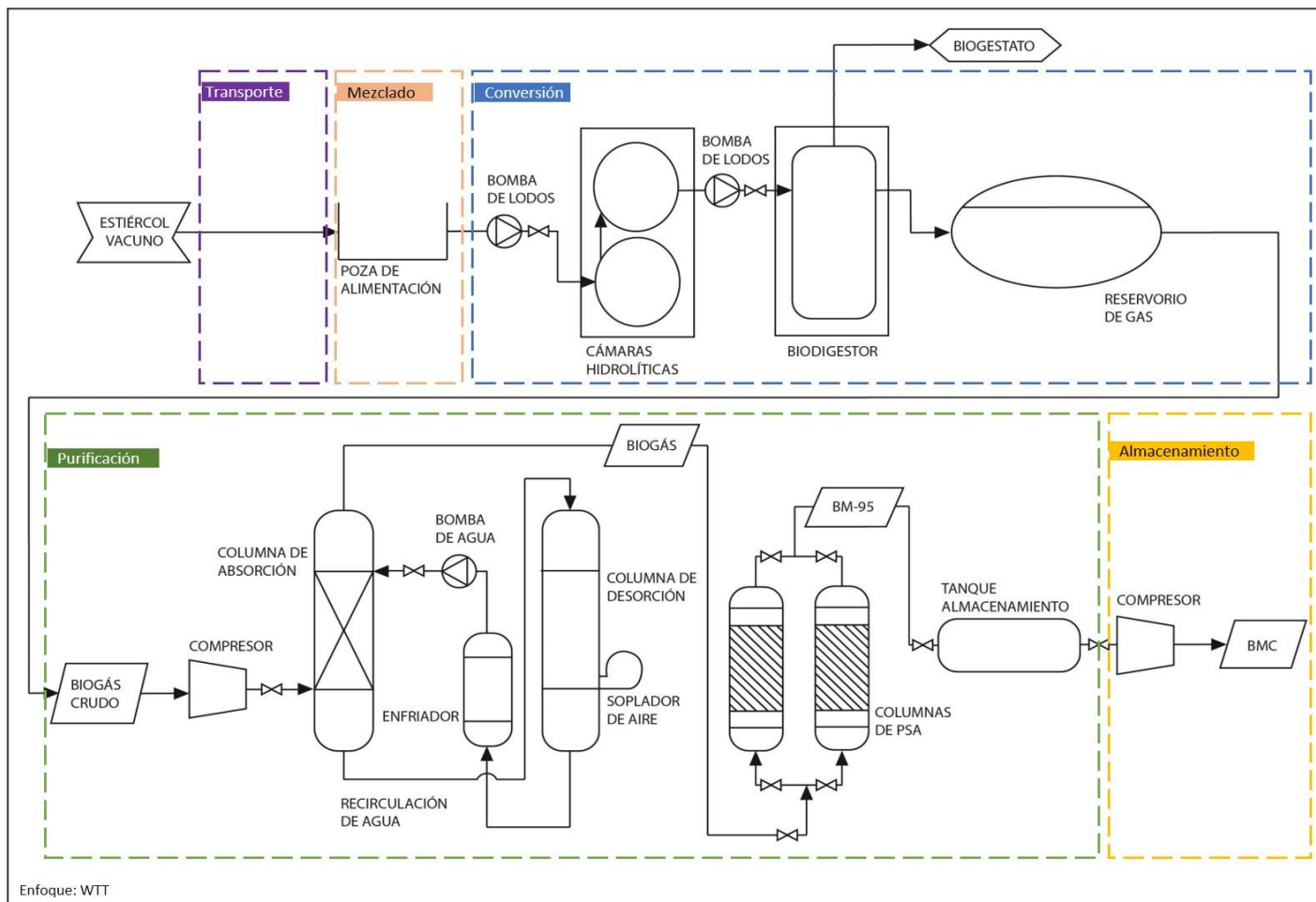
El poder calorífico que se tomó en cuenta para cada combustible se muestra en la Tabla 7, este fue necesario para la posterior comparación entre combustibles en base a la unidad funcional, ya que los combustibles en el software se encuentran en m<sup>3</sup> (biometano y gas natural) y en kg (diésel).

**Tabla 7.** Poder calorífico de los combustibles estudiados

Combustible	Poder calorífico	Unidad
Biometano	37.5	MJ/m <sup>3</sup>
Diesel	42.6	MJ/kg
Gas Natural	40.6	MJ/m <sup>3</sup>

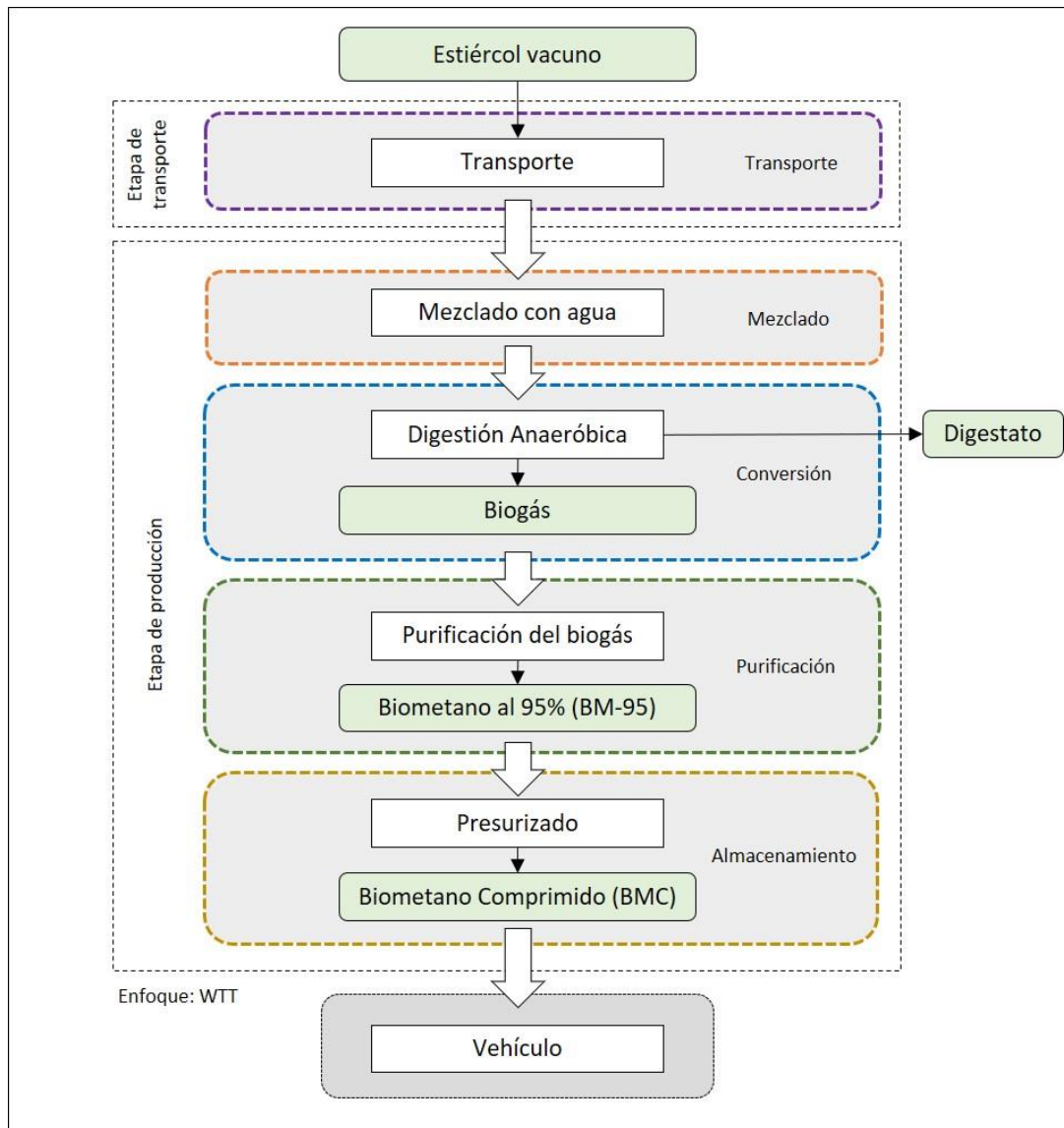
**Fuente:** Engineering ToolBox (2020) y Browne, Nizami, Thamsiroj, & Murphy (2011)





**Figura 11.** Producción de Biometano en el Fundo La Católica y la delimitación del sistema de estudio bajo el enfoque del pozo al tanque (WTT).

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 12.** Límites del sistema del Biometano (BMC) obtenido de estiércol de vaca.

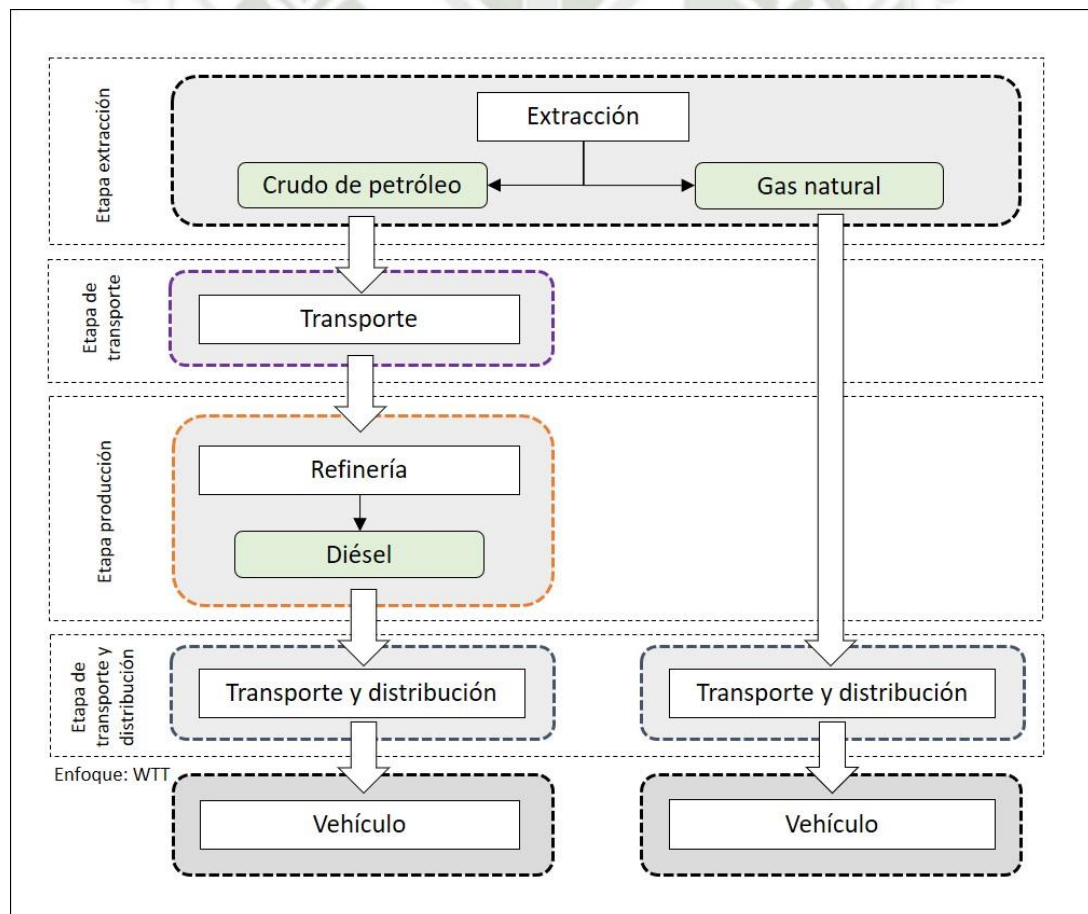
**Fuente:** Elaboración propia.

En este estudio, los límites del sistema del Biometano (BMC) obtenido de estiércol de vaca (Figura 12) se dividen por etapas de acuerdo con el enfoque WTT, las cuales son la de transporte y la de producción. En la etapa de transporte es donde se moviliza el estiércol vacuno desde el establo de las vacas hasta la planta de biogás, ambos ubicados dentro del fundo La Católica, en Majes, Arequipa. Después, este estiércol transportado pasa a la etapa de producción, la cual empieza por el proceso de mezclado con agua y continúa hacia el proceso de conversión o digestión anaeróbica, donde se obtiene el biogás y el digestato, siendo el segundo excluido de este estudio. Seguidamente, el biogás pasa al proceso de purificación, donde se

produce biometano al 95% de purificación (BM-95). Finalmente, este BM-95 se presuriza y se mantiene almacenado hasta su inyección en un vehículo del sector transporte.

La Figura 12, tiene similitud con los estudios de Koido *et ál.* (2018) y Collet *et ál.* (2017) que, al igual que en este estudio, analizaron los impactos en una planta de biometano bajo una unidad funcional de 1 M bajo un enfoque del pozo al tanque.

Así mismo, como en el estudio de Lyng & Brekke (2019), las emisiones generadas en el corto tiempo de almacenamiento del estiércol antes de su transporte a la planta no son consideradas debido a la incertidumbre en los datos.



**Figura 13.** Límites de los sistemas del diésel (DB5 S50) y gas natural (GN)

**Fuente:** Elaboración propia.



Tanto los límites de los sistemas del diésel B5 S50 y gas natural (Figura 13) se dividen por etapas de acuerdo con el enfoque WTT. Para el combustible diésel B5 S50, se considera primero, la etapa de extracción donde se obtiene el crudo de petróleo, este es transportado hacia la etapa de producción donde resulta el diésel, que finalmente se transporta para su distribución e inyección en un vehículo del sector transporte. En cuanto al gas natural, se consideran las etapas de extracción y transporte y distribución para llenado en un vehículo del sector transporte.

#### ***4.1.2.3. Inventario de ciclo de vida y adquisición de datos***

Los datos para el inventario del biometano fueron adquiridos mediante el llenado de la ficha de recolección de datos, presentada en el Anexo 4, dirigida a operadores y especialistas encargados de la planta de biogás y del laboratorio de presurizado en el fundo La Católica en Majes y en la Universidad Católica de Santa María en Arequipa, completando la falta de información con datos recolectados a través de exhaustivas búsquedas bibliográficas.

Así mismo, en el presente estudio se analizó únicamente la producción óptima del biometano en la planta del fundo La Católica, debido a la reducida cantidad de información disponible. Los datos recolectados fueron sobre los procesos involucrados para la producción de biometano, las cantidades de producción, la energía consumida, las medidas de la infraestructura, especificaciones de maquinarias, entre otros.

Por otro lado, los datos para los inventarios del diésel y del gas natural fueron extraídos de la base de datos Ecoinvent. Cabe resaltar que siempre que ha sido posible, se han utilizado datos aterrizados en el contexto nacional.

**Tabla 8.** Inventario de ciclo de vida de la producción del biometano en el fundo La Católica

Etapa	Procesos	Elementos	Material	VA <sup>1</sup>	Unid.	VR <sup>2</sup>	Unid.	E <sup>3</sup>	Unid.
Transporte de materia prima	Transporte de materia	Bienes capitales	Tractor FIAT 70-66	Transporte, tractor de agricultura	1.48E-07 <sup>4</sup>	p	65700	kg*km	22 años
Producción Biometano	Mezclado y Conversión	Operación	Estiércol	Estiércol	2.13E-01	kg	65700.00	kg	
			Agua de mezcla	Agua residual	1.19E-01	kg	36500.00	kg	
			Bomba de lodos	Electricidad	3.56E-03	kWh	1095.00	kWh	
			Compresor	Electricidad	4.27E-02	kWh	13140.00	kWh	
			Electricidad total por UF	Electricidad			14235.00	kWh	
Bienes capitales	Poza de alimentación	Poza de alimentación	Poza de alimentación	Poza de alimentación	5.00E-08 <sup>5</sup>	p	9204.45	kg	65 años
			Cemento	Cemento	5.00E-08	p	1193.40	kg	
			Arena	Arena	5.00E-08	p	2553.57	kg	
			Grava	Grava	5.00E-08	p	4362.20	kg	
			Agua	Agua	5.00E-08	p	578.17	kg	
			Acero baja aleación	Acero baja aleación	5.00E-08	p	337.74	kg	

<sup>1</sup> Valor amortizado de la cantidad de material utilizada

<sup>2</sup> Valor real de la cantidad de material utilizada

<sup>3</sup> Esperanza de vida

<sup>4</sup> Este valor es la cantidad de elementos (vehículo) necesaria para transportar el producto referido a la unidad funcional (estiércol vacuno)

<sup>5</sup> Este valor representa la cantidad de elementos (poza de alimentación) por donde se transporta el respectivo producto de referencia (Estiércol). Valor es igual a la cantidad de producto de referencia amortizado (Estiércol) entre el valor real anual del producto que se transporta (Estiércol) por la esperanza de vida del elemento (años de la poza de alimentación).

		Hierro fundido	5.00E-08	p	179.37	kg	
Contenedores de hierro		Contenedores de hierro	1.16E-07	p	1132.78	kg	28 años
		Hierro fundido	1.16E-07	p	1132.78	kg	
Base de hormigón		PVC	1.16E-07	p	0.00	kg	
		Base de concreto	5.00E-08	p	13126.40	kg	65 años
		Cemento	5.00E-08	p	1803.20	kg	
		Arena	5.00E-08	p	3858.40	kg	
		Grava	5.00E-08	p	6591.20	kg	
		Agua	5.00E-08	p	873.60	kg	
		Bomba de lodos	Acero cromado	1.80E-07	p	54.00	kg
Compresor	Acero cromado	2.16E-07	p	150.00	kg	15 años	
Tanque de hidrólisis	Fibra de vidrio	1.16E-07	p	203.25	kg	28 años	
Biodigestor de geomembrana	PVC	1.16E-07	p	191.09	kg	28 años	
Reservorio de gas	PVC	1.16E-07	p	191.09	kg	28 años	
Peso total					23990.63	kg	
Purificación del biogás	Operación	Biogás	Biogás	7.11E-02	m <sup>3</sup>	21900.00	m <sup>3</sup>
		Compresor	Electricidad	1.06E-02	kWh	3266.166	kWh
		Radiador	Electricidad	3.32E-04	kWh	102.20	kWh
		Enfriador	Electricidad	1.04E-04	kWh	32.12	kWh
		Bomba de agua	Electricidad	1.77E-02	kWh	5443.61	kWh
		Electricidad total por UF	Electricidad			8844.10	kWh

Bienes capitales	Estructura de hierro	Hierro fundido	5.41E-08	p	894.21	kg	60 años	
	Base de hormigón	Base de concreto	5.00E-08	p	16876.80	kg	65 años	
		Cemento	5.00E-08	p	2318.40	kg		
		Arena	5.00E-08	p	4960.80	kg		
		Grava	5.00E-08	p	8474.40	kg		
		Agua	5.00E-08	p	1123.20	kg		
	Techo de metal	Acero galvanizado	5.41E-08	p	100.50	kg	60 años	
	Compresor	Acero cromado	2.16E-07	p	30.80	kg	15 años	
	Radiador	Acero cromado	5.41E-07	p	2.26	kg	6 años	
	Enfriador	Acero cromado	5.41E-07	p	46.00	kg	6 años	
	Bomba de agua	Acero cromado	1.80E-07	p	46.00	kg	18 años	
	Filtros Scrubber	Hierro fundido	1.16E-07	p	221.08	kg	28 años	
	Filtros tipo PSA	Hierro fundido	1.16E-07	p	185.85	kg	28 años	
	Tanque de almacenamiento	Tanque de	Tanque de	1.16E-07	p	299.89	kg	28 años
			almacenamiento					
			Hierro fundido	1.16E-07	p	299.02	kg	
		PVC	1.16E-07		0.87	kg		
Peso total					18703.40	kg		
Almacenamiento	Operación	Biometano (BM-95)	BM-95	6.76E-02	m <sup>3</sup>	20805.00	m <sup>3</sup>	
		Compresor DIDWANIA	Electricidad	2.13E-02	kWh	6570.00	kWh	
		Electricidad total por UF	Electricidad			6570.00	kWh	
Bienes capitales	Compresor DIDWANIA	Acero cromado	1.16E-07	p	568.00	kg	28 años	

			Peso total			568.00	kg
Operación del vehículo con biometano	Operación del vehículo	Operación	Biometano comprimido (BMC)	BMC	2.67E-02	m <sup>3</sup>	8212.5 m <sup>3</sup>
			Energía (UF)		1 <sup>6</sup>	MJ	307968.75 MJ

**Fuente:** Elaboración propia



<sup>6</sup> Unidad funcional

En cuanto a la unidad “p”, debido a la utilización del software elegido, las unidades de los materiales solo pueden cuantificarse en la unidad “p” al generar el inventario de ciclo de vida. Esta unidad hace referencia a una pieza o parte del material, y representa la cantidad de conexiones con el sistema que necesita para lograr el flujo de referencia del ciclo de vida. A su vez, según la unidad “p” se decidirá automáticamente cuándo del material fluye hacia el ciclo de vida completo (SimaPro, 2020), (Pre-sustainability, 2016), (Simapro, 2014).

El inventario de ciclo de vida completo se muestra en la Tabla 8, las etapas del sistema del biometano incluidas en dicho inventario son la etapa de transporte de la materia prima y la etapa de producción que a su vez contiene los procesos de conversión, purificación del biogás y almacenamiento. Dichas etapas y procesos son descritos a continuación.

#### ***A. Etapa del transporte de la materia prima***

El estiércol considerado en este estudio es el que proviene de la crianza estabulada de 130 vacas, descargado a razón de 15 kg por cabeza de vacuno. Las emisiones generadas en el corto tiempo de su almacenamiento antes de su transporte hacia la planta no son consideradas, como en el estudio de Lyng & Brekke (2019), debido a la incertidumbre en los datos y a que esta materia prima para la producción de biometano es considerada un desecho para otra actividad.

Se consideró la cantidad de 180 kg de estiércol transportado dentro del fundo La Católica a lo largo de 1 kilómetro de distancia desde el establo de vacas hasta la planta de biogás. El recorrido se muestra en la Figura 14. Se usó un tractor FIAT 70-66, detallado en el Anexo 5, Tabla 18, manejado durante 30 minutos aproximadamente por una persona, con un consumo de 4.55 litros de diésel como combustible por semana. La esperanza de vida del vehículo es de 22 años (Muñoz & Llanos, 2012).

El valor del transporte que se consideró es igual a la cantidad de estiércol transportado en un año por el número de kilómetros recorridos, el cual resulta 65700 kgkm.



**Figura 14.** Recorrido del tractor para el transporte de materia prima desde el establo de vacas hasta la planta de biogás (línea azul).

**Fuente:** Elaboración propia.

### ***B. Etapa de producción de biometano***

En la etapa de producción de biometano se consideraron a los procesos de mezclado, conversión, purificación del biogás y almacenamiento. Las cantidades de producción diaria, anual y en relación a la unidad funcional, de los productos de referencia de cada proceso considerado en este estudio, se presentan en la Tabla 9. La planta para la producción de biometano posee una esperanza de vida de entre 25-30 años (representada por 28 años).

Los procesos de mezclado y conversión se llevaron a cabo en la planta de biogás, la cual inició sus operaciones en el año 2014. Mientras que, los procesos de purificación del biogás y almacenamiento se llevaron a cabo en el laboratorio de presurizado, el cual entró en funcionamiento en el año 2017.

**Tabla 9.** Datos de inventario de la entrada de los productos de referencia diarios, anuales y en referencia a la unidad funcional

Producto de referencia	Unid.	Mezclado y Conversión	Purificación del biogás	Almacén	Uso
<b>Cantidad diaria</b>					
Estiércol	kg	180			
Agua de mezcla	kg	100			
Biogás	Nm <sup>3</sup>		60		
BM-95	Nm <sup>3</sup>			57	
BMC	Nm <sup>3</sup>				22.5
Energía	MJ				843.75
<b>Cantidad anual</b>					
Estiércol	kg	65700			
Agua de mezcla	kg	36500			
Biogás	Nm <sup>3</sup>		21900		
BM-95	Nm <sup>3</sup>			20805	
BMC	Nm <sup>3</sup>				8212.15
Energía	MJ				307968.75
<b>Cantidad en referencia a la UF</b>					
Estiércol	kg	2.13E-01			
Agua residual	kg	1.19E-01			
Biogás	Nm <sup>3</sup>		7.11E-02		
BM-95	Nm <sup>3</sup>			6.76E-02	
BMC	Nm <sup>3</sup>				2.67E-02
Energía (UF)	MJ				1

**Fuente:** Elaboración propia

Las cantidades en referencia a la unidad funcional son valores que representan a la cantidad de estiércol (kg), agua (kg), biogás (m<sup>3</sup>) biometano (m<sup>3</sup>) y biometano comprimido (m<sup>3</sup>) necesarios para la producción de 1MJ de energía. Por ejemplo, si



para la producción de 307968.75 MJ de energía al año fueron necesarios 8212.15 Nm<sup>3</sup> de biometano, entonces, para la producción de 1 MJ fueron necesarios 2.67E-02 m<sup>3</sup> de biometano.

El inventario de los consumos eléctricos se muestra en la Tabla 10, en el cual se ubican las maquinarias incluidas en el estudio, sus respectivas potencias, la operación diaria y anual, el consumo de energía anual y el consumo en referencia a la UF.

**Tabla 10.** Maquinarias utilizadas en la producción de biometano: Potencia, operación, consumo de electricidad anual y consumo en referencia a la unidad funcional

Maquinaria	Potencia (kW)	Operación (h/d)	Operación anual (h/año)	Consumo anual (kWh)	Consumo en referencia a la UF (kWh)
Bomba de lodos	0.75	4	1460	1095.00	3.56E-03
Compresor 1	1.5	24	8760	13140.00	4.27E-02
Compresor 2	2.24	4	1460	3266.17	1.06E-02
Radiador	0.07	4	1460	102.20	3.32E-04
Enfriador	0.02	4	1460	32.12	1.04E-04
Bomba de agua	3.73	4	1460	5443.61	1.77E-02
Compresor 3	4	4.5	1642.5	6570	2.13E-02

**Fuente:** Elaboración propia

El consumo en referencia a unidad funcional son los valores que representan al consumo de electricidad de las maquinarias que fue necesario para la producción de 1MJ de energía. Por ejemplo, si para la producción de 307968.75 MJ de energía al año se utilizó el compresor 3 que consumió 6570 kWh, entonces para la producción de 1 MJ de energía del biometano (que es la UF), se consumieron 2.13E-02 kWh de energía eléctrica.

Los datos específicos de la infraestructura, los equipos y las maquinarias consideradas en el estudio, como sus medidas, pesos, materiales, entre otros, se presentan de manera detallada en los Anexos 6, 7, 8, 9 y 10.

### *Mezclado con agua*

En el mezclado con agua, se consideró al sustrato que es la dilución de 180 kg de estiércol con 100 kg de agua en la poza de alimentación. El agua de mezcla fue residual proveniente de la limpieza de actividad de crianza de cerdos desarrollada a unos metros de la poza de alimentación, por lo que no fue necesario considerar su transporte ya que este no se realizó mediante algún vehículo o maquinaria.

Así mismo, se incluyó a la poza de alimentación como infraestructura, conformada por los materiales: hormigón (cemento, arena, grava y agua), varillas de acero y una cubierta de protección de metal, como se detalla en el Anexo 6, Tabla 19 y 20.

Para la dosificación del hormigón se utilizó un conversor web el cual dosificó los siguientes materiales por volumen de estructura de hormigón, 322 kg de cemento, 689 kg de arena, 1177 kg de grava y 156 kg de agua (Cálculo web, 2020). El volumen de la poza fue de 3.71 m<sup>3</sup>, determinado según las medidas recolectadas en campo, lo que resultaría un total de 1193.40 kg de cemento, 2553.57 kg de arena, 4362.20 kg de grava y 578.17 kg de agua.

En cuanto a las varillas de acero, se asumió que poseen un diámetro genérico de  $\frac{3}{4}$ "', se ubican a 0.25 m de distancia y poseen un peso métrico nominal de 2.24 kg/m, según datos de Aceros Arequipa (2008). Junto a esta información y la que fue recolectada en campo, se halló la cantidad de acero utilizado en metros y el peso de este material, como se detalla en el Anexo 10, Tabla 38 y 39. Resultando un total de 337.74 kg de acero utilizado en las varillas que conforman la poza de alimentación.

### *Conversión*

En el proceso de conversión o digestión anaeróbica se consideraron entre las maquinarias a dos bombas de lodo de 0.75 kW de potencia y 27 kg de peso cada una y un compresor de 1.5 kW y 150 kg, dichas maquinarias se encuentran detalladas en el Anexo 7, Tabla 21 y 22.

En dicho proceso, se consideró como la infraestructura a la planta de biogás de tipo HPTC de doble cámara, conformado por dos contenedores de 1132.78 kg peso de hierro estimado entre ambos, como infraestructura (Anexo 7, Tabla 23) situados bajo una base de hormigón compuesta por un total de 1803.2 kg de cemento, 3858.4 kg de arena, 6591.2 kg de grava y 873.6 kg de agua (Anexo 7, Tabla 24). Uno de los contenedores alberga a dos cámaras hidrolíticas donde se lleva a cabo la hidrólisis y acidogénesis. En el otro contenedor se encuentra el biodigestor, donde se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis.

En cuanto a los equipos, se incluyen las cámaras hidrolíticas del material poliéster reforzado con fibra de vidrio y con una capacidad de 2500 litros y peso calculado de 203.25 kg entre ambos tanques, detallados en el Anexo 7, Tabla 25. En este estudio se consideraron ambos tanques funcionales. Sin embargo, actualmente uno de ellos presenta problemas en su funcionamiento.

Por otro lado, el biodigestor de material PVC, posee 24 m<sup>3</sup> de volumen efectivo y bajo este se encuentran tuberías de plástico conductor de calor por donde circula agua previamente calentada mediante energía solar, para mantener la temperatura del biodigestor (Peña, *et ál.*, 2018a). Este equipo se encuentra sellado y su información detallada no fue accesible, por lo que se calculó un peso de 191.09 kg (Anexo 7, Tabla 26).

Finalmente, el reservorio de gas (Anexo 7, Tabla 27) compuesto por el mismo material que el biodigestor, posee una capacidad de 30 m<sup>3</sup>, resistencia de hasta 0.2 bar de presión y se calculó un peso de 191.09 kg.

### *Purificación del biogás*

En el proceso de purificación del biogás, se incluyeron entre las maquinarias a un compresor de 2.237 kW de potencia y 30.8 kg de peso, un radiador de 0.14 kW y 2.26 kg, un enfriador de 0.022 kW y 46 kg y una bomba de agua de 3.7285 kW y 46 kg, detallados en el Anexo 8, Tablas 28, 29, 30 y 31, respectivamente.

En cuanto a la infraestructura, se encontró una estructura de hierro que protege el laboratorio de presurizado de peso calculado de 894.21 kg (Anexo 8, Tabla 32), sobre una base de hormigón compuesta por un total de 2318.4 kg de cemento, 4960.8 kg de arena, 8474.4 kg de grava y 1123.2 kg de agua (Anexo 8, Tabla 33) y techo de acero galvanizado con un peso hallado total de 100.5 kg (Anexo 8, Tabla 34).

Entre los equipos considerados se encuentran los filtros Scrubber, donde se logra remover el CO<sub>2</sub> del biogás mediante el filtrado con agua recirculante, compuestos por dos torres de hierro de 3 metros de altura y 0.29 metros de diámetro, con un peso calculado de 221.085 kg. (Anexo 8, Tabla 35). Los filtros PSA, donde se retiene el H<sub>2</sub>S y el vapor de agua y están compuestos por dos torres de hierro de 2.5 metros de altura y 0.29 metros de diámetro y peso calculado de 185.853 kg (Anexo 8, Tabla 36). Así mismo, se consideró un tanque de almacenamiento de 1 m<sup>3</sup> de capacidad y 299.016 kg de peso calculado (Anexo 8, Tabla 37).

Adicionalmente, se tomó en cuenta un aproximado de la cantidad de material para las tuberías de todo el proceso, detallado en el Anexo 8, Tabla 38.

### *Almacenamiento*

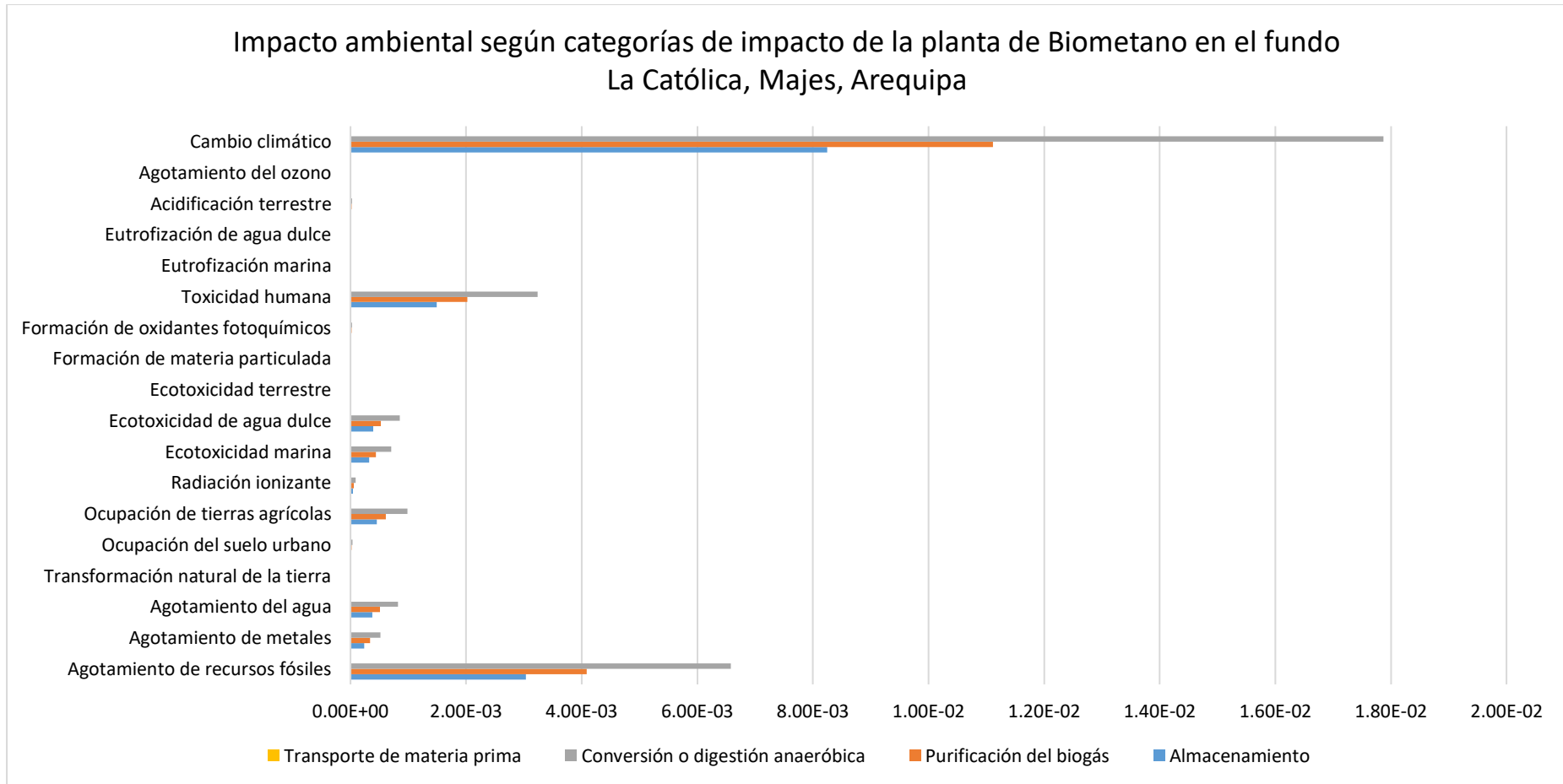
En el proceso de almacenamiento, se consideró como maquinaria un compresor DIDWANIA modelo SF-5/200 de 4 kW de potencia y 568 kg de peso (Anexo 9, Tabla 39), que fue diseñado en India y fabricado en China. Este dispositivo se utiliza principalmente para la compresión y llenado de gas natural a 200 bar de presión en vehículos, con un tiempo de llenado de entre 3-6 horas. El compresor contiene en su interior un motor a prueba de explosión, un control de caja, un ventilador de

refrigeración, un sistema de separación de aire y gas, tuberías, componentes de seguridad y bastidor. El gas pasa por cuatro etapas hasta su compresión (Peña, *et ál.*, 2018a).

#### ***4.1.2.4. Evaluación de Impacto e interpretación***

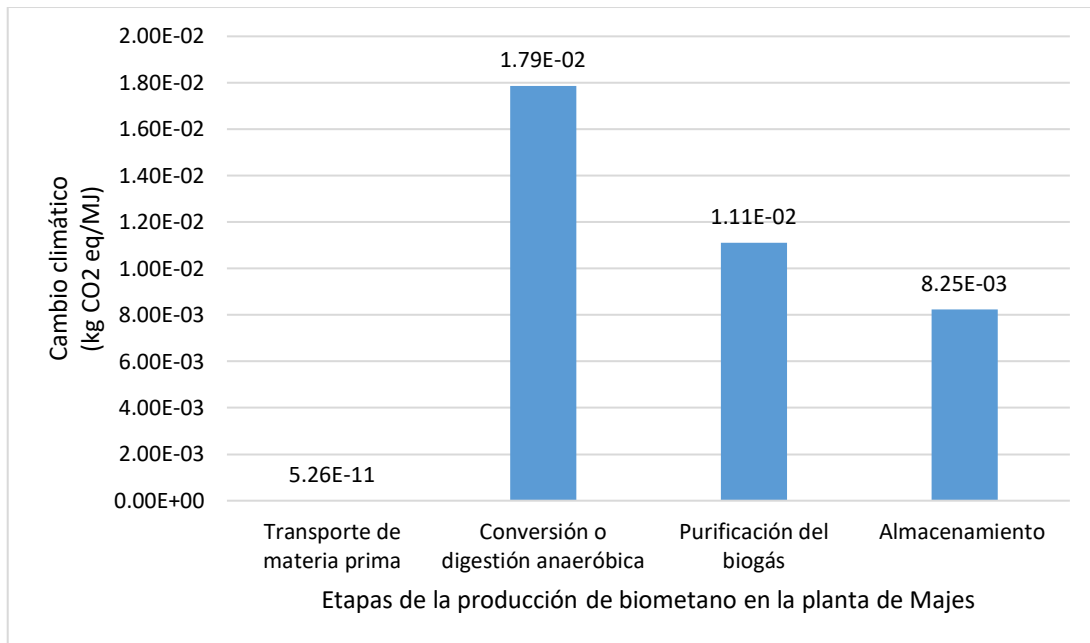
Los resultados generales de la evaluación de impacto de ciclo de vida de la planta de biometano del fundo La Católica respecto a las 18 categorías de impacto del método de evaluación utilizado, ReCiPe midpoint (H), se muestran en la Figura 15 y en el Anexo 11, Tabla 42. Estos indicaron que el proceso, en la producción de biometano, que genera un mayor impacto en todas las categorías es el de conversión. Así mismo, se muestra que el transporte de la materia prima no presenta valores significativos, esto se debe a la corta distancia que recorre desde el establo hasta la planta de biogás.

A continuación, se mencionan las cantidades resultantes que representan al proceso de conversión en las categorías de impacto, siendo las más relevantes la de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles, las cuales serán detallados posteriormente. En la categoría de toxicidad humana de generaron  $3.24E-03$  kg 1,4-DB eq/MJ-Biometano, en la ecotoxicidad de agua dulce se generó  $8.49E-04$  kg 1,4-DB eq/MJ-Biometano, en la ecotoxicidad marina resultó  $7.02E-04$  kg 1,4-DB eq/MJ-Biometano, en la ocupación de tierras agrícolas se ocuparon  $9.84E-04$  m<sup>2</sup>a/MJ-Biometano, en el agotamiento del agua se consumieron  $8.18E-04$  m<sup>3</sup>/MJ-Biometano y en el agotamiento de metales resultó  $5.17E-04$  kg Fe eq/MJ-Biometano.

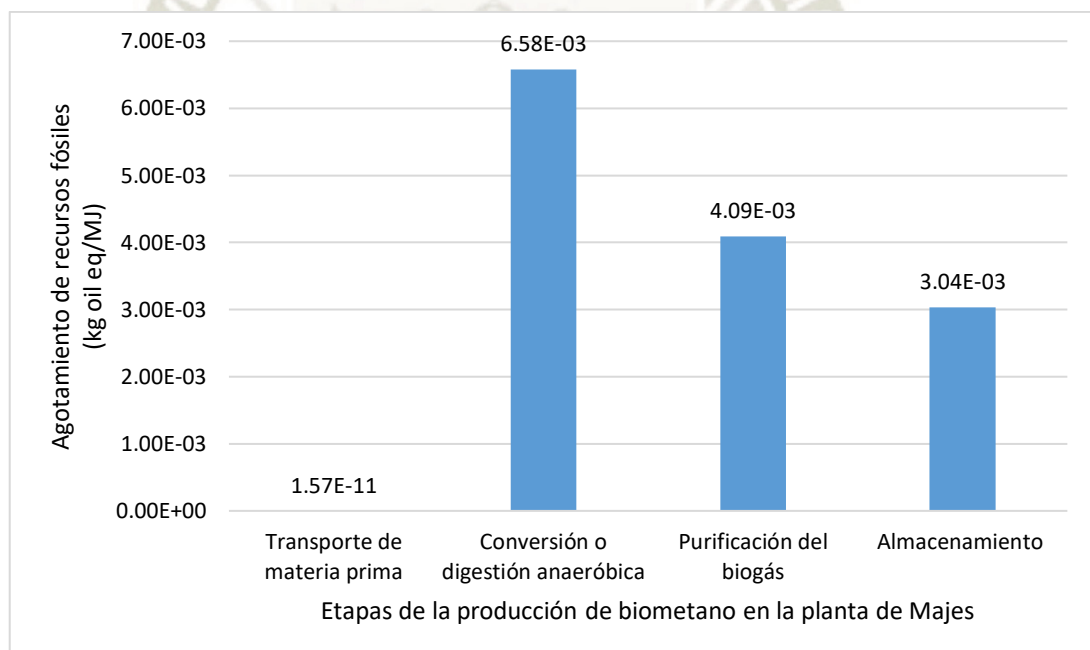


**Figura 15:** Resultados de la evaluación de ciclo de vida de la planta de biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa en el software SimaPro.

**Fuente:** (SimaPro, 2020).



(a)



(b)

**Figura 16.** Resultados de la evaluación de ciclo de vida según categorías de impacto de la planta de biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa: a) Cambio climático; b) Agotamiento de recursos fósiles.

**Fuente:** (SimaPro, 2020).

Según Ferreira *et ál.* (2019), debido a la gran diversidad de supuestos metodológicos en los estudios de ACV de bioenergía, los casos específicos y la dependencia de datos regionales como las condiciones ambientales y la política de cada país, la comparación directa de los resultados de un estudio sería debatible. No obstante, a modo de comparar la tendencia de carga ambiental, en la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en este estudio, así como resultados obtenidos en otros estudios de análisis de ciclo de vida del biometano.

**Tabla 11.** Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano

Estudio	Unidad	Proceso			
		Transporte de materia prima	Conversión o digestión anaeróbica	Purificación del biogás	Almacenamiento
Categoría: Cambio climático					
Este estudio	kg CO <sub>2</sub> eq	5.26E-11	1.79E-02	1.11E-02	8.25E-03
Florio <i>et ál.</i> (2019)	%	-	33	5	-
Ardolino & Arena (2019)	%	7	72	21	-
Koido <i>et ál.</i> (2018)	kg CO <sub>2</sub> eq	0.061	4.406	2.01	0
Ravina & Genon (2015)	tCO <sub>2</sub> eq	-	0.355	0.063	-
Categoría: Agotamiento de recursos fósiles					
Este estudio	kg oil eq	1.57E-11	6.58E-03	4.09E-03	3.04E-03
Florio <i>et ál.</i> (2019)	%	-	10	3	-
Ardolino & Arena (2019)	%	0	78	22	-

**Fuente:** Elaboración propia



Es importante mencionar que el biometano es un combustible novedoso cada vez más aplicado en el sector transporte. Sin embargo, a la fecha no existe suficiente conocimiento sobre los aspectos ambientales. Los siguientes autores coinciden con esto puesto que manifiestan que debido al cambio climático y al agotamiento del petróleo, los combustibles fósiles están siendo reemplazados por alternativas renovables para la reducción de GEI y para garantizar el suministro de energía a largo plazo (Unrean, Lai Fui, Rianawati, & Acda, 2018). Entre estas alternativas, existe un creciente interés en el uso del biometano en el sector transporte, por los diferentes beneficios ambientales mencionados (Ardolino, Parrillo, & Arena, 2018). No obstante, dado que el biometano es una aplicación bastante novedosa, existe una falta sustancial de conocimiento sobre los aspectos ambientales relacionados con su producción, tecnologías y aplicación (Ravina & Genon, 2015).

En la categoría de cambio climático específicamente, presentada en la Figura 16.a, la emisión total de CO<sub>2</sub> de la planta de biometano del fundo La Católica en Majes, Arequipa fue de 3.72E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano producido. En la Tabla 11 se evidencia cierta relación entre los resultados obtenidos en este estudio con los de otros estudios. Al igual que en los estudios de Florio *et ál.* (2019), Ardolino & Arena (2019), Koido *et ál.* (2018) y Ravina & Genon (2015), el proceso de conversión o digestión anaeróbica fue el que presentó la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, resultando en este estudio 1.79E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano, seguido por la purificación, resultando en este estudio 1.11E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano y finalmente el transporte de la materia prima, resultando en este estudio 5.26E-11 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano. La diferencia radica en que los estudios presentados no incluyeron el proceso de almacenamiento, mientras en el estudio sí, resultando 8.25E-03 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano.

Se sabe que en el proceso de conversión o digestión anaeróbica se genera el biogás como producto y el digestato y biol como un coproducto. En este estudio, se considera que el biogás es el único producto generado en dicho proceso, y se excluye al digestato porque no participa en el proceso de producción del biometano y por la incertidumbre de la información disponible sobre este. Por lo tanto, ninguno de los impactos del proceso de conversión fue asignado al digestato, al igual que en el

estudio de Lyng & Brekke (2019), aumentando así la carga ambiental al biogás en el proceso de conversión en todas las categorías.

No obstante, si el digestato fuese utilizado como fertilizante en las actividades de agricultura del fundo La Católica y existiesen registros sobre tal actividad, los impactos del proceso de conversión podrían asignarse a ambos productos, biogás y digestato, en vez de solo a uno. Dentro de este marco, en el estudio de Koido *et ál.* (2018) se considera y aprovecha este digestato para la fertilización de cultivos locales de higo, generando adicionalmente beneficios económicos.

En la producción del biometano, se identificó que el consumo de energía eléctrica tiende a ser una gran fuente de GEI como en los estudios de Koido *et ál.* (2018), Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018) y Collet *et ál.* (2017). Incluso, en el estudio de Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018) se resalta que, al reemplazar el uso del diésel con biometano, tanto en el sector transporte como en el de energía en los procesos de producción del diésel, puede no tener ningún beneficio ambiental significativo si es que la electricidad utilizada en los procesos del biometano proviene de mezclas de red intensivas en carbono o fuentes no renovables. En este caso, la planta de biometano ubicada en Majes es abastecida por energía proveniente de la central hidroeléctrica Sigwas, mediante la empresa SEAL - Sociedad Eléctrica del Sur Oeste S.A., según el Plan de Desarrollo Local Concertado 2016-2021 (Gobierno Regional de Arequipa, 2016).

Por un lado, en el último inventario nacional realizado sobre gases de efecto invernadero en el 2014, la energía hidroeléctrica se incluye como un recurso energético renovable y no es considerada una fuente de emisiones de GEI por su baja contribución. Por otro lado, en el informe del IPCC sobre fuentes de energía renovables, se estima un valor entre 4 y 14 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, debido a que todos los sistemas artificiales o naturales de agua dulce pueden emitir GEI debido a la materia orgánica que se descompone (Gielen, *et ál.*, 2019; IPCC, 2011). En tal sentido, se explica la alta carga ambiental en los procesos de conversión y purificación, que es donde se utiliza una mayor cantidad de maquinarias y, por lo tanto, donde existe una mayor contribución del consumo de la energía eléctrica. Generalmente, la mayor

cantidad de emisiones de GEI del ciclo de vida de un producto se asocian a la combustión del carbón, por lo cual, si es que la energía eléctrica utilizada para el procesamiento del biometano fuese proveniente de una fuente de carbono, las emisiones ascenderían entre 675 a 1689 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, o de 710 a 950 g CO<sub>2</sub> eq/kWh si se tratase de una planta moderna de energía de carbón duro, mientras que una planta de energía de gas natural tiene emisiones de entre 410 y 650 g CO<sub>2</sub> eq/kWh, con alta variabilidad e incertidumbre (Bruckner *et ál.*, 2014).

En cuanto a los resultados de la categoría de agotamiento de recursos fósiles, presentados en la Figura 16.b y comparados en la Tabla 11, al igual que en la categoría de cambio climático, se evidencia cierta relación entre los resultados obtenidos en este estudio con los de otros estudios. Así como en los estudios de Florio *et ál.* (2019) y Ardolino & Arena (2019), el proceso de conversión resultó con una mayor carga ambiental o, en este caso, es el proceso en el que se agota la mayor cantidad de recursos fósiles, resultando en este estudio 6.58E-03 kg oil eq/MJ-Biometano, seguido por la purificación del combustible, resultando en este estudio 4.09E-03 kg oil eq/MJ-Biometano y el transporte de la materia primera con un valor poco significativo por la corta distancia recorrida. Nuevamente, la diferencia radica en que en otros estudios no se incluyó el almacenamiento, mientras que en este estudio resultó 3.04E-03 kg oil eq/MJ-Biometano.

Se identificó que el mayor agotamiento de combustibles en el proceso de conversión fue debido a la gran infraestructura utilizada en dicho proceso y al peso de sus materiales, lo que significó un gasto de combustibles fósiles en el transporte para su movilización hasta el fundo La Católica, en especial dos los contenedores de metal y los tanques de hidrólisis, que son la infraestructura y el equipo más pesados, respectivamente. En ese marco, según Mezzullo *et ál.* (2013), quien trabajó analizando una planta de biometano, la infraestructura de la planta tiende a contribuir a los impactos del ciclo de vida completo.

En cuanto al software utilizado, así como en este caso, muchas empresas han empezado a introducir el concepto de pensamiento de ciclo de vida en sus organizaciones, procesos y productos. No obstante, en la actualidad existen tantas

herramientas diferentes para el desarrollo del ACV que tiende a ser tedioso saber cuál es la más adecuada (Ormazabal, Jaca, & Puga-Leal, 2014).

A pesar de que en algunos estudios, como en el de (Chan Gutiérrez, *et ál.*, 2018) y (Collet, *et ál.*, 2017), se prefiera realizar el estudio de huella de carbono con los factores de cálculo del IPCC para la medición de las emisiones de GEI, evaluando únicamente el potencial de calentamiento global de una organización, producto, proyecto o servicio (Watterson, 2014), en este estudio se optó por el uso del software SimaPro para el cálculo de la evaluación del ciclo de vida, así como en otros estudios donde se trató igualmente temas de combustibles en el sector transporte (Ardolino & Arena, 2019; Florio, *et ál.*, 2019; Lyng & Brekke, 2019; Ardolino, Parrillo, & Arena, 2018; Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, 2018; Unrean, Lai Fui, Rianawati, & Acda, 2018; Mezzullo, McManus, & Hammond, 2013), entre otros, debido a que abarca todo el ciclo de vida del producto estudiado bajo múltiples categorías de impacto ambiental, sin excluir el hecho que aun con el software elegido se puede calcular también la huella de carbono.

Finalmente, incluso utilizando las mejores herramientas y software para un estudio, según Lyng & Brekke (2019), el efecto de la falta de datos en el inventario de ciclo de vida es difícil de cuantificar, el desarrollo de un buen estudio de ACV depende de la correcta y confiable calidad de datos que los encargados y operadores de la planta puedan brindar. Mencionado hecho no faltó en este estudio y provocó que sea trabajado con datos de producción en condiciones óptimas y de fuentes bibliográficas. Por ejemplo, el estudio se basó en una producción óptima del biometano del 2018 y no en la producción real de algún año en específico debido a que no se hallaron registros oficiales sobre las producciones anuales pasadas. Muchos datos fueron brindados de manera verbal por parte de los investigadores y encargados de la planta.

Así mismo, el estudio se centró en un enfoque del pozo al tanque y no en uno del pozo a la rueda, debido a la ausencia de datos, y de la posibilidad actual de aplicación del biometano como combustible en un vehículo del sector transporte. Adicionalmente, los siguientes datos fueron apoyados bibliográficamente o

promediados debido a la ausencia de datos reales en la planta: la producción anual del biometano comprimido, el consumo eléctrico de las maquinarias radiador y enfriador, el peso de los materiales que componen los contenedores de metal, el tanque de hidrólisis, el biodigestor de geomembrana, el reservorio de gas, la estructura de hierro, los filtros scrubber y de tipo PSA y el tanque de almacenamiento.

#### 4.1.3. Comparación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, con el diésel y el gas natural como combustibles en el sector transporte en la ciudad de Arequipa utilizando el software SimaPro 9.0.0.48 y la base de datos Ecoinvent 3.6

Se trabajó un ACV comparativo para la identificación de la alternativa con menor impacto ambiental entre los cuatro sistemas evaluados, entre ellos los combustibles biometano producido en el fundo La Católica, el biometano con datos extraídos de la base de datos Ecoinvent, el diésel de bajo azufre y el gas natural vehicular, igualmente, de Ecoinvent. En las Tablas 12, 13 y 14, se describen los procesos y datos empleados que fueron extraídos de Ecoinvent para cada combustible para el cálculo del análisis de ciclo de vida comparativo.

**Tabla 12.** Procesos de la base de datos Ecoinvent para el diésel

<b>Etapas de ciclo de vida</b>	<b>Procesos y datos de Ecoinvent</b>
Extracción, transporte y producción	Proceso de Ecoinvent: “Operación de refinería de petróleo, ROW” *
Transporte y distribución	Proceso de Ecoinvent: “Diesel, bajo contenido de azufre, ROW” *

**Fuente:** Elaboración propia

\*Terminología obtenida en Ecoinvent

**Tabla 13.** Procesos de la base de datos Ecoinvent para el gas natural

<b>Etapas de ciclo de vida</b>	<b>Procesos y datos de Ecoinvent</b>
Extracción, transporte y	Proceso de Ecoinvent: “Gas natural, alta presión,

producción	ROW” *
Transporte y distribución	Proceso de Ecoinvent: “Gas natural, alta presión, ROW” * donde las emisiones de la producción del diésel son removidas.

**Fuente:** Elaboración propia

\*Terminología obtenida en Ecoinvent

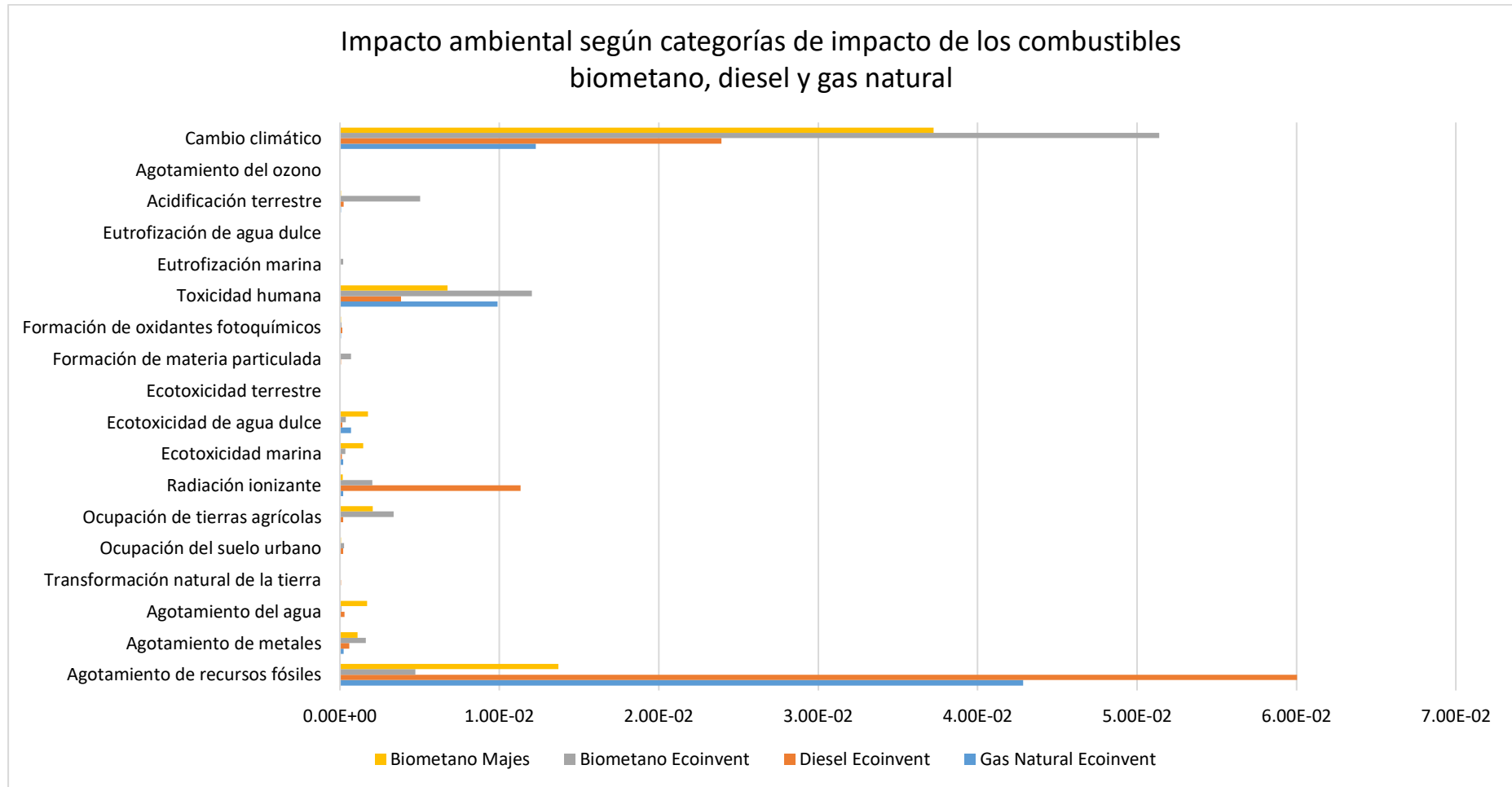
**Tabla 14.** Procesos de la base de datos Ecoinvent para el biometano

<b>Etapas de ciclo de vida</b>	<b>Procesos y datos de Ecoinvent</b>
Extracción, transporte y producción	Procesos de Ecoinvent: “Digestión anaeróbica del estiércol, ROW” *, donde el mix energético fue adaptado al contexto peruano, y “metano al 96% por volumen de biogás de alta presión” *. No se incluyeron las emisiones del corto tiempo de almacenamiento de la materia prima.
Transporte y distribución	Proceso de Ecoinvent: “Gas natural, alta presión, ROW”, donde las emisiones de la producción del diésel son removidas.

**Fuente:** Elaboración propia

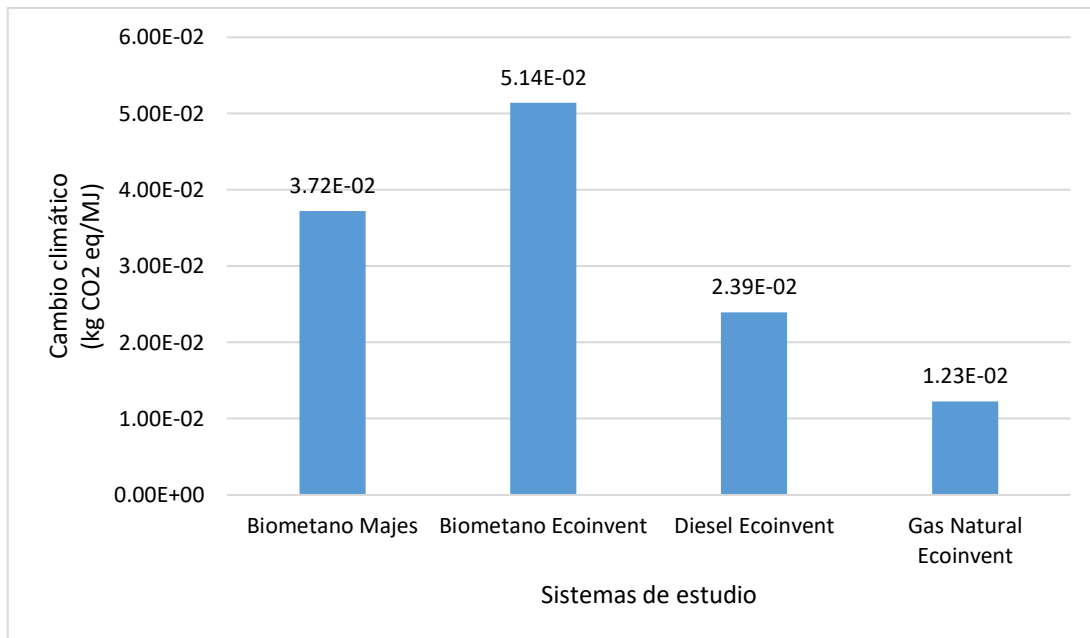
\*Terminología obtenida en Ecoinvent

Los resultados obtenidos de la comparación de la evaluación del impacto de ciclo de vida de los combustibles biometano, diésel y gas natural, se presentan en la Figura 17 y con más detalle en el Anexo 11, Tabla 43. En estos resultados se exponen las 18 categorías principales de impacto de la metodología de impacto ReCiPe midpoint (H), de las cuales, las que muestran valores significativos son la categoría de cambio climático y el agotamiento de recursos fósiles. Así mismo, en varias categorías, se presenta un buen desempeño ambiental para el gas natural, seguido por el biometano producido en el fundo La Católica.

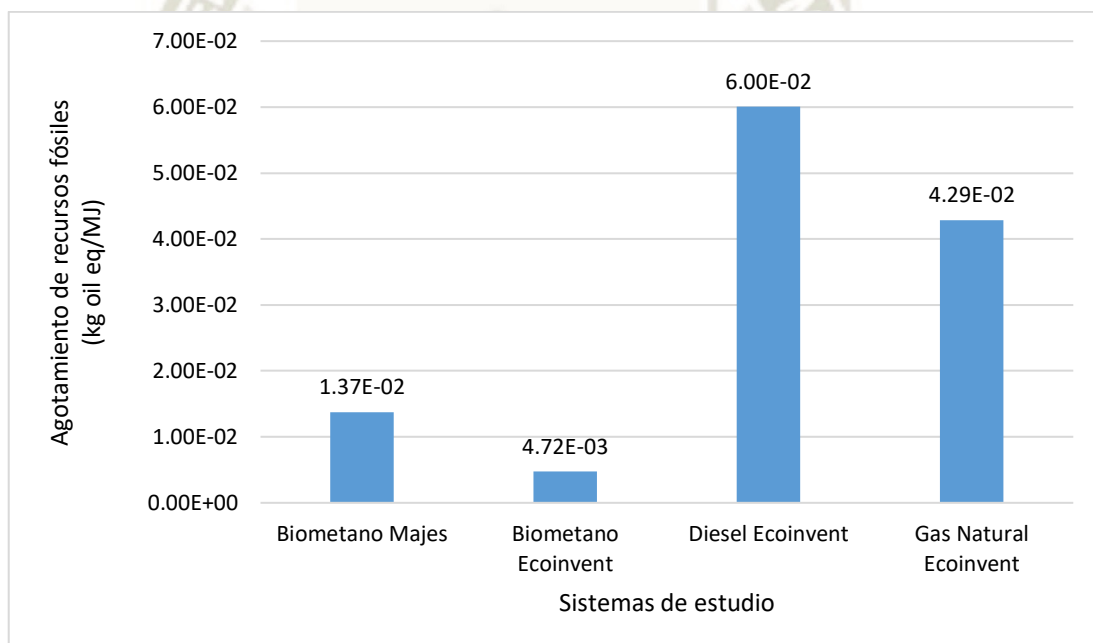


**Figura 17.** Resultados de la comparación de la evaluación de ciclo de vida de los combustibles biometano del fundo La Católica, biometano de Ecoinvent, diésel de Ecoinvent y gas natural de Ecoinvent.

**Fuente:** (SimaPro, 2020).



(a)



(b)

**Figura 18.** Resultados de la comparación de la evaluación del impacto de ciclo de vida según categorías de impacto de los sistemas de estudio: a) Cambio climático; b) Agotamiento de recursos fósiles.

**Fuente:** (SimaPro, 2020).

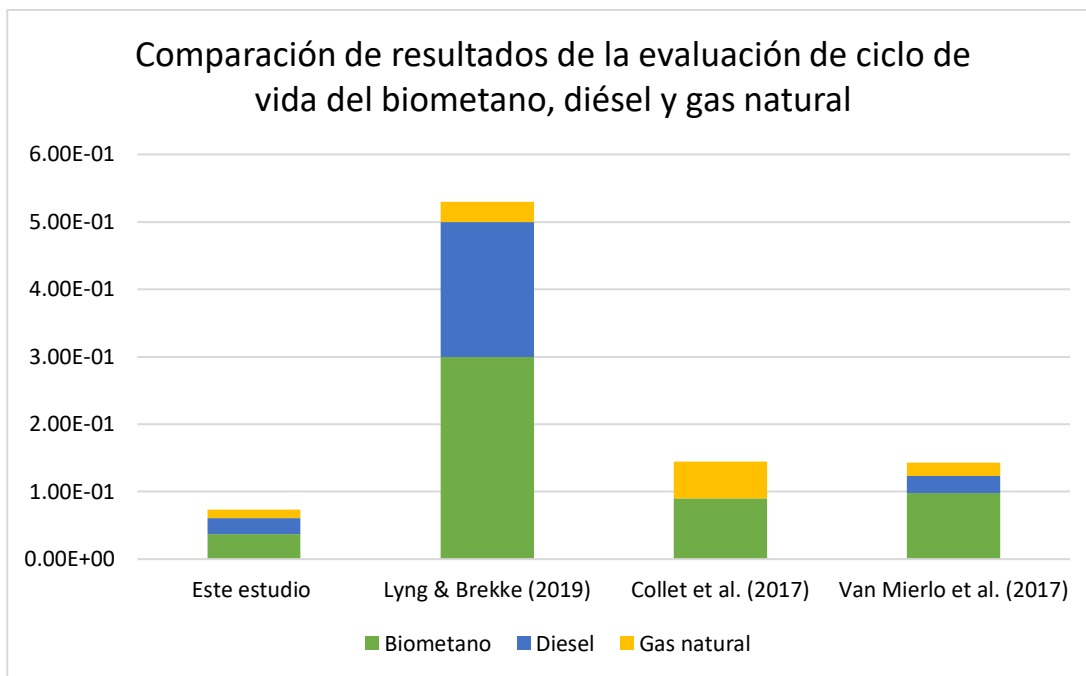


A manera de comparar la tendencia de carga ambiental de los combustibles, en la Tabla 15 así como en la Figura 19 se presentan los resultados obtenidos en este estudio, así como resultados obtenidos en otros estudios en los que comparan el análisis de ciclo de vida del biometano, diésel y gas natural.

**Tabla 15.** Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano, diésel y gas natural

Estudio	Unidad	Combustible		
		Biometano	Diésel	Gas natural
Categoría: Cambio climático				
Este estudio	kg CO <sub>2</sub> eq	3.72E-02	2.39E-02	1.23E-02
Collet <i>et ál.</i> (2017)	kg CO <sub>2</sub> eq	9.00E-02	-	5.50E-02
Lyng & Brekke (2019)	kg CO <sub>2</sub> eq	3.00E-01	2.00E-01	3.00E-02
Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, (2017)	kg CO <sub>2</sub> eq	9.80E-02	2.50E-02	2.0E-02
Categoría: Agotamiento de recursos fósiles				
Este estudio	kg oil eq	1.37E-02	6.00E-02	4.29E-02
Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018)	%	8	100	-

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 19.** Comparación de resultados de la evaluación de ciclo de vida del biometano, diésel y gas natural respecto a la categoría de cambio climático

**Fuente:** Elaboración propia

En la categoría de cambio climático, presentada en la Figura 18.a, se evidencia relación con los resultados obtenidos en otros estudios, como se muestra en la Tabla 15 y en la Figura 19. Al igual que en los estudios de Lyng & Brekke (2019), Collet *et al.* (2017) y Van Mierlo, Messagie, & Rangaraju, (2017), el combustible que generó la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> fue el biometano, resultando en este estudio 5.14E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano de Ecoinvent y 3.72E-02 C0<sub>2</sub> kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano del fundo La Católica, seguido por el diésel, resultando en este estudio 2.39E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-diésel y finalmente, el gas natural, resultando en este estudio 1.23E-02 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-gas natural, el cual generó el menor impacto en la categoría. La diferencia de datos radica en el tamaño de las plantas de procesamiento del combustible que fueron analizadas en cada estudio, la ubicación geográfica y la unidad funcional.

Los resultados muestran un buen desempeño ambiental para el gas natural, en comparación a los demás combustibles estudiados, incluso mejor que el biometano. Según Collet *et al.* (2017), esto se debe a que el biometano no se recupera ni se inyecta en la red de gas cuando la planta no está en operación, generalmente se

quema con la finalidad de reducir las emisiones directas de metano, generando así que las emisiones de CO<sub>2</sub> sean más elevadas para el combustible biometano que para el proceso continuo que tiene el gas natural y el diésel.

Adicionalmente, se identificó que esto se debe, principalmente, a dos aspectos importantes: el nivel de producción y la infraestructura, explicados a continuación.

En el caso del biometano del fundo La Católica, la producción es limitada para el nivel de infraestructura que posee, por lo que esto representa un mayor cargo ambiental de la planta en las cantidades producidas combustible. Según Koido *et ál.* (2018), el parámetro más sensible es el nivel de producción de la planta que, sobre todo en el biometano, debe mantenerse alto para una operación viable. Además, según Mezzullo *et ál.* (2013) la infraestructura de la planta tiende a contribuir a los impactos del ciclo de vida completo del combustible estudiado. Por otro lado, en cuanto al gas natural e incluso el diésel, la cantidad de producción y el tamaño de la infraestructura destinada para sus procesos de extracción y producción son de grandes dimensiones industriales, en las cuales se distribuye la carga ambiental.

En caso se incremente el tamaño de la planta de biogás, así como su producción, convirtiéndose en una planta industrial que dé abasto a una gran población, así como actualmente lo son el diésel y gas natural (Osinergmin, 2015; Osinergmin, 2014), entonces, al igual que los combustibles fósiles mencionados, la carga ambiental tendería a distribuirse en la planta (Koido *et ál.*, 2018; Mezzullo *et ál.* 2013).

Adicionalmente, se obtuvo que el biometano de ecoinvent genera una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que el biometano del fundo La Católica, esto se debe a que en el segundo caso no se consideraron las fugas de metano como en el estudio de Chan *et ál.* (2018) por la inexistencia de registros en la planta. Sin embargo, en el escenario del biometano de ecoinvent, estas fugas se incluyeron por defecto de la base de datos. Según Liebetrau *et ál.* (2017), a pesar de ser muy difícil dar cifras generales promedio de las emisiones de metano de alguna planta de biogás, las mediciones en diferentes plantas coinciden en alguna fuga considerable de metano en los procesos del combustible, lo cual eleva la carga ambiental en dicha planta.

Por otra parte, se identificó que el biometano deecoinvent resultó tener un mayor impacto que el diésel y el gas natural debido a que los datos empleados para dicho biometano son un promedio de la producción del combustible en otros países (generados por Ecoinvent), con el mix energético peruano (adaptación de este estudio). Por lo que, debido a que el biometano industrial no es producido en el Perú, se generó un promedio de las distancias recorridas por el combustible desde las plantas de biometano en Europa (Hijazi, Munro, Zerhusen, & Effenberger, 2016) y Norteamérica (Beil & Beyrich, 2013) hasta el Perú para su distribución, incrementando así las emisiones de CO<sub>2</sub> por el transporte empleado.

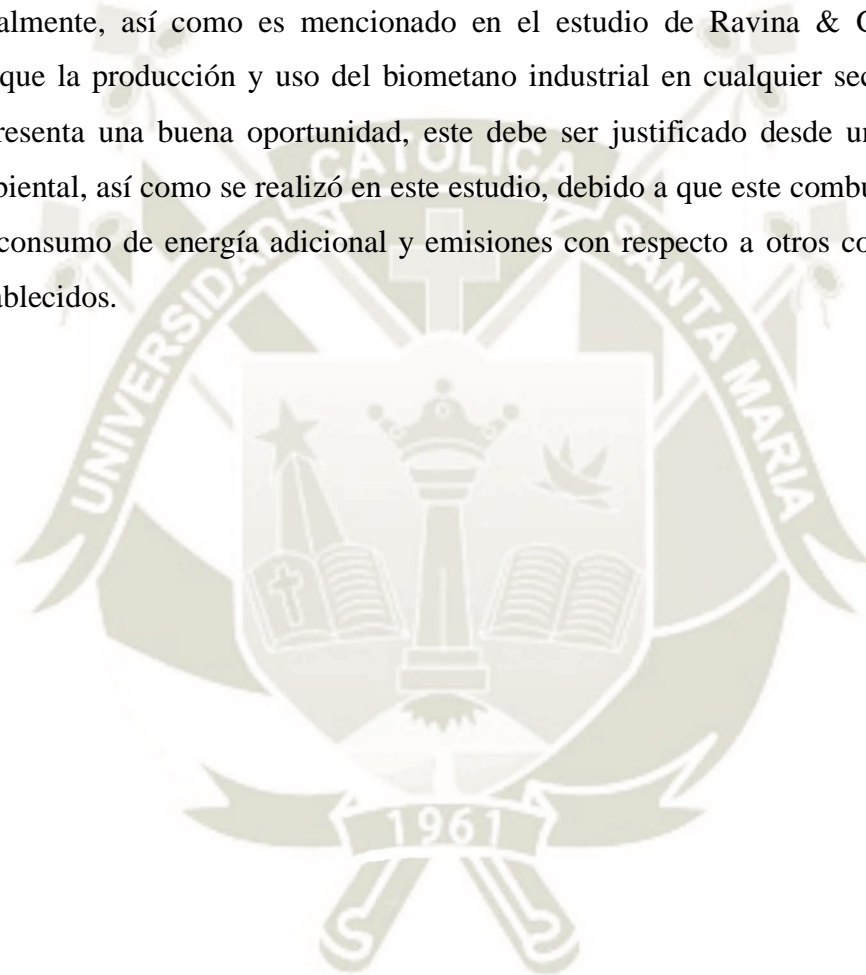
Mientras que, las plantas industriales de diésel y gas natural se encuentran en el interior del país (Osinergmin, 2015; Osinergmin, 2014) reduciendo así las emisiones por transporte de estos combustibles. En este marco, Lyng & Brekke (2019) establecieron que la distancia del transporte es uno de los aspectos que tiene un impacto considerable en los resultados. Así mismo, Koido *et ál.* (2018) agrega que el aumento del impacto dependerá no solo de la distancia, sino también de la eficiencia del transporte que se emplee.

En cuanto a los resultados de la categoría de agotamiento de recursos fósiles, presentados en la Figura 18.b, se evidencia cierta relación con el estudio de Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018), como se muestra en la Tabla 15. La diferencia radica en que en el estudio de Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018) no se considera el gas natural. En este estudio, el combustible que agota la mayor cantidad de recursos fósiles es el diésel, resultando 6.00E-02 kg oil eq/MJ-diésel, seguido por el gas natural, que resultó 4.29E-02 kg oil eq/MJ-gas natural, el biometano de la planta del fundo la Católica, que resultó 1.37E-02 kg oil eq/MJ-Biometano y finalmente el biometano proveniente de Ecoinvent, que resultó 4.72E-03 kg oil eq/MJ-Biometano.

Se identificó que, al igual que en el estudio de Shanmugam, Tysklind, & Upadhyayula, (2018), los combustibles fósiles generan mayor agotamiento de los mismos debido a que se requiere de estos tanto para la extracción, el transporte de materia prima y la producción (operación de maquinarias). Mientras que, para el biometano, los recursos fósiles se agotan únicamente en el transporte de material

prima, mas no existe un agotamiento en el uso debido a que se trata de un combustible renovable. Así mismo, el biometano producido en el fundo La Católica tiene un mayor agotamiento de recursos fósiles que el biometano que es extraído de la base de datos Ecoinvent porque el nivel de producción en el primero es mucho menor, recayendo así una mayor carga ambiental sobre dicho combustible a diferencia del segundo.

Finalmente, así como es mencionado en el estudio de Ravina & Genon (2015), aunque la producción y uso del biometano industrial en cualquier sector en el país representa una buena oportunidad, este debe ser justificado desde una perspectiva ambiental, así como se realizó en este estudio, debido a que este combustible implica un consumo de energía adicional y emisiones con respecto a otros combustibles ya establecidos.



## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

PRIMERA. Se elaboró el diagnóstico situacional del uso del biometano, diésel y gas natural en el sector transporte en la ciudad de Arequipa, donde se determinó que el combustible más usado es diésel, seguido por el gas natural vehicular y, finalmente el biometano comprimido, el cual no tiene uso alguno excepto para fines educativos y de investigación en la Universidad Católica de Santa María.

SEGUNDA. Se evaluó el Análisis de Ciclo de Vida del biometano con datos de producción en condiciones óptimas obtenidos de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes como combustible en el sector transporte, de acuerdo a las ISO 14040 y 14044 (2006), y resultó que dicha planta generó un total de  $3.72E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano producido, siendo el proceso de conversión o digestión anaeróbica el que generó la mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> ( $1.79E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano) y el mayor agotamiento de recursos fósiles ( $6.58E-03$  kg oil eq/MJ-Biometano) a comparación de los otros procesos en la producción del combustible, debido al consumo energético y al transporte de la infraestructura, respectivamente.

TERCERA. Se realizó la comparación del Análisis de Ciclo de Vida del biometano obtenido de la planta experimental del Fundo La Católica en Majes, el biometano basado en datos de Ecoinvent 3.6, el diésel y el gas natural, igualmente de Ecoinvent como combustibles en el sector transporte en Arequipa, donde se determinó que, el gas natural generó la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> ( $1.23E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-GN), seguido por el diésel ( $2.39E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-diésel), el biometano del fundo La Católica ( $3.72E-02$  kg CO<sub>2</sub> eq/MJ-Biometano), debido al nivel de producción, a la infraestructura de la planta de procesamiento, a la distancia del transporte y a las fugas existentes. Así mismo, el biometano consumió la menor cantidad de recursos fósiles ( $1.37E-02$  kg oil eq/MJ-Biometano), seguido por el gas natural ( $4.29E-02$  kg oil eq/MJ-GN) y el diésel ( $6.00E-02$  kg oil eq/MJ-diésel).

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Considerar los resultados obtenidos en este estudio para la toma de decisiones en futuros proyectos o normativas sobre el uso de los combustibles biometano, diésel o gas natural en el sector transporte, complementándolos con análisis sociales y económicos.
- Mantener el inventario actualizado de manera constante y detallada, ya que el efecto de la falta de datos en el inventario de ciclo de vida es difícil de cuantificar y el desarrollo de un buen estudio de ACV depende de la correcta y confiable calidad de datos que los encargados y operadores de la planta puedan brindar.
- Evaluar a mayor precisión los impactos sobre los cuerpos de agua cercanos a las plantas de procesamiento, el cambio de uso de suelo, daño a los ecosistemas, seres vivos o a la salud de las personas.
- Realizar una expansión del sistema de estudio a partir de datos secundarios sobre el uso del combustible en vehículos en Arequipa y analizar desde un enfoque del pozo a la rueda o “*well to wheel*” (WTW).
- Realizar el análisis de ciclo de vida de otros combustibles en el sector transporte en el Perú y compararlo con el biometano producido por la UCSM.
- Mejorar, controlar y registrar con más periodicidad y organización el nivel de producción del biogás y del biometano, así como de las materias primas y coproductos de la planta de biometano del fundo La Católica. Así mismo, mantener una base de datos permanente y actualizada de donde se pueda obtener información del biometano producido por la UCSM, con fines educativos o de investigación.
- Fomentar el continuo uso de biometano en el sector transporte en Arequipa para que este no se almacene o finalmente se desperdicie, generando así una mayor emisión de gases de efecto invernadero.

- Manejar el digestato, que es el coproducto de la digestión anaeróbica, para su venta y uso como biofertilizante para añadir viabilidad ambiental y económica a la planta.
- Realizar un levantamiento de información respecto al uso de combustibles fósiles y renovables en la ciudad de Arequipa a nivel de detalle que se pueda ingresar a la base de datos.





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academic Press. (2019). Conditions and development potential of energy resources. In Y. Zhang, F. Zhang, S. Wu, B. Yuan, J. Feng, G. Fu, . . . L. Chen (Eds.), *Non-Fossil Energy Development in China* (pp. 81-126). doi:10.1016/B978-0-12-813106-0.00004-0
- Aceros Arequipa. (2008). *Fierro Corrugado ASTM A615-GRADO 60 NTP 341.031-GRADO 60*. Arequipa.
- Ali, B., Yusup, S., Quitain, A. T., Bokhari, A., Kida, T., & Chuah, L. F. (2019). Heterogeneous Catalytic Conversion of Rapeseed Oil to Methyl Esters: Optimization and Kinetic Study. In *Advances in Feedstock Conversion Technologies for Alternative Fuels and Bioproducts. New Technologies, Challenges and Opportunities. Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 221-238). doi:10.1016/B978-0-12-817937-6.00012-6
- Alzamora, Y., Villar, P., & González-Delgado, Á. (2015). Evaluación ambiental de la producción de combustibles fósiles y renovables: avances y perspectivas. *Universidad de San Buenaventura*. Retrieved from <https://bit.ly/34bPBbh>
- Ardolino, F., & Arena, U. (2019). Biowaste-to-Biomethane: An LCA study on biogas and syngas roads. *Waste Management*, *87*, 441-453. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.030>
- Ardolino, F., Parrillo, F., & Arena, U. (2018). Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 462-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320>
- Avadí, A., Fréon, P., & Quispe, I. (2014). Environmental assessment of Peruvian anchoveta food products: Is less refined better? *International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(6), 1276-1293. doi:10.1007/s11367-014-0737-y

- Avadí, A., Henriksson, P., Vázquez-Rowe, I., & Ziegler, F. (2018). Towards improved practices in Life Cycle Assessment of seafood and other aquatic products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(5), 979-981. doi:10.1007/s11367-018-1454-8
- Azapagic, A. (2018). Environmental Systems Analysis. In M. Kutz (Ed.), *Handbook of Environmental Engineering* (pp. 1-11).
- Azapagic, A., & Perdan, S. (2014). Sustainable chemical engineering: dealing with wicked sustainability problems. *AIChE Journal*, 60(12), 3998-4007.
- Bächtold, E. (2014). *Comité Técnico ISO/TC 207. Sistemas de Gestión Ambiental (Huella de Carbono y huella de agua)*. Mexico: QS Mexiko AG. Retrieved from [https://www.ema.org.mx/descargas\\_evento\\_dma/ovv/HuellaAguaYCarbono2014.pdf](https://www.ema.org.mx/descargas_evento_dma/ovv/HuellaAguaYCarbono2014.pdf)
- Barba, C., Dyckmans, J., Förster, J., & Schnekenburger, T. (2017). Natural gas-Diesel dual fuel for commercial vehicle engines. (J. Liebl, & C. Beidl, Eds.) *Internationaler Motorenkongress 2017. Proceedings. Springer Vieweg, Wiesbaden*. doi:10.1007/978-3-658-17109-4\_23
- Barrett, T., Evans, E., Griffiths, C., & Perry, R. (2017). Wind energy. *The Plymouth Student Scientist*, 10(1), 292-300. Retrieved from [hdl.handle.net/10026.1/14147](http://hdl.handle.net/10026.1/14147)
- Bartolozzi, I., Rizzi, F., & Frey, M. (2013). Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: a case study in Tuscany, Italy. *Appl. Energy*, 101, 103-111.
- Bassam, N. E., Maegaard, P., & Schlichting, M. L. (2013). Chapter Eight - Wind Energy. In *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities. Strategies and Technologies toward Achieving Sustainability in Energy Generation and Supply* (pp. 111-123). doi:10.1016/B978-0-12-397178-4.00008-6
- Beil, M., & Beyrich, W. (2013). Biogas upgrading to biomethane. In A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter (Eds.), *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications*. Woodhead Publishing Series in Energy (pp. 342-377). doi:10.1533/9780857097415.3.342

- Bhatia, S. C. (2014). Biogas. In *Advanced Renewable Energy Systems* (pp. 426-472).  
doi:10.1016/B978-1-78242-269-3.50017-6
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, *132*, 141-157. doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036
- Breeze, P. (2019). Chapter 13 - Solar Power. In *Power Generation Technologies (Third Edition)* (pp. 293-321). doi:10.1016/B978-0-08-102631-1.00013-4
- Bruckner, T., Bashmakov, I. A., Mulugetta, Y., Chum, H., De la Vega Navarro, A., Edmonds, J., . . . Zhang, X. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, . . . J. Minx, Eds.) *Energy Systems*. Retrieved from https://bit.ly/2Cpsswc
- Buchspies, B., Kaltschmitt, M., & Junginger, M. (2020). Straw utilization for biofuel production: A consequential assessment of greenhouse gas emissions from bioethanol and biomethane provision with a focus on the time dependency of emissions. *GCB Bioenergy*, *12*(10), 789-805. doi:10.1111/gcbb.12734
- Budzianowski, W. M., & Brodacka, M. (2017). Biomethane storage: Evaluation of technologies, end uses, business models, and sustainability. *Energy Conversion and Management*, *141*, 254-273. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.071
- Buitrago, R. (2014). *Evaluación de los efectos ambientales de la gasolina, diesel, biodiesel y etanol carburante en colombia por medio del análisis de ciclo de vida*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia .
- Buitrón, G., Cardeña, R., & Arcila, J. S. (2019). Chapter 5.9 - Bioelectrosynthesis of Methane Integrated With Anaerobic Digestion. In *Microbial Electrochemical Technology. Sustainable Platform for Fuels, Chemicals and Remediation. Biomass, Biofuels and Biochemicals* (pp. 899-919). doi:10.1016/B978-0-444-64052-9.00037-6

Cálculo web. (2020). *Dosificación para hormigón y morteros*. Retrieved from Calcular todo:

<https://bit.ly/2YENr3h>

Cancino-Espinoza, E., Vázquez-Rowe, I., & Quispe, I. (2018). Organic quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) production in Peru: Environmental hotspots and food security considerations using Life Cycle Assessment. *Science of The Total Environment*, 637–638, 221-232. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.029

Catacora, R. (2013). *Las refinerías en el Perú*. Retrieved from <https://bit.ly/2yS1g3q>

Chan Gutiérrez, E., Wall, D. M., O’Shea, R., Novelo, R. M., Gómez, M. M., & Murphy, J. D. (2018). An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 196, 852-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.051>

Chandra, R. (2018). *Calorific values of fuels*. Retrieved from <https://bit.ly/2VfvdSm>

CMNUCC. (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York.

Collet, P., Flottes, E., Favre, A., Raynal, L., Pierre, H., Capela, S., & Peregrina, C. (2017). Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas upgrading and power to gas technology. *Applied Energy*, 192, 282-295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.181>

COPEMUR. (2012). *Mejoramiento del manejo de residuos industriales líquidos en agroindustrias de la región Arequipa, utilizando tecnología de digestión anaerobia UASB*. Arequipa.

Covert, T., Greenstone, M., & Knittel, C. R. (2016). Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? *Journal of Economic Perspectives*, 30(1), 117-38. doi:10.1257/jep.30.1.117

Crabtree, G. W., & Lewis, N. S. (2015). *Solar energy conversion*. Solar thermal world. Retrieved from <https://bit.ly/3cNLAhi>

- Craggs, L., & Gilbert, P. (2018). Sustainable Greenhouse Gas Reductions From Bioenergy Systems—Climate Change: A Bioenergy Driver and Constraint. In *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems* (pp. 1-10). doi:10.1016/B978-0-08-101036-5.00001-X
- CRI Pumps. (2019). *Waste water submersible pumps – 50 Hz*. Retrieved from <http://global.crigroups.com/img/pdf/Waste-Water-Pump-CDR-CSL-SV-Series.pdf>
- Cuéllar, Y. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá [Tesis de posgrado: Universidad Nacional de Colombia]*. Retrieved from <https://bit.ly/2wV5PcH>
- DCC. (2017). *The Average Lifespan of Concrete*. Retrieved from Davis Concrete Correctors: <https://bit.ly/2SGYgxJ>
- Decreto Supremo N° 021-2007-EM. (2007, Abril). *Reglamento de la Ley N° 28054 para la comercialización de Biocombustibles*.
- Deolalkar, S. P. (2016). Chapter 8 - Solar Power. In *Designing Green Cement Plants* (pp. 251-258). doi:10.1016/B978-0-12-803420-0.00038-X
- Diario El Búho. (2014). *UCSM puso en marcha planta experimental de biogas HPTC*. Retrieved from <https://bit.ly/34Mka7y>
- Diesel Technology Forum. (2014). *The Top 5 Questions About Diesel Fuel – The Fuel that Powers America*. Retrieved from [www.dieselforum.org](http://www.dieselforum.org)
- Ecointeligencia web. (2016). *El análisis de Ciclo de vida y su marco normativo*. Retrieved from <https://www.ecointeligencia.com/2016/05/acv-marco-normativo/>
- Ecoinvent. (2019). *Ecoinvent Database Version 3.6*. Retrieved from [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)
- Eguruchela. (2020, Abril). *Classification of fuels*. Retrieved from <https://bit.ly/2USAlgc>
- Engineering ToolBox. (2020, enero 17). *Fuels—Higher and Lower Calorific*. Retrieved from The Engineering ToolBox: <https://bit.ly/2wzvck4>
- EPA. (2020). *United States Environmental Protection Agency*. Retrieved from How does anaerobic digestion work?: <https://bit.ly/2yiDkpo>

- Erol, M., Haykiri-Acma, H., & Küçükbayrak, S. (2010). Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 1, 170-173.  
doi:10.1016/j.renene.2009.05.008
- Estado Peruano. (2020). *Portal del Estado Peruano*. Retrieved from <https://www.peru.gob.pe/>
- Fahim, M. A., Alsahhaf, T. A., & Elkilani, A. (2010). Refinery Feedstocks and Products. In *Fundamentals of Petroleum Refining* (pp. 11-31). doi:10.1016/B978-0-444-52785-1.00002-4
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables".
- Ferreira, S. F., Buller, L. S., Berni, M., & Forster-Carneiro, T. (2019). Environmental impact assessment of end-uses of biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 230, 613-621.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.034>
- Flores, M. (2011). *Biodigestores la Calera*. Retrieved from Seminario "Biodigestores, promoción y aportes para mejorar la competitividad rural en el Perú" - MINAGRI:  
<https://bit.ly/2xybPbs>
- Flores, M. (2017). *La contaminación Ambiental: Su impacto en la salud de la población de Arequipa Metropolitana 2016-2017*. [Tesis de posgrado: Univesidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Florio, C., Fiorentino, G., Corcelli, F., Ulgiati, S., Dumontet, S., Güsewell, J., & Eltrop, L. (2019). A Life Cycle Assessment of Biomethane Production from Waste Feedstock Through Different Upgrading Technologies. *Energies*, 12(718).
- Funabashi, T. (2016). *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems. Implementation, Operation and Control*. doi:10.1016/B978-0-12-803212-1.00001-5
- García, R. (2001). *Teoría de la combustión: combustión y combustibles*.
- García-Herrero, I., Margallo, M., Laso, J., Batlle-Baller, L., Bala, A., Fullana, P., . . . Aldaco, R. (2018). Towards a sustainable agri-food system by an energetic and environmental

efficiency assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 811-816.

doi:10.3303/CET1870136

Gestión. (2015). La Pampilla: Nueva planta de desulfurización de diesel avanza al 40%. *Gestión*.

Retrieved from <https://bit.ly/3hvezCdq>

Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of

renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24,

38-50. doi:10.1016/j.esr.2019.01.006

Gobierno Regional de Arequipa. (2016). *Plan de desarrollo local concertado 2016-2021: Mapa*

*de redes de generación*. Arequipa. Retrieved from <https://bit.ly/33sXTNq>

Gonzales, G., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., & Nuñez, D. (2014). Contaminación

ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión en la salud de la

población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, p. 550.

Goñi, J., & Rojas, M. (2016). *Manual de combustibles alternativos y tecnología automotriz*.

Lima: Universidad de Lima. Retrieved from <https://bit.ly/2V5L9Xo>

Haque, A. (2016). Solar energy. In *Electric Renewable Energy Systems* (pp. 40-59).

doi:10.1016/B978-0-12-804448-3.00003-7

Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., & Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment

for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1291-

1300. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.013>

Hilbert, J. A. (2011). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A.

- Castelar. Retrieved from <https://bit.ly/2VAUGGh>

Hossain, M. F. (2019). Chapter Three - Energy. In Butterworth-Heinemann, *Sustainable Design*

*and Build. Building, Energy, Roads, Bridges, Water and Sewer Systems* (pp. 67-135).

doi:10.1016/B978-0-12-816722-9.00003-3

- Hughes, S. R., & Qureshi, N. (2014). Chapter 2 - Biomass for Biorefining: Resources, Allocation, Utilization, and Policies. In *Biorefineries. Integrated Biochemical Processes for Liquid Biofuels* (pp. 37-58). doi:10.1016/B978-0-444-59498-3.00002-6
- Hurstboiler. (2020, Abril 14). *hurstboiler.com*. Retrieved from Types of Biomass Fuels: <https://bit.ly/3bd8jlu>
- INEI. (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados. Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Lima.
- IPCC. (2011). *Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Retrieved from <https://bit.ly/2PsigCp>
- IPCC. (2014). *Synthesis Report*. United Kingdom and New York, NY, USA. : Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. (2015). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Suiza: Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRENA. (2018). *Biogas for road vehicles: Technology brief*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- ISO 14040:2006. (2006a). *International Organization for Standardization (ISO) 14040:2006, Environmental Management - Life cycle assessment - Principles and framework*.
- ISO 14044:2006. (2006b). *International Organization for Standardization (ISO) 14044:2006, Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- Ita-Nagy, D., Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Quispe, I., Chinga-Carrasco, G., Clauser, N., & Area, M. (2020). Life cycle assessment of bagasse fiber reinforced biocomposites. *Science of the Total Environment*, 720(10), 137586. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137586



- Kahhat, R., Parodi, E., Larrea-Gallegos, G., Mesta, C., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. *Science of the Total Environment*, 662(20), 940-951.  
doi:10.1016/j.scitotenv.2019.01.246
- Khondaker, A. N., Hasan, M. A., Rahman, S. M., Malik, K., Shafiullah, M., & Muhyedeen, M. A. (2016). Greenhouse gas emissions from energy sector in the United Arab Emirates – An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1317-1325.  
doi:10.1016/j.rser.2016.01.027
- Koido, K., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2018). Life cycle environmental and economic analysis of regional-scale food-waste biogas production with digestate nutrient management for fig fertilisation. *Journal of Cleaner Production*, 190, 552-562.  
doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.165
- Kollamthodi, S., Norris, J., Dun, C., Brannigan, C., Twisse, F., Biedka, M., & Bates, J. (2016). *The role of natural gas and biomethane in the transport sector*. United Kingdom: Ricardo Energy & Environment.
- Labatut, R. A., & Pronto, J. L. (2018). Chapter 4 - Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Anaerobic Digestion. In *Sustainable Food Waste-To-energy Systems* (pp. 47-67).  
doi:10.1016/B978-0-12-811157-4.00004-8
- Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2020). Optimization of the environmental performance of food diets in Peru combining linear programming and life cycle methods. *Science of the Total Environment*, 699(10), 134231.  
doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134231
- Larrea-Gallegos, G., Vázquez-Rowe, I., Wiener, H., & Kahhat, R. (2019). Applying the Technology Choice Model in Consequential Life Cycle Assessment: A Case Study in the Peruvian Agricultural Sector. *Journal of Industrial Ecology*, 23(3), 601-614.  
doi:10.1111/jiec.12812

- Lauer, M., Hansen, J., Lamers, P., & Thran, D. (2018). Making money from waste: The economic viability of producing biogas and biomethane in the Idaho dairy industry. *Applied Energy*, 222, 621-636. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.026>
- Lechón, Y., Cabal, H., Lago, C., Izquierdo, L., & Sáez, R. (2014). Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. *Congreso Nacional del Medio Ambiente CONAMA 8*.
- Ley N° 27446. (2011). *Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental*. Perú: Ministerio del Ambiente.
- Liao, W., Liu, Y., & Hodge, D. (2014). Chapter 13 - Integrated Farm-Based Biorefinery. In B. I. Biofuels. doi:10.1016/B978-0-444-59498-3.00013-0
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Agostini, A., & Linke, B. (2017). Methane Emissions from Biogas Plants. Methods for Measurement, Results and Effect on Greenhouse Gas Balance of Electricity Produced. (J. Murphy, Ed.) *IEA Bioenergy*.
- Llanque, J. (2003). *Efectos de la Contaminación Atmosférica en el clima Urbano y Calidad Ambiental de Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Long, L., Funqing, X., Xumeng, G., & Yebo, L. (2018). Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *89*, 151-167. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>
- Lu, X., McElroy, M. B., & Kiviluoma, J. (2009). Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 106(27), 10933-10938. doi:10.1073/pnas.0904101106
- Lyng, K.-A., & Brekke, A. (2019). Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels. *Energies*, 12(3), 532. doi: <https://doi.org/10.3390/en12030532>

- Margallo, M., Ziegler-Rodriguez, K., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Irabien, Á., & Kahhat, R. (2019). Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Science of the Total Environment*, 689(1), 1255-1275. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.393
- Medina, O., & Postigo, J. (2018). *Potencial energético del sustrato hidrolizado de broza de paprika (Capsicum annuum) y estiércol bovino mediante digestión anaerobia metanogénica en un sistema HPTC-RM [tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]*. Repositorio UCSM. doi:<https://bit.ly/2Kxq3MV>
- Metal Construction Association. (2014). *New study verifies steel roofs can last as long as the buildings they cover: Typically 60 years or more*. Retrieved from <https://www.metalconstruction.org/index.php/media-center/press-releases/metal-roofs-can-last-60-years>
- Metso Minerals. (2012). *Bomba para lodos. Aspectos básicos* (3era edicion ed.). Suecia. Retrieved from <http://bit.ly/2uc5bGI>
- Mezzullo, W. G., McManus, M. C., & Hammond, G. P. (2013). Life cycle assessment of a small-scale anaerobic digestion plant from cattle waste. *Applied Energy*, 102, 657-664. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.008>
- Ministerio de Agricultura. (2011). *Biodigestores en el Perú: Guía de principales experiencias desarrolladas en el país*. Lima: Dirección General de Competitividad Agraria.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Balance Nacional de Energía*. Lima: Dirección General de Eficiencia Energética.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Informe Nacional sobre el Estado del Ambiente 2012-2013*. Lima: Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de gestión Ambiental.
- Ministerio del Ambiente. (2016a). *Informe de Calidad del Aire 2013-2014*. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2016b). MINAM precisa información sobre Calidad del Aire y los vehículos automotores. Lima. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/notas-de->

prensa/minam-precisa-informacion-sobre-calidad-del-aire-y-los-vehiculos-  
automotores/

Ministerio del Ambiente. (2016c). *Informe anual Instituciones públicas ecoeficientes*. Lima, Perú: MINAM. Retrieved from <https://bit.ly/2OFwaQb>

Ministerio del Ambiente. (2016d). *Preguntas y respuestas para entender el caso del Euro IV*. Ministerio del Ambiente.

Ministerio del Ambiente. (2017, Junio 7). Decreto Supremo N°003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementaria. *El Peruano*.

Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. Y. (2019). Natural Gas Fundamentals. In *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing (Fourth Edition). Principles and Practices* (pp. 1-35). doi:10.1016/B978-0-12-815817-3.00001-0

Molino, A., Iovane, P., & Migliori, M. (2016). Biomethane production by biogas with polymeric membrane module. In *Membrane Technologies for Biorefining* (pp. 465-482). doi:10.1016/B978-0-08-100451-7.00018-9

Morales, M., Gonzalez-García, S., Aroca, G., & Moreira, M. (2015). Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. *Science of the Total Environment*, 505(1), 833-843. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.10.067

Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. A. (2015). Life cycle assessment of biomethane use in Argentina. *Bioresource Technology*, 182, 208-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.077>

Morero, B., Rodriguez, M. B., & Campanella, E. A. (2015). Environmental impact assessment as a complement of life cycle assessment. Case study: Upgrading of biogas. *Bioresource Technology*, 190, 402-407. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.091>

- Muñoz, R., & Llanos, J. (2012). Estimation of the lifespan of agricultural tractor using a diffusion model at the aggregate level. *Ciencia e investigación agraria*, 39(3), 557-562.  
doi:<https://doi.org/10.4067/S0718-16202012000300014>
- National Institute for Public Health and the Environment. (2018). *LCIA: the ReCiPe model*. Retrieved from RIVM Committed to health and sustainability:  
<https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- Naturgy. (2020). *Un modelo de negocio innovador, integrado y sostenible*. Retrieved from [www.naturgy.com](http://www.naturgy.com)
- Nguyen, D., Nitayavardhana, S., Sawatdeenarunat, C., Surendra, K. C., & KumarKhanal, S. (2019). Chapter 31 - Biogas Production by Anaerobic Digestion: Status and Perspectives. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (Second Edition)*. Biomass, Biofuels, Biochemicals (pp. 763-778). doi:10.1016/B978-0-12-816856-1.00031-2
- Ñiquen, A. (2017). *Perú: Combustibles fósiles versus energías renovables*. Retrieved from Redacción mulera: <http://bit.ly/2RgV77D>
- OEFA. (2016). *La vinculación y retroalimentación entre la certificación y la fiscalización ambiental*. Lima. Retrieved from <https://bit.ly/3dDCByi>
- Okeke, I. J., Sahoo, K., Kaliyan, N., & Mani, S. (2020). Life cycle assessment of renewable diesel production via anaerobic digestion and Fischer-Tropsch synthesis from miscanthus grown in strip-mined soils. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119358.  
doi:10.1016/j.jclepro.2019.119358
- OpenLCA web. (2020). Retrieved from [www.openlca.org/](http://www.openlca.org/)
- Ormazabal, M., Jaca, C., & Puga-Leal, R. (2014). Chapter 131: Analysis and Comparison of Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Software. In J. X. al., *Proceedings of the Eighth International Conference on Management Science and Engineering Management*, (pp.

1521-1530). Berlin: Advances in Intelligent Systems and Computing 281.

doi:10.1007/978-3-642-55122-2\_131

Osinermin. (2013). *Análisis de la comercialización de combustibles líquidos en el Perú*. Perú:

División de Planeamiento y Desarrollo. Gerencia de Fiscalización de Hidrocarburos

Líquidos. Retrieved from <https://bit.ly/2RtzHUj>

Osinermin. (2014). La industria del gas natural en el Perú. A diez años del Proyecto Camisea.

In J. Tamayo, J. Salvador, A. Vásquez, & R. García (Eds.). Lima. Retrieved from

<https://bit.ly/3fzq4NX>

Osinermin. (2015). La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al

desarrollo del país. In J. Tamayo, J. Salvador, A. Vásquez, & R. De la Cruz (Eds.). Lima -

Perú. Retrieved from <https://bit.ly/3egbj2e>

Osinermin. (2020). *Demanda total de diésel por departamento*. Lima. Retrieved from

<https://bit.ly/2HKr3it>

Ozyuguran, A., Akturk, A., & Yaman, S. (2018). Optimal use of condensed parameters of

ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. *Fuel*, 640-646.

doi:10.1016/j.fuel.2017.10.082

Peña, G. (2017a). *Convenio N° 111-2017: Producción de biometano para combustible de*

*transporte a partir de residuos de biomasa*. Arequipa: Universidad Católica de Santa

María.

Peña, G. (2017b). *Proyectos en temas estratégicos: Memoria técnica del Proyecto "Producción*

*de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa"*.

Arequipa: Universidad Católica de Santa María.

Peña, G., & Dávila, G. (2017a). Eliminación de vapor de Agua por sistema de filtrado PSA, para

la producción de Biometano. *Seminario Internacional: Procesamiento de Residuos*

*Orgánicos Agrícolas*, 1, 9-15.

- Peña, G., & Dávila, G. (2017b). Evaluación de 3 presiones y 3 temperaturas en sistema de filtrado por depuración (Scrubber) de CO<sub>2</sub> para la producción de Biometano. *Seminario Internacional: Procesamiento de Residuos Orgánicos Agrícolas, 1*, 51-56.
- Peña, G., Reátegui, J., Cárdenas, L., Castro, J., Mejía, F., Mestas, S., & Roque, F. (2018a). *Manual de producción y uso de biometano presurizado a baja y alta presión*. (F. Roque, Ed.) Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Peña, G., Reátegui, J., Cárdenas, L., Castro, J., Mejía, F., Mestas, S., & Roque, F. (2018b). *Norma Técnica de Empresa (NTE) Norma técnica producción y almacenamiento de biometano presurizado*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública, 22*(2). Retrieved from <https://bit.ly/30n5N94>
- Petroperu. (2020). *Combustibles*. Retrieved from Diesel Ultra: <https://bit.ly/2Xw9FDR>
- Pieprzyk, B., Kortluke, N., & Hilje, P. (2009). The impact of fossil fuels Greenhouse gas emissions, environmental consequences and socio-economic effects.
- Pre-sustainability. (2016). *SimaPro tutorial*. San Francisco, California. Retrieved from <https://bit.ly/38fTLkW>
- Promigas. (2018). *Informe del sector gas natural en Perú 2018. Cifras 2017. III Edición*. Lima: Promigas - Quavii. Retrieved from <https://bit.ly/33hfacg>
- Purchasing. (2019). *Air Compressor Purchasing Guide*. Retrieved from <http://bit.ly/39Q2CZQ>
- Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2019). Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. *Journal of Cleaner Production, 209*, 1235-1244. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.312
- Quispe, I., Yearwood, J., Dunin, A., Chirinos, L., & Matos, K. (2009). *Análisis de Ciclo de Vida de los Biocombustibles en el Perú*. Lima: Red Peruana de Ciclo de Vida.

- Quispe, J. (2019). *Evaluación de los impactos socioeconómicos del uso de biogás presurizado producido en el biodigestor de alta eficiencia de la UCSM, en la irrigación el Pedregal Majes – Arequipa [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]*. Repositorio UCSM. Retrieved from <https://bit.ly/34TmslD>
- Qyyum, M. A., Haider, J., Qadeer, K., Valentina, V., Khan, A., Yasin, M., . . . Lee, M. (2020). Biogas to liquefied biomethane: Assessment of 3P's—Production, processing, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *119*, 109561. doi:10.1016/j.rser.2019.109561
- Ramón-Ramón, S. A., Cárdenas-Gutiérrez, J. A., & Rojas-Suárez, J. P. (2018). Poder calorífico de la cascarilla de arroz usada como combustible en hornos de secado. *Mundo Fesc*, *8*(16), 63-67.
- Rasello, R., & Manca, D. (2014). Stochastic Price/Cost Models for Supply Chain Management of Refineries. *Computer Aided Chemical Engineering*, *33*, 433-438. doi:10.1016/B978-0-444-63456-6.50073-9
- Ravina, M., & Genon, G. (2015). Global and local emissions of a biogas plant considering the production of biomethane as an alternative end-use solution. *Journal of Cleaner Production*, *102*, 115-126. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.056
- Red Peruana de Ciclo de Vida. (2016). *Normas Técnicas Peruanas para la Gestión Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida y Ecoeficiencia*. Retrieved from <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/en/sobre-la-red-ciclo-de-vida/herramientas-de-gestion-empleadas/analisis-de-ciclo-de-vida-ambiental-acv-a/>
- Repsol. (2018). *Informe de Sostenibilidad*. Lima. Retrieved from <https://bit.ly/3hrzyLV>
- Repsol. (2020). *Downstream*. Retrieved from [www.repsol.pe](http://www.repsol.pe)
- Resolución Ministerial N° 139-2012-MEM-DM. (2012). Establecen prohibición de comercializar y usar diesel B5 con un contenido de azufre mayor a 50ppm en los departamentos de



Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la provincia constitucional del Callao.

*Ministerio de Energía y Minas.*

Rios, A. (2011). *Una radiografía a la producción y consumo de petróleo en en Perú*. Retrieved

from Conexiónsan: <https://bit.ly/2RtNgDq>

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *Our World In Data*. Retrieved from Fossil Fuels:

<https://bit.ly/2VldmK5>

Rogoff, M. J., & Screve, F. (2019). Chapter 3 - Energy From Waste Technology. In *Waste-To-energy (Third Edition). Technologies and Project Implementation* (pp. 29-56).

doi:10.1016/B978-0-12-816079-4.00003-7

Rojas-Sola, J., & Molino-Delgado, J. (2015). 3D Parametric design and static analysis of the first

Spanish winch used to drain water from mines. *Dyna rev.fac.nac.minas [online]*,

28(190), 237-245. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n190.47123>

RPP. (2017). ¿Qué es el gasoducto virtual y cómo funciona? *RPP Noticias*. Retrieved from

<https://bit.ly/3jxdUrx>

SAIC. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Cincinnati, Ohio: National Risk Management Research Laboratory.

Samet, J., & Woodward, A. (2019). Air Pollution and Climate Change. In M. Withers, & J.

McCool, *Global Health Leadership: Case Studies From the Asia-Pacific* (pp. 91-105).

Springer International Publishing. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-95633-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95633-6_9)

Sarkar, D. K. (2015). Fuels and Combustion. In *Thermal Power Plant: Design and Operation* (pp.

91-137). doi:10.1016/B978-0-12-801575-9.00003-2

Sawatdeenarunat, C., Nguyen, D., Surendra, K. C., Shrestha, S., Rajendran, K., Oechsner, H., . . .

Khanal, S. K. (2016). Anaerobic biorefinery: Current status, challenges, and

opportunities. *Bioresource Technology*, 215, 304-313.

doi:10.1016/j.biortech.2016.03.074

- Schenk, R., & Gordy, T. (2011). *Directory of Sustainability Life Cycle Assessment Tools*. .  
Portland: OR: International Society of Sustainability Professionals.
- Shanmugam, K., Tysklind, M., & Upadhyayula, V. K. (2018). Use of Liquefied Biomethane (LBM) as a Vehicle Fuel for Road Freight Transportation: A Case Study Evaluating Environmental Performance of Using LBM for Operation of Tractor Trailers. *Procedia CIRP*, 69, 517-522. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.133>
- Sharma, A., & Strezov, V. (2017). Life cycle environmental and economic impact assessment of alternative transport fuels and power-train technologies. *Energy*, 133, 1132-1141. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.160>
- Simapro. (2014). *SimaPro 8 Training Slides Jan 2014*. doi:<http://bit.ly/3amvjAP>
- Simapro. (2020). *SimaPro 9.0.0.49*. Retrieved from <https://simapro.com/>
- SINIA. (2015). *Instrumentos para la gestión ambiental*. Retrieved from Ministerio del Medio Ambiente Chile. Sistema Nacional de Información Ambiental: <https://bit.ly/2Z8ptMi>
- Skorek-Osikowska, A., Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J. (2020). Thermodynamic, economic and environmental assessment of energy systems including the use of gas from manure fermentation in the context of the Spanish potential. *Energy*, 117452. doi:10.1016/j.energy.2020.117452
- Snow Leopard web. (2020, Abril 19). *Biogas Applications*. Retrieved from Decentralised Powergeneration: <https://bit.ly/2KiHkJC>
- Soares, C. (2015). Gas Turbine Fuel Systems and Fuels. A Handbook of Air, Land and Sea Applications. In *Gas Turbines (Second Edition)* (pp. 317-411). doi:10.1016/B978-0-12-410461-7.00007-9
- Speight, J. G. (2011a). *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing*. (M. R. Khan, Ed.) Woodhead Publishing Series in Energy. doi:10.1533/9780857093783.1.54
- Speight, J. G. (2011b). Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing. In D. Shekhawat, J. J. Spivey, & D. A. Berry (Eds.). doi:10.1016/C2009-0-20328-X

- Sulekha. (2019). *Daewoo Air Compressor Prices and Specifications*. Retrieved from <http://www.sulekha.com/air-compressor/daewoo-air-compressor-prices-and-specifications>
- Svensson, M. (2013). Biomethane for transport applications. In *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications. Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 428-443). doi:10.1533/9780857097415.3.428
- Tobón, A. (2017). Evaluación del impacto ambiental en biodigestores anaeróbicos en el SENA, Regional Cesar. *RETO: Revista Especializada en Tecnologías Transversales de la Organización*, 5(5), 39-49. Retrieved from <https://bit.ly/2X8yjdG>
- Tractor Data. (2018). *Fiat 70-66*. Retrieved from <http://www.tractordata.com/farm-tractors/003/3/8/3382-fiat-70-66.html>
- Tyagi, V. K., & Lo, S.-L. (2016). Chapter 10 - Energy and Resource Recovery From Sludge: Full-Scale Experiences. In *Environmental Materials and Waste. Resource Recovery and Pollution Prevention* (pp. 221-244). doi:10.1016/B978-0-12-803837-6.00010-X
- UCS. (2016). *The true costs of coal, natural gas, and other fossil fuels aren't always obvious—but their impacts can be disastrous*. Retrieved from The Hidden Costs of Fossil Fuels: <https://bit.ly/31T8l01>
- UCSM. (2018). *UCSM desarrolla planta que producirá combustible ecológico para maquinaria agrícola y vehículos*. Retrieved from Universidad Católica de Santa María: <https://bit.ly/3eHiYqR>
- UN. (2015). *Objetivos del desarrollo sostenible*. Retrieved from Naciones Unidas: <https://bit.ly/2ZlSO7z>
- Universidad Católica San Pablo. (2012). *En Arequipa se está generando mejor tecnología para aprovechar el biogás*. Retrieved from UCSP Informa: <https://bit.ly/2VrjVvG>
- Universitat Politècnica de Catalunya. (2015). *Análisis del Ciclo de Vida*. Retrieved from UPC: <https://bit.ly/3dM8kxL>

- Unrean, P., Lai Fui, B. C., Rianawati, E., & Acda, M. (2018). Comparative techno-economic assessment and environmental impacts of rice husk-to-fuel conversion technologies. *Energy*, 151, 581-593. doi:10.1016/j.energy.2018.03.112
- Urban, W. (2013). Biomethane injection into natural gas networks. In *The Biogas Handbook. Science, Production and Applications. Woodhead Publishing Series in Energy* (pp. 378-403). doi:10.1533/9780857097415.3.378
- Van Mierlo, J., Messagie, M., & Rangaraju, S. (2017). Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. *Transportation Research Procedia*, 25, 3435-3445. doi:https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244
- Vázquez-Rowe, I., Cáceres, A., Torres-García, J., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *Journal of Cleaner Production*, 142(40), 4369-4383. doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.136
- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., & Sánchez, I. (2019). Perú LCA: launching the Peruvian national life cycle database. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2089-2090. doi:10.1007/s11367-019-01668-w
- Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Larrea-Gallegos, G., & Ziegler-Rodriguez, K. (2019). Peru's road to climate action: Are we on the right path? The role of life cycle methods to improve Peruvian national contributions. *Science of The Total Environment*, 659, 249-266. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.322
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodriguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., & Kahhat, R. (2019). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 283-292. doi:10.1016/j.resconrec.2018.12.017
- Verán-Leigh, D., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: a policy support perspective. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1376-1395. doi:10.1007/s11367-018-01579-2

- Verán-Leigh, D., Larrea-Gallegos, G., & Vázquez-Rowe, I. (2019). Environmental impacts of a highly congested section of the Pan-American highway in Peru using life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(8), 1496-1514. doi:10.1007/s11367-018-1574-1
- Viswanathan, B. (2017). Natural Gas. In *Energy Sources: Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications* (pp. 59-79). doi:10.1016/B978-0-444-56353-8.00003-4
- Watterson, J. (2014). *Topic (3): Calculation of mitigation potential / carbon footprint / Life Cycle Assessment (LCA), including application of 2006 IPCC Guidelines*. Sofia, Bulgaria. Retrieved from <https://bit.ly/3fCj5D3>
- Wiloso, E., & Heijungs, R. (2013). Key Issues in Conducting Life Cycle Assessment of Biobased Renewable Energy Sources. *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, 13–36. doi:10.1007/978-1-4471-5364-1\_2
- Yanga, L., Ge, X., Wan, C., Yu, F., & Lia, Y. (2014). Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1133-1152. doi:10.1016/j.rser.2014.08.008
- Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 229, 989-1003. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.015
- Zongliu. (2017, Julio). *Texas Animal Manure Management Issues*. Retrieved from Manure to Energy: Understanding Processes, Principles and Jargon: <https://bit.ly/2Xxe0qu>

ANEXOS

Anexo 1. Promedios mensuales y anuales de material particulado en la ciudad de Arequipa

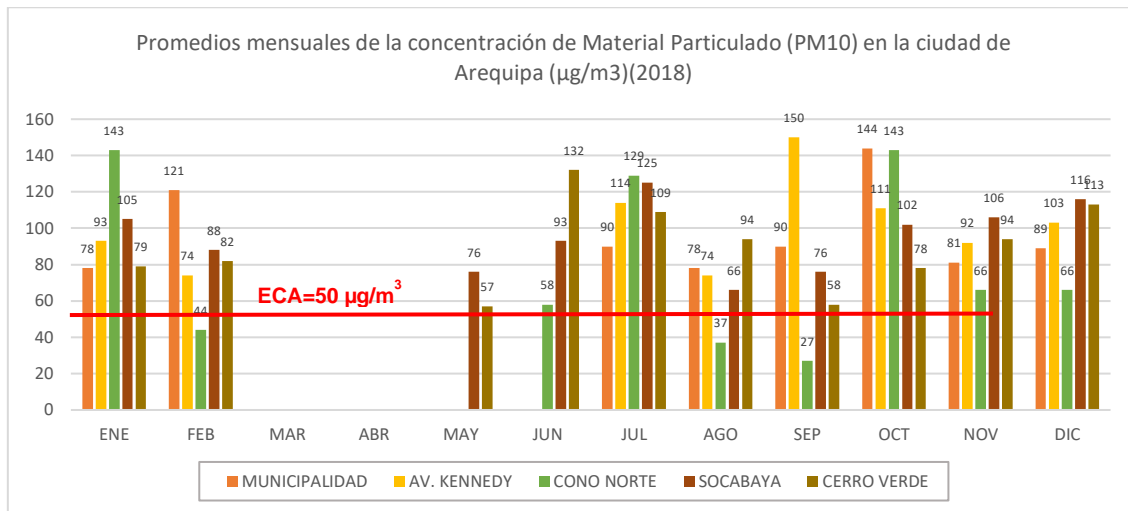


Figura 20. Reporte mensual de material particulado respirable PM<sub>10</sub>. Arequipa. 2018.

Fuente: Gerencia Regional de Salud Ambiental

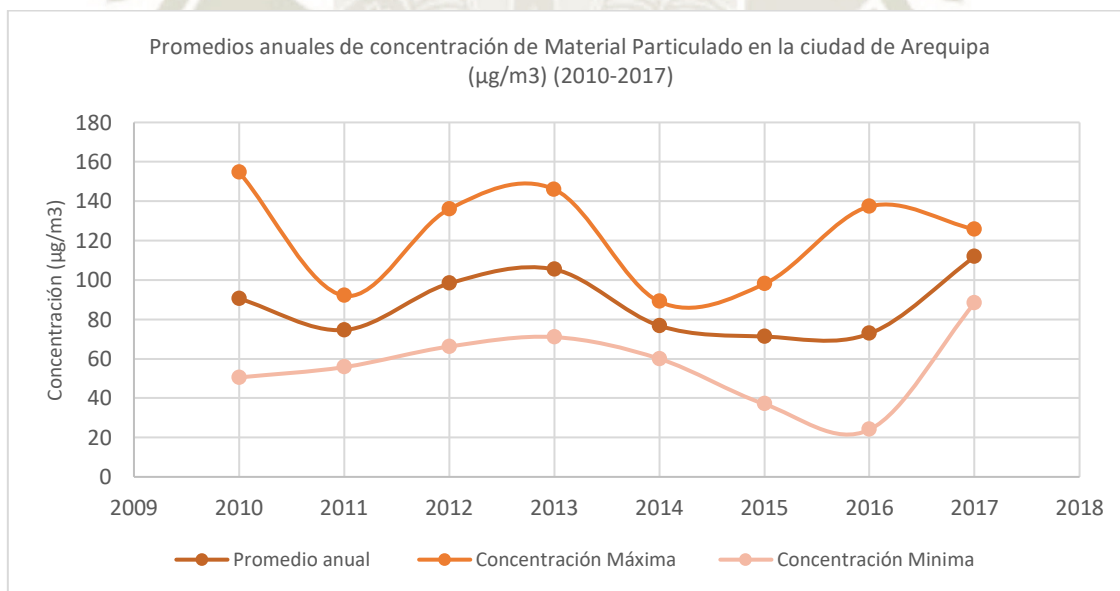
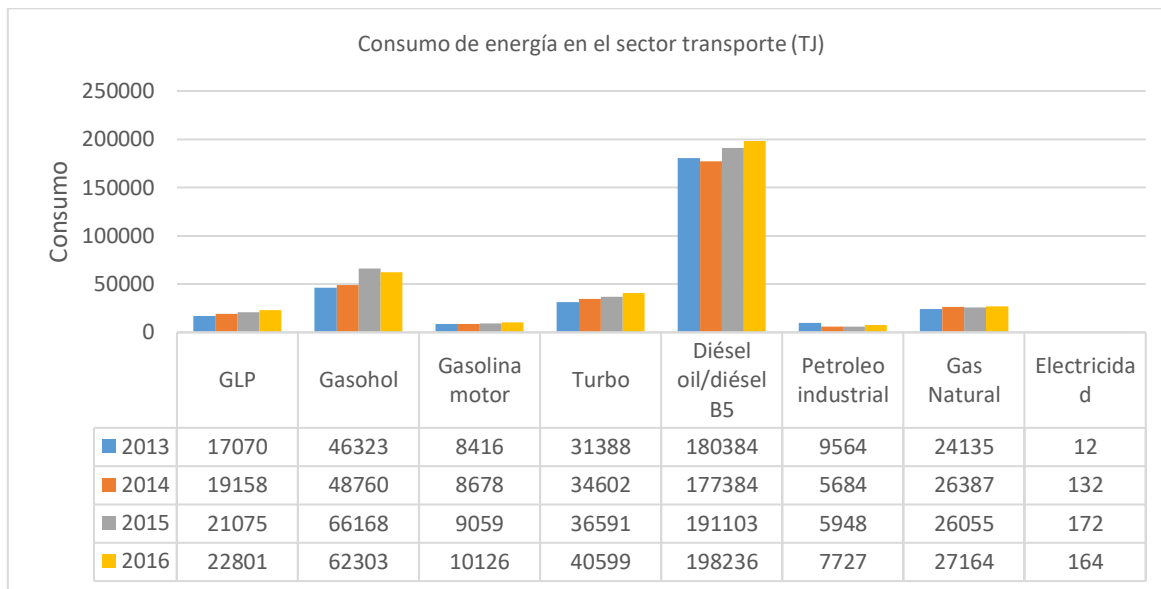


Figura 21. Promedios anuales de concentración de material particulado en la ciudad de Arequipa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (2010-2017).

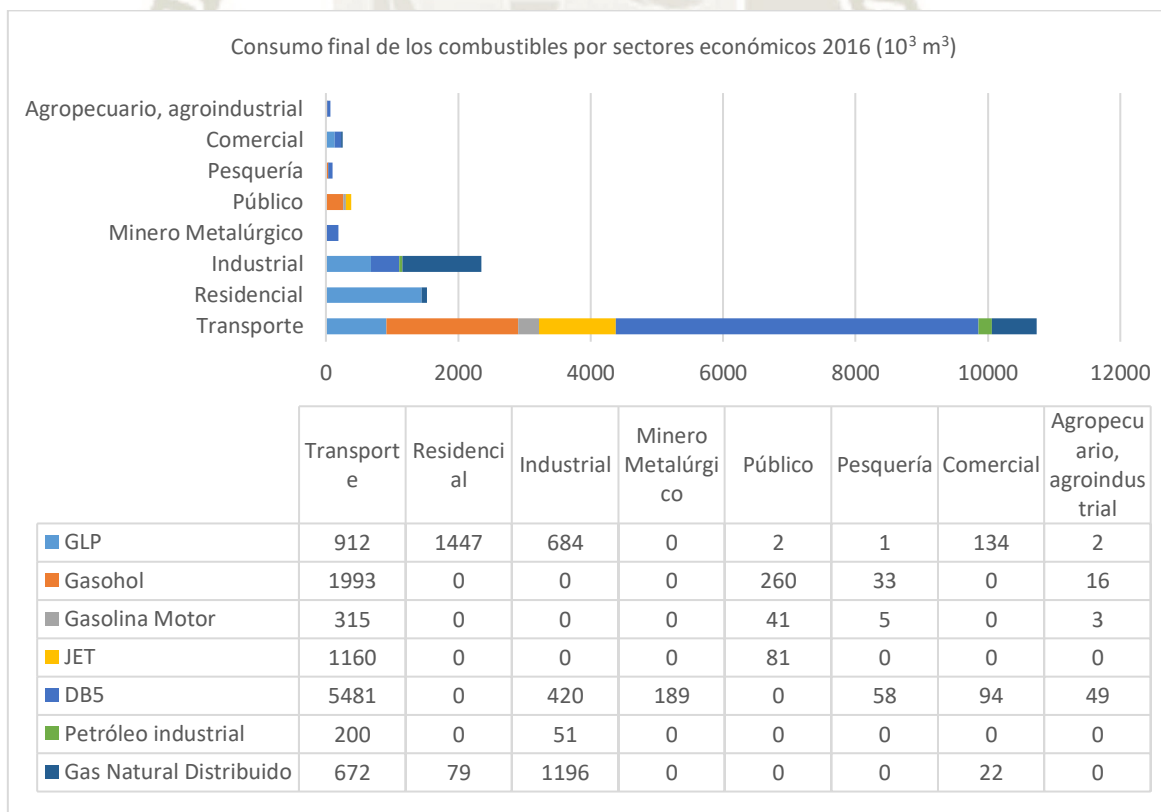
Fuente: Dirección General de Salud Arequipa (DIGESA, 2016) adaptado por (Flores M., 2017).

**Anexo 2. Combustibles con mayor demanda en el Perú**



**Figura 22.** Consumo de energía en el sector transporte (TJ)

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas (2016)



**Figura 23.** Consumo final de los combustibles derivados de hidrocarburos y biocombustibles por sectores económicos (103 m<sup>3</sup>) en el 2016. Cifras estimadas.

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas (2016)

**Anexo 3.** Herramientas de cálculo para el análisis de ciclo de vida

**Tabla 16.** Softwares comerciales para el cálculo para el análisis de ciclo de vida

<b>Características</b>	<b>SIMAPRO</b>	<b>GABI</b>	<b>UMBERTO</b>	<b>REGIS</b>
<b>Aplicación</b>				
Sectores prioritarios de estudio	Todos los sectores	Todos los sectores	Todos los sectores	Todos los sectores
Tipos de análisis	Ambiental, Económico, Social	Ambiental, Económico, Social	Ambiental, Económico	Ambiental, Económico, Social
Región geográfica	Según la base de datos disponible	Según la base de datos disponible	Según la base de datos disponible	Europa
Adaptación a condiciones locales	Sí	Sí	Sí	Sí
Inclusión de base de datos	Sí	Sí	Sí	Sí
Exportación e importación de datos	Sí	Sí	Sí	Sí
Estudios de combustibles en el Perú	Sí	No	No	No
<b>Datos del software</b>				
Manual de uso	Sí	Sí	Sí	Sí
Ayuda en línea	Sí	Sí	Sí	Sí
Idiomas disponibles	Inglés, español	Inglés, alemán, español, portugués, francés, entre	Inglés, alemán	Inglés, alemán, español



		otros		
Sistema operativo	Windows	Windows	Windows, Mac	Windows, Mac
Última actualización	2019	2020	2020	2019
Sitio web	simapro.com	<a href="http://gabi-software.com">gabi-software.com</a>	<a href="http://ifu.com/en/umberto/lca-software">ifu.com/en/umberto/lca-software</a>	<a href="http://sinum.com/regist">sinum.com/regist</a>
Desarrolladores	PRé Consultants	Thinkstep	Ifu Hamburg GmbH	Sinum AG Nachhaltigkeit
Inversión anual aproximada	3650 EUR	1409 EUR	1862 EUR	-

**Fuente:** Adaptación de (Cuéllar, 2016) & (Schenk & Gordy, 2011).

**Tabla 17.** Softwares gratuitos para el cálculo para el análisis de ciclo de vida

Características	OPENLCA	CMLCA	GEMIS	GREET
<b>Aplicación</b>				
Sectores prioritarios de estudio	Todos los sectores	Todos los sectores	Energía, construcción, alimentación, transporte	Transporte
Tipos de análisis	Ambiental, Económico	Ambiental, Económico, Social	Ambiental, Económico, Social	Ambiental
Región geográfica	Según base de datos disponible	Según base de datos disponible	Unión Europea, Japón, México, Estados Unidos	Estados Unidos
Adaptación a condiciones locales	Sí	Sí	Sí	No
Inclusión de base de datos	Sí	Sí	Sí	Sí

Exportación e importación de datos	Sí	Sí	Sí	No
Estudios de combustibles en el Perú	No	No	No	No
<b>Datos del software</b>				
Manual de uso	Sí	Sí	Sí	Sí
Ayuda en línea	Sí	Sí	No	Sí
Idiomas disponibles	Inglés, alemán, español	Inglés	Inglés, checo, francés, alemán, español	Inglés
Sistema operativo	Windows, Linus, Mac	Windows	Windows	Windows
Última actualización	2019	2018	2019	2019
Sitio web	<a href="http://openlca.org">openlca.org</a>	<a href="http://cmlca.eu">cmlca.eu</a>	<a href="http://iinas.org/gemis.html">iinas.org/gemis.html</a>	<a href="http://greet.es.anl.gov">greet.es.anl.gov</a>
Desarrolladores	GreenDeltaTC, GmbH	Institute of Environmental Sciences (CML) - Leiden University	International Institute for Sustainability Analysis and Strategy (IINAS)	Argonne National Laboratory (ANL)

**Fuente:** Adaptación de (Cuéllar, 2016) & (Schenk & Gordy, 2011).

**Anexo 4.** Ficha de recolección de datos para el inventario de ciclo de vida de la producción del biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa, 2018

**FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS  
PARA EL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DEL  
BIOMETANO  
EN EL FUNDO LA CATÓLICA, MAJES, AREQUIPA, 2018**

Desarrollado por: Milagros Yasmin Alvarez Huamani, Bachiller en Ingeniería Ambiental

Este documento forma parte de la recolección de datos para la tesis “Análisis de ciclo de vida del biometano como combustible para el transporte en comparación con el diésel y el gas natural. Arequipa, 2018”.

El propósito es obtener la mayor cantidad posible de datos para el desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV) del biometano producido en el fundo La Católica. La información que no sea consignada por los especialistas u operadores entrevistados será completada en el inventario con datos bibliográficos.

---

## **1. ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO**

### **Etapas incluidas:**

- Transporte de la materia prima
- Producción del biometano

### **Procesos incluidos:**

- Mezclado con agua
- Conversión: Digestión Anaeróbica
- Purificación del biogás
- Almacenamiento

## 2. ENTRADA Y SALIDA DE PRODUCTOS DE REFERENCIA

- **Entradas:**

Material	Unidad	Mezclado y Conversión	Purificación del biogás	Almacenamiento	Uso
Estiércol	kg/día	180			
Broza	kg/día	20			
Agua de mezcla	kg/día	100			
Biogás	Nm <sup>3</sup>		60		
Biometano (BM-95)	Nm <sup>3</sup>			57	
Biometano comprimido, 200 bar (BMC)	Nm <sup>3</sup>				22.5

**Comentario:** Se recolectaron datos únicamente la producción óptima del biometano en la planta del fundo La Católica en el 2018, debido a la ausencia de un registro de datos reales detallados de ese u otros años.

- **Consumo de energía eléctrica general:**

Proceso	Maquinaria	Consumo (kW)	Operación (h/día)
Conversión	Bomba de lodos	0.75	4
	Compresor 1	1.5	24
Purificación del biogás	Compresor 2	2.24	4
	Radiador	0.07	4
	Enfriador	0.02	4
	Bomba de agua	3.73	4
Almacenamiento	Compresor 3	4	4.5

### 3. MATERIA PRIMA: ESTIÉRCOL DE VACA

Lugar de recolección: Establo de vacas del fundo La Católica

Características	Unidad	Cantidad
Cantidad de vacas productoras	cabezas	60
Producción de materia prima por cabeza de ganado	kg/día	15
Cantidad de materia prima recolectada	kg/día	300
Distancia de transporte	km	1

### 4. ETAPA DE TRANSPORTE DE LA MATERIA PRIMA

Lugar: Desde el establo de vacas hasta la planta de biogás, en el fundo La Católica

Vehículo: Tractor FIAT 70-66

Combustible: Diésel

Ítem	Unidad	Respuesta
Cantidad	unidades	1
Peso del vehículo	kg	3150 (Tractor Data, 2018)
Poder del vehículo	kW	51.5 (Tractor Data, 2018)
Año de fabricación		1984 – 1991 (Tractor Data, 2018)
Esperanza de vida	Años	22 (Muñoz & Llanos, 2012)
Años de servicio	Años	35
Consumo diario de combustible	gal	1
Operación diaria	h	0.5

### 5. ETAPA DE PRODUCCIÓN DE BIOMETANO

Lugar: Planta de biogás y laboratorio de presurización

Esperanza de vida: 25-30 años

### A. Mezclado con agua

Ítem	Unidad	Respuesta
<b>Infraestructura: Poza de alimentación</b>		
Cantidad	unidades	1
Material	-	Hormigón y acero
Esperanza de vida	años	-
Largo	m	1.90
Ancho	m	1.85
Alto	m	2
Espesor	m	0.36

**Comentarios:** Las varillas de acero utilizadas son de diámetro  $\frac{3}{4}$ " a 0.25 m de distancia. Las dimensiones de la cubierta de protección: 1.54 m x 1.48 m.

### B. Conversión: Digestión Anaeróbica

Ítem	Unidad	Respuesta
<b>Infraestructura: Contenedores de metal</b>		
Cantidad	Unidades	2
Material	-	Hierro
Esperanza de vida	años	25-30
Largo	m	6.02
Ancho	m	2.42
Alto	m	2.54
Espesor	m	0.002
Peso bruto máximo	kg	30480 (Indicado en la estructura)
Otros materiales	-	Base de concreto y paneles solares
<b>Maquinaria: Bomba de lodos</b>		
Modelo	-	CSL-CV07-CS

Cantidad	Unidades	2
Esperanza de vida	Años	18 (Metso Minerals, 2012)
Peso	Kg	27 (CRI Pumps, 2019)
Potencia	kW	0.75
Operación diaria	h	4
<b>Maquinaria: Compresor 1</b>		
Modelo	-	DAAC50D
Cantidad	Unidades	1
Esperanza de vida	años	15 (Purchasing, 2019)
Peso	kg	150 (Sulekha, 2019)
Potencia	kW	1.5
Operación diaria	h	24
<b>Equipo: Tanque de hidrólisis</b>		
Cantidad	Unidades	1
Material	-	Poliéster reforzado con fibra de vidrio
Esperanza de vida	años	25-30
Volumen	m <sup>3</sup>	2.5
Alto	m	2.3
Diámetro	m	1.4
Peso	kg	-
<b>Equipo: Biodigestor de geomembrana</b>		
Cantidad	Unidades	1
Material	-	PVC
Esperanza de vida	años	25-30
Volumen	m <sup>3</sup>	30
Medidas	m	No accesible
Peso	kg	-
<b>Equipo: Reservorio de gas</b>		
Cantidad	Unidades	1
Material	-	Polietileno de alta densidad (HDPE)
Esperanza de vida	años	25-30
Volumen	m <sup>3</sup>	30

Largo	m	10
Ancho	m	3.19
Alto	m	1.59
Espesor	m	0.001
Peso	kg	-

**Comentarios:** Los datos de algunos equipos, como el panel fotovoltaico, el biodigestor y las tuberías en el interior del segundo contenedor, son inaccesibles debido a su ubicación y a que dicho contenedor está permanentemente cerrado.

### C. Purificación del biogás

<b>Infraestructura: Estructura de hierro</b>		
Cantidad	Unidades	1
Material	-	Hierro
Esperanza de vida	años	25-30
Largo	m	11.56
Ancho	m	5.8
Alto	m	2.88
Alto del techo	m	1.30
Espesor	m	0.075
Peso	kg	-
<b>Maquinaria: Compresor 2</b>		
Modelo	-	Galeazzi UB-30
Cantidad	Unidades	1
Esperanza de vida	años	15 (Purchasing, 2019)
Peso	kg	30.8
Potencia	kW	2.2371
Operación diaria	h	4
<b>Maquinaria: Radiador</b>		
Modelo	-	ELCO N16-30/394
Cantidad	Unidades	2
Esperanza de vida	años	6



Peso	kg	1.13
Potencia	kW	0.07
Operación diaria	h	4
<b>Maquinaria: Enfriador de agua</b>		
Modelo	-	THERMALLY PROTECTED UTY411ESTE04JB
Cantidad	Unidades	1
Esperanza de vida	años	6
Peso	kg	-
Potencia	kW	0.022
Operación diaria	h	4
<b>Maquinaria: Bomba de agua</b>		
Modelo	-	Power Spreayer MB-KT70
Cantidad	Unidades	1
Esperanza de vida	años	18 (Metso Minerals, 2012)
Peso	kg	46
Potencia	kW	3.7285
Operación diaria	h	4
<b>Equipo: Filtros Scrubber</b>		
Cantidad	Unidades	2
Material	-	Hierro
Esperanza de vida	años	25-30
Altura	m	3
Diámetro	m	0.29
Peso	kg	-
<b>Equipo: Filtros tipo PSA</b>		
Cantidad	Unidades	2
Material	-	Hierro
Esperanza de vida	años	25-30
Altura	m	2.5
Diámetro	m	0.29
Peso	Kg	-

<b>Equipo: Tanque de almacenamiento</b>		
Cantidad	Unidades	1
Material	-	Hierro
Esperanza de vida	años	25-30
Altura	m	2.65
Diámetro	m	0.80
Peso	kg	-
<b>Accesorios: Tuberías</b>		
Material	-	PVC
Largo	m	9.38
Peso	kg	-

**Comentarios:** Existen ciertas limitaciones, como la falta de producción constante debido a la existencia de fugas de CO<sub>2</sub>.

#### D. Almacenamiento

<b>Maquinaria: Compresor 3</b>		
Modelo	-	DIDWANIA SF-5/200
Cantidad	Unidades	1
Esperanza de vida	años	25-30
Peso	kg	568
Potencia	kW	4
Operación diaria	h	4.5

**Comentarios:** Se utiliza la compresora DIDWANIA SF-5/200 para la compresión, sus componentes son: Compresor, motor a prueba de explosión, control de caja, ventilador de refrigeración, separador de aceite/gas, tuberías, componentes de seguridad y bastidor.

## 6. PERSONAS QUE RESPONDIERON ESTE CUESTIONARIO

Persona de contacto	Dr. José Godofredo Peña
---------------------	-------------------------

Cargo	Especialista en la producción de biometano
E-mail	<a href="mailto:godofpenada@yahoo.es">godofpenada@yahoo.es</a>
Persona de contacto	Sr. Aurelio Romaña
Cargo	Operador de la planta de biogás
E-mail	-

## 7. PERSONAS QUE RESPONDIERON Y VALIDARON ESTE CUESTIONARIO

Persona de contacto	Dr. Gonzalo Dávila del Carpio
Cargo	Especialista en la producción de biometano
E-mail	<a href="mailto:gdavilad@ucsm.edu.pe">gdavilad@ucsm.edu.pe</a>
Persona de contacto	Dr. Juan Reategui Ordoñez
Cargo	Especialista en la producción de biogás
E-mail	<a href="mailto:jreategui@ucsm.edu.pe">jreategui@ucsm.edu.pe</a>

**Anexo 5:** Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de transporte de la materia prima

**Tabla 18.** Detalles del vehículo para el transporte de la materia prima

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Vehículo	Tractor		
Modelo	FIAT 70-66		
Cantidad	1		
Peso	3150	kg	Tractor Data. 2018
Potencia	51.5	kW	Tractor Data. 2018
Esperanza de vida	22	años	Muñoz & Llanos. 2012
Años de servicio	35	años	
Distancia de transporte	1	km	
Tiempo de transporte	24	h	
Energía	1236	kWh	
Combustible	Diésel		
Consumo semanal	3.22	kg	
Consumo anual	154.56	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 6:** Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano.

Proceso: Mezclado con agua

**Tabla 19.** Detalles de infraestructura: Poza de alimentación

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Poza de alimentación		
Cantidad	1		
Material	Hormigón y varillas de acero		Dosificación de Cemento, arena, grava, agua. Cálculo web (2020)
Esperanza de vida	65	años	DCC (2017)
Largo (L1)	1.9	m	
Ancho (A1)	1.85	m	
Alto (H1)	2.36	m	
Largo (L2)	1.54	m	
Ancho (A2)	1.49	m	
Alto (H2)	2	m	
Espesor	0.36	m	
Volumen 1	8.295	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	4.589	m <sup>3</sup>	
Volumen total	3.706	m <sup>3</sup>	
Peso del Cemento	1193.40	kg	322 kg de cemento/m <sup>3</sup>
Peso del Arena	2553.57	kg	689 kg de arena/m <sup>3</sup>
Peso del Grava	4362.20	kg	1177 kg de grava/m <sup>3</sup>
Peso del Agua	578.17	kg	156 kg agua/m <sup>3</sup>
Peso del Acero	337.74	kg	Aceros Arequipa (2008) (Anexo 10)

**Fuente:** Elaboración propia

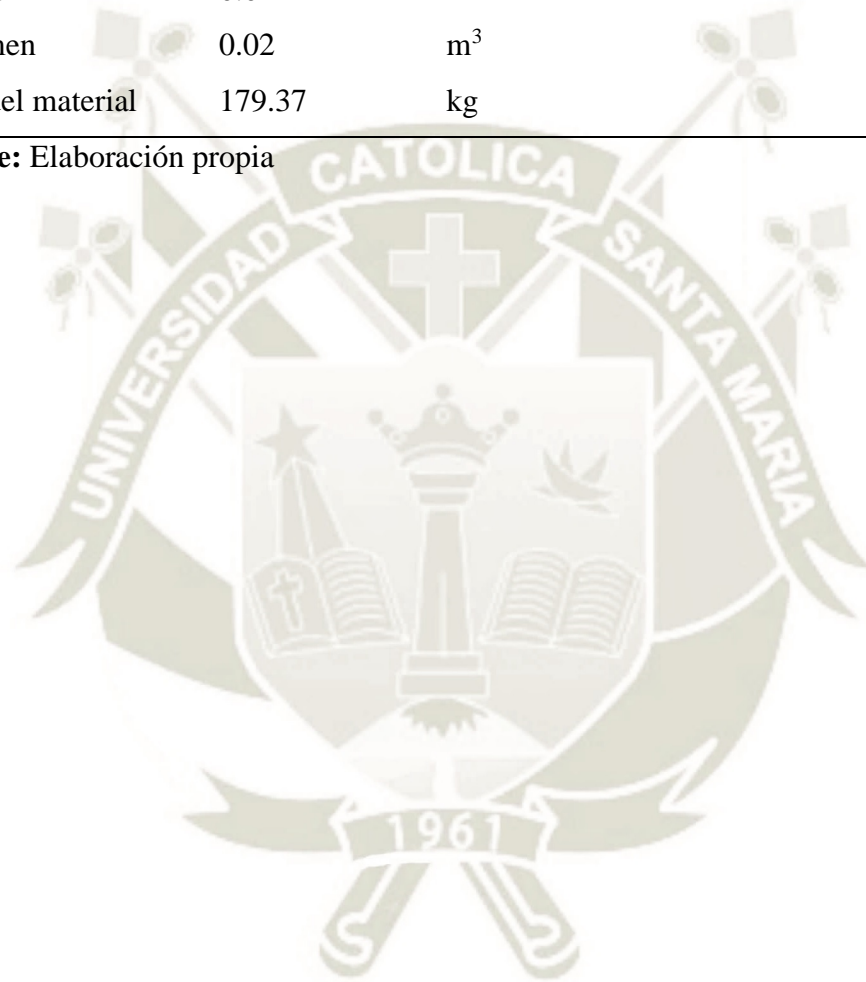
**Tabla 20.** Detalles de infraestructura: Cubierta de protección

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Cubierta de protección		

Cantidad	1		
Material	Hierro		
Esperanza de vida	60	años	Metal Construction Association (2014)
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado (2015)
Largo (L1)	1.54	m	
Ancho (A1)	1.48	m	
Espesor	0.01	m	
Volumen	0.02	m <sup>3</sup>	
Peso del material	179.37	kg	

---

**Fuente:** Elaboración propia



**Anexo 7:** Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano.  
Proceso: Conversión (Digestión Anaeróbica)

**Tabla 21.** Detalles de maquinarias: Bomba de lodos

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Bomba de lodos		
Modelo	CSL-CV07-CS		
Cantidad	2		
Esperanza de vida	18	años	Metso Minerals (2012).
Peso	54	kg	Peso por unidad: 27 kg, CRI Pumps (2019).
Potencia	0.75	kW	
Operación diaria	4	h	
Operación anual	1460	h	
Consumo de energía anual	1095	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 22.** Detalles de maquinarias: Compresor

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Compresor		
Modelo	DAAC50D		
Cantidad	1		
Esperanza de vida	150	kg	Sulekha (2019)
Peso	15	años	Purchasing (2019)
Potencia	1.5	kW	
Operación diaria	24	h	
Operación anual	8760	h	
Consumo de energía anual	13140	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 23.** *Detalles de infraestructura: Contenedores de metal*

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Contenedores de metal		
Cantidad	2		
Material	Hierro		
Esperanza de vida	25	años	Container Technology (2018)
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado (2015)
Largo (L1)	6.02	m	
Ancho (A1)	2.42	m	
Alto (H1)	2.54	m	
Espesor	0.002	m	
Largo (L2)	6.018	m	
Ancho (A2)	2.418	m	
Alto (H2)	2.538	m	
Volumen 1	37.004	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	36.93	m <sup>3</sup>	
Volumen total	0.072	m <sup>3</sup>	
Peso bruto máximo	1132.78	kg	Peso de ambos contenedores

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 24.** *Detalles de infraestructura: Base de hormigón*

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Base de hormigón		
Cantidad	1		
Material	Hormigón		Dosificación de Cemento, arena, grava, agua. Cálculo web (2020)
Esperanza de vida	65	años	DCC (2017)
Largo (L1)	8	m	Medidas basadas en datos de los contenedores
Ancho (A1)	7	m	
Alto (H1)	0.1	m	



Volumen	5.6	m <sup>3</sup>	
Peso del Cemento	1803.2	kg	322 kg de cemento/m <sup>3</sup>
Peso del Arena	3858.4	kg	689 kg de arena/m <sup>3</sup>
Peso del Grava	6591.2	kg	1177 kg de grava/m <sup>3</sup>
Peso del Agua	873.6	kg	156 kg agua/m <sup>3</sup>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 25.** Detalles de equipos: Tanque de hidrólisis

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Tanque de hidrólisis		
Cantidad	2		
Material	Fibra de vidrio		Poliéster reforzado con fibra de vidrio
Esperanza de vida	28	años	
Densidad del material	1559.25	kg/m <sup>3</sup>	Performance Composites (2020)
Diámetro (D1)	1,4	m	
Radio (r2)	0,7	m	
Altura (H1)	2,3	m	
Diámetro (D2)	1,38	m	
Radio (r2)	0,69	m	
Altura (H2)	2,28	m	
Espesor	0,01	m	
Volumen 1	3,54	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	3,41	m <sup>3</sup>	
Volumen cilindro	0,130	m <sup>3</sup>	
Peso del material	203,25	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 26.** Detalles de equipos: Biodigestor de geomembrana

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Biodigestor de geomembrana		
Cantidad	1		

Material	PVC		
Esperanza de vida	28	años	
Densidad del material	1380	kg/m <sup>3</sup>	Lenntech, 2020
Volumen estimado	0.138	m <sup>3</sup>	
Peso del material	191.09	kg	Peso estimado, equipo inaccesible.

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 27.** Detalles de equipos: Reservorio de gas

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Reservorio de gas		
Cantidad	1		
Material	PVC		Polietileno de alta densidad
Esperanza de vida	28	años	
Densidad del material	1380	kg/m <sup>3</sup>	Lenntech, 2020
Largo (L1)	10	m	
Ancho (A1)	3.19	m	
Alto (H1)	1.59	m	
Largo (L2)	9.998	m	
Ancho (A2)	3.178	m	
Alto (H2)	1.588	m	
Espesor	0.001	m	
Volumen 1	26.557	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	26.419	m <sup>3</sup>	
Volumen elipse	0.138	m <sup>3</sup>	
Peso del material	191.09	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 8:** Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano.

Proceso: Purificación del biogás

**Tabla 28.** Detalles de maquinarias: Compresor

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Compresor		
Modelo	Galeazzi UB-30		
Cantidad	1		
Esperanza de vida	15	años	Purchasing (2019)
Peso	30.8	kg	
Potencia	2.237	kW	
Operación diaria	4	h	
Operación anual	1460	h	
Consumo de energía anual	3266.17	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 29.** Detalles de maquinarias: Radiador

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Radiador		
Modelo	ELCO N16-30/394		
Cantidad	2		
Esperanza de vida	6	años	Dato proporcionado verbalmente por el especialista
Peso	2.26	kg	Peso por unidad: 1.13 kg
Potencia	0.14	kW	
Operación diaria	4	h	
Operación anual	1460	h	
Consumo de energía anual	204.40	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 30.** *Detalles de maquinarias: Enfriador de agua*

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Enfriador de agua		
Modelo	UTY411ESTE04JB		Termally Protected
Cantidad	1		
Esperanza de vida	6	años	Dato proporcionado verbalmente por el especialista
Peso	46	kg	
Potencia	0.022	kW	
Operación diaria	4	h	
Operación anual	1460	h	
Consumo de energía anual	32.12	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 31.** *Detalles de maquinarias: Bomba de agua*

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Bomba de agua		
Modelo	Power Spreayer MB-KT70		
Cantidad	1		
Esperanza de vida	18	años	Metso Minerals (2012)
Peso	46	kg	
Potencia	3.7285	kW	
Operación diaria	4	h	
Operación anual	1460	h	
Consumo de energía anual	5443,610	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 32.** *Detalles de infraestructura: Estructura de hierro*

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Estructura de		

	hierro		
Cantidad	1		
Material	Hierro		
Tiempo de vida	60	años	Metal Construction Association (2014)
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado (2015)
Largo Estructura (A1)	11.56	m	
Ancho Estructura (A1)	5.8	m	
Alto Estructura (H1)	2.88	m	
Alto Estructura (H2)	1.3	m	
Perímetro de barras	131.508	m	Cálculo según medidas
Largo de barra (l1)	0.075	m	
Ancho de barra (a1)	0.075	m	
Espesor de barra	0.003	m	
Largo de barra (l2)	0.069	m	
Ancho de barra (a2)	0.069	m	
Volumen 1	0.740	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	0.626	m <sup>3</sup>	
Volumen total	0.114	m <sup>3</sup>	
Peso del material	894.212	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 33.** Detalles de infraestructura: Base de hormigón

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Base de hormigón		
Cantidad	1		
Material	Concreto		Dosificación de Cemento, arena, grava, agua. Cálculo web (2020)
Esperanza de vida	65	años	DCC (2017)
Largo (L1)	12	m	Medidas basadas en datos de la estructura de hierro.

Ancho (A1)	6	m	
Alto (H1)	0.1	m	
Volumen	7.2	m <sup>3</sup>	
Peso del Cemento	2318.4	kg	322 kg de cemento/m <sup>3</sup>
Peso del Arena	4960.8	kg	689 kg de arena/m <sup>3</sup>
Peso del Grava	8474.4	kg	1177 kg de grava/m <sup>3</sup>
Peso del Agua	1123.2	kg	156 kg agua/m <sup>3</sup>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 34:** Detalles de infraestructura: Techo de metal

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Infraestructura	Techo de metal		
Cantidad	30		Cantidad basada en los datos de la estructura de hierro
Material	Acero		Acero Galvanizado
Esperanza de vida	60	años	Metal Construction Association (2014)
Largo	3.6	m	
Ancho	0.8	m	
Peso del material	100.5	kg	Peso por unidad: 3.35 kg. Sodimac (2020)

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 35:** Detalles de equipos: Filtros Scrubber

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Filtros Scrubber		
Cantidad	2	p	
Material	Hierro		
Esperanza de vida	28	años	Esperanza de vida de la planta
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado (2015)
Diámetro (D1)	0,29	m	
Radio (r2)	0,145	m	
Altura (H1)	3	m	
Diámetro (D2)	0.28	m	

Radio (r2)	0.14	m
Altura (H2)	2.99	m
Espesor	0.005	m
Volumen 1	0.198	m <sup>3</sup>
Volumen 2	0.184	m <sup>3</sup>
Volumen cilindro	0.014	m <sup>3</sup>
Peso del material	221.085	kg

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 36:** Detalles de equipos: Filtros PSA

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Filtros tipo PSA		
Cantidad	2		
Material	Hierro		
Esperanza de vida	28	años	Esperanza de vida de la planta
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado (2015)
Diámetro (D1)	0.29	m	
Radio (r2)	0.145	m	
Altura (H1)	2.5	m	
Diámetro (D2)	0.28	m	
Radio (r2)	0.14	m	
Altura (H2)	2.49	m	
Espesor	0.005	m	
Volumen 1	0.165	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	0.153	m <sup>3</sup>	
Volumen cilindro	0.012	m <sup>3</sup>	
Peso del material	185.853	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 37:** Detalles de equipos: Tanque de almacenamiento

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Tanque de almacenamiento		

Cantidad	1		
Material	Hierro		
Esperanza de vida	28	años	Esperanza de vida de la planta
Densidad del material	7870	kg/m <sup>3</sup>	Rojas-Sola & Molino-Delgado, 2015
Diámetro (D1)	0.8	m	
Radio (r2)	0.4	m	
Altura (H1)	2.65	m	
Diámetro (D2)	0.79	m	
Radio (r2)	0.395	m	
Altura (H2)	2.64	m	
Espesor	0.005	m	
Volumen 1	1.332	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	1.294	m <sup>3</sup>	
Volumen cilindro	0.038	m <sup>3</sup>	
Peso del material	299.016	kg	

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 38:** Detalles de accesorios: Tuberías

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Equipo	Tuberías		
Cantidad	1		
Material	PVC		
Esperanza de vida	70	años	European Commission (2004)
Densidad del material	1380	kg/m <sup>3</sup>	Lenntech (2020)
Diámetro (D1)	0.0127	m	
Radio (r2)	0.0064	m	
Altura (H1)	9.38	m	
Diámetro (D2)	0.0087	m	
Radio (r2)	0.0044	m	
Altura (H2)	9.376	m	
Espesor	0.0020	m	
Volumen 1	0.0012	m <sup>3</sup>	
Volumen 2	0.0006	m <sup>3</sup>	



---

Volumen cilindro	0.0006	m <sup>3</sup>
Peso del material	0.871	kg

---

**Fuente:** Elaboración propia



**Anexo 9:** Inventario de ciclo de vida del biometano. Etapa de producción de biometano.

Proceso: Almacenamiento del biometano

**Tabla 39.** Detalles de maquinaria: Compresor

Ítem	Datos reales	Unidad	Comentario
Maquinaria	Compresor		
Modelo	DIDWANIA SF-5/200		
Cantidad	1	p	
Esperanza de vida	25	años	Dato basado en las memorias del proyecto
Peso	568	kg	Dato recuperado de memorias del proyecto
Potencia	4	kW	
Operación diaria	4.5	h	
Operación anual	1642,5	h	
Consumo de energía anual	6570	kWh	

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 10.** Procedimiento para el cálculo de la infraestructura: Cantidad de acero en la poza de alimentación

**Tabla 40.** Longitud de las varillas por superficies

S	O	Dimensiones reales (m)	Recubrimiento (m)	Longitud de varilla (m)	Distancia entre varillas (m)	Número de varillas (unidades)	Longitud total por superficie (m)
A	V	1,85	0,14	1,71	0,25	7	11,70
A	H	2,36	0,14	2,22	0,25	9	19,71
A'	V	1,85	0,14	1,71	0,25	7	11,70
A'	H	2,36	0,14	2,22	0,25	9	19,71
B	V	1,9	0,14	1,76	0,25	7	12,39
B	H	2,36	0,14	2,22	0,25	9	19,71
B'	V	1,9	0,14	1,76	0,25	7	12,39
B'	H	2,36	0,14	2,22	0,25	9	19,71
C	V	1,85	0,14	1,71	0,25	7	11,70
C	H	1,9	0,14	1,76	0,25	7	12,39
<b>Total</b>							<b>151,11</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Leyenda:

- S: Se refiere a las superficies que componen la poza de alimentación. Debido a que posee una estructura casi cúbica que, sin contar una superficie hueca, posee 5 superficies, representadas por las letras A, A', B, B' y C.
- O: Se refiere a la orientación de las varillas en cada superficie. Se asume que las varillas se encuentran orientadas de manera vertical (V) y horizontal (H).
- Dimensiones reales: Datos reales de toda la poza de alimentación recolectados en campo.
- Recubrimiento: Hormigón de 0.14 m sobre las varillas de acero (Aceros Arequipa, 2008).

- Longitud de varilla: Es la diferencia entre la dimensión real de la poza y el recubrimiento
- Distancia entre varillas: Se asume una distancia entre las varillas de 0.25 m (Aceros Arequipa, 2008).
- Número de varillas: Resulta de la división entre la longitud de varilla sobre la distancia entre varillas.
- Longitud total por superficie: Es el producto de la longitud de varilla por el número de varillas.
- Total: Es la longitud total las varillas de acero presenten en todas las superficies.

**Tabla 41.** *Peso de las varillas de acero*

Diámetro de barra	Peso métrico nominal (kg/m)	Longitud total las varillas de la poza (m)	Peso de las varillas (kg)
3/4	2,235 (Aceros Arequipa, 2008)	151,11	337,74

**Fuente:** Elaboración propia

**Anexo 11.** Resultados del Análisis de Ciclo de Vida

**Tabla 42.** Resultados de la evaluación del impacto ambiental de la planta de Biometano en el fundo La Católica, Majes, Arequipa, según categorías.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Transporte</b>	<b>Conversión</b>	<b>Purificación</b>	<b>Almacenamiento</b>	<b>Total</b>
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	5.26E-11	1.79E-02	1.11E-02	8.25E-03	3.72E-02
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	5.99E-18	1.29E-09	8.01E-10	5.94E-10	2.68E-09
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	3.16E-13	2.80E-05	1.74E-05	1.29E-05	5.83E-05
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	1.53E-14	1.28E-06	7.99E-07	5.89E-07	2.67E-06
Eutrofización marina	kg N eq	1.75E-14	1.20E-06	7.48E-07	5.53E-07	2.50E-06
Toxicidad humana	kg 1.4-DB eq	1.96E-11	3.24E-03	2.02E-03	1.49E-03	6.75E-03
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	4.29E-13	2.67E-05	1.66E-05	1.23E-05	5.57E-05
Formación de materia particulada	kg PM <sub>10</sub> eq	1.81E-13	1.19E-05	7.42E-06	5.47E-06	2.48E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DB eq	6.59E-15	1.17E-06	7.28E-07	5.39E-07	2.43E-06
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1.4-DB eq	1.18E-12	8.49E-04	5.28E-04	3.92E-04	1.77E-03

Ecotoxicidad marina	kg 1.4-DB eq	1.08E-12	7.02E-04	4.37E-04	3.24E-04	1.46E-03
Radiación ionizante	kBq U235 eq	3.27E-12	8.69E-05	5.47E-05	4.00E-05	1.82E-04
Ocupación de tierras agrícolas	m <sup>2</sup> a	8.90E-12	9.84E-04	6.12E-04	4.54E-04	2.05E-03
Ocupación del suelo urbano	m <sup>2</sup> a	1.97E-12	3.12E-05	1.96E-05	1.44E-05	6.51E-05
Transformación natural de la tierra	m <sup>2</sup>	1.38E-14	2.58E-06	1.60E-06	1.19E-06	5.37E-06
Agotamiento del agua	m <sup>3</sup>	2.27E-13	8.18E-04	5.08E-04	3.77E-04	1.70E-03
Agotamiento de metales	kg Fe eq	7.31E-12	5.17E-04	3.36E-04	2.36E-04	1.09E-03
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	1.57E-11	6.58E-03	4.09E-03	3.04E-03	1.37E-02

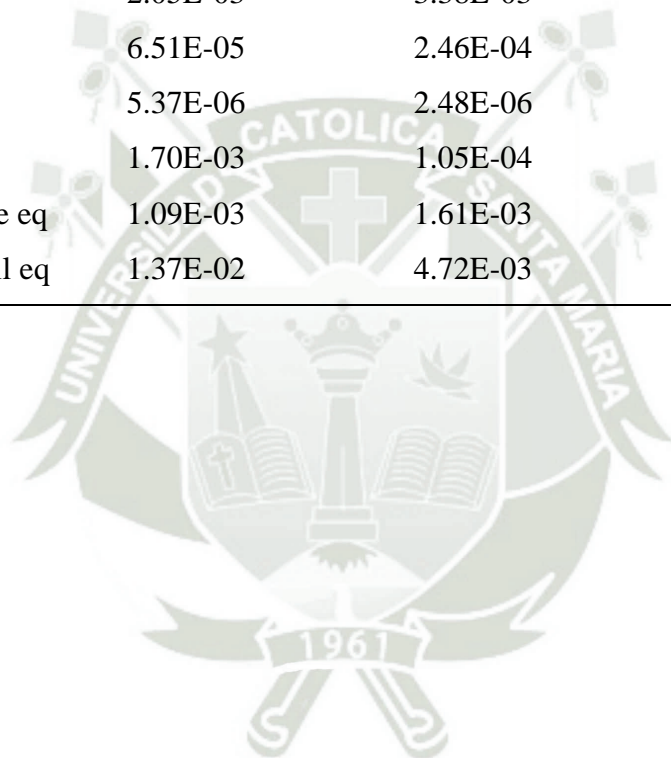
**Fuente:** (SimaPro, 2020).

**Tabla 43.** Resultados de la evaluación del impacto ambiental según categorías de impacto de los combustibles biometano, diésel y gas natural

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>Biometano Majes</b>	<b>Biometano Ecoinvent</b>	<b>Diesel Ecoinvent</b>	<b>Gas Natural Ecoinvent</b>
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> eq	3.72E-02	5.14E-02	2.39E-02	1.23E-02
Agotamiento del ozono	kg CFC-11 eq	2.68E-09	8.68E-10	3.20E-08	3.50E-10
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	5.83E-05	5.04E-03	2.26E-04	7.32E-05
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	2.67E-06	1.15E-05	2.61E-06	8.12E-07
Eutrofización marina	kg N eq	2.50E-06	1.90E-04	4.72E-06	1.38E-06
Toxicidad humana	kg 1.4-DB eq	6.75E-03	1.20E-02	3.83E-03	9.87E-03
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	5.57E-05	8.04E-05	1.45E-04	6.62E-05
Formación de materia particulada	kg PM <sub>10</sub> eq	2.48E-05	6.94E-04	6.74E-05	1.88E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DB eq	2.43E-06	1.29E-06	2.74E-06	9.65E-06
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1.4-DB eq	1.77E-03	3.53E-04	1.46E-04	6.94E-04
Ecotoxicidad marina	kg 1.4-DB eq	1.46E-03	3.35E-04	1.15E-04	2.12E-04

Radiación ionizante	kBq U235 eq	1.82E-04	2.04E-03	1.13E-02	2.06E-04
Ocupación de tierras agrícolas	m <sup>2</sup> a	2.05E-03	3.38E-03	2.12E-04	3.45E-05
Ocupación del suelo urbano	m <sup>2</sup> a	6.51E-05	2.46E-04	2.08E-04	2.33E-05
Transformación natural de la tierra	m <sup>2</sup>	5.37E-06	2.48E-06	6.46E-05	8.11E-06
Agotamiento del agua	m <sup>3</sup>	1.70E-03	1.05E-04	2.75E-04	1.23E-05
Agotamiento de metales	kg Fe eq	1.09E-03	1.61E-03	5.97E-04	2.16E-04
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	1.37E-02	4.72E-03	6.00E-02	4.29E-02

**Fuente:** (SimaPro, 2020).





**Anexo 12.** Registro fotográfico



**Fotografía 1.** Vista general de la planta de biogás y el laboratorio de presurización



**Fotografía 2.** Poza de alimentación donde ocurre el mezclado con agua



**Fotografía 3.** Tanques de hidrólisis en los contenedores de metal donde ocurre la conversión



**Fotografía 4.** Toma de datos en el laboratorio de biometano para el inventario de ciclo de vida.