

DIVISIÓN DE ESTUDIO DE POSGRADOS E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“Análisis del Ciclo de Vida de una planta de
aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos
para la generación de biocombustibles”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

I.I Denisse Astrid Hernández Castelán

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre





"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA: 30/10/2017
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

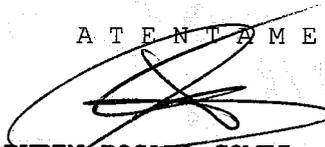
C. DENISSE ASTRID HERNANDEZ CASTELAN
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"ANALISIS DEL CICLO DE VIDA DE UNA PLANTA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS PARA LA GENERACION DE BIOCOMBUSTIBLES".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


RUBEN POSADA GOMEZ

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

C.A. TITULACIÓN



SECRETARIA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA

ggc



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 17/10/2017

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

DENISSE ASTRID HERNANDEZ CASTELAN

la cual lleva el título de:

"ANALISIS DEL CICLO DE VIDA DE UNA PLANTA DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS PARA LA GENERACION DE BIOCOMBUSTIBLES".

Y concluyen que se acepta.

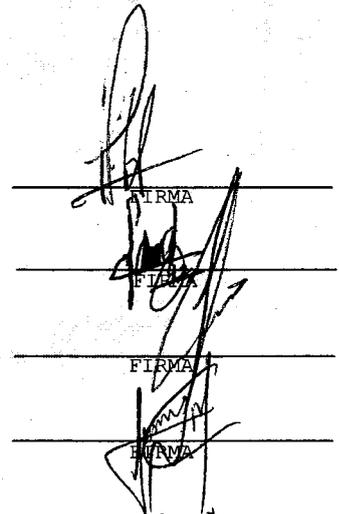
A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

SECRETARIO : DR. **ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE**

VOCAL : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

VOCAL SUP. : DR. **JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS**



FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

OPCION: I **Tesis**



DEDICATORIAS

A Dios primeramente por regalarme vida para este paso más en mi vida profesional.

A mi mamá por su inmenso amor, por siempre impulsarme a crecer y por siempre creer en mí.

A mi papa por siempre estar para mí mostrando su cariño en todo momento, a mi hermana por estar para mí apoyándome.

A Oscar por tu cariño, por estar pendiente de mi siempre, por darme ánimo y apoyo incondicional.

A mis amigas que nunca me dejaron sola, y a mis compañeros que en algún momento me dieron una palabra amable o una sonrisa para hacer mi estancia más amena.

RECONOCIMIENTOS

A mi asesor el Dr. Alejandro Alvarado Lassman por su amabilidad, y mostrar apoyo siempre durante el desarrollo de mi proyecto.

A la M.I.Q Norma Vallejo Cantú por el apoyo recibido a lo largo de la maestría.

A mi coasesor el Dr. Alberto Aguilar Lasserre por sus recomendaciones para realizar un mejor trabajo.

Al Dr. Luis Fernando Mendoza Morales por su amabilidad y enseñanzas durante mi estancia en Mérida.

Al M.C Ramiro Meza Palacios por su disposición, amistad y apoyo incondicional.

Al CONACYT por haberme otorgado la beca No. 709063 para la realización de la maestría.

RESUMEN

“Análisis del Ciclo de Vida de una planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para la generación de biocombustibles”

Elaborada por: I.I Denisse Astrid Hernández Castelán

Dirigida por: Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Laserre

El presente trabajo es un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aplicado a una planta de biogás a escala piloto para la digestión anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO), el objetivo es evaluar el impacto ambiental causado por las actividades de la planta y desarrollar estrategias que los disminuyan y mejoren el proceso.

El ACV fue llevado a cabo siguiendo la metodología indicada en la norma ISO 14040 la cual consta de cuatro fases, en la primera fase se estableció el objetivo del estudio y los alcances de este, en la segunda fase se realizó un inventario que muestra el flujo de entradas y salidas del proceso de la planta, en la tercera fase se evaluó tal inventario en el software SimaPro utilizando el ecoindicador IMPACT 2002+, en la cuarta fase se interpretaron los resultados de la evaluación los cuales indicaron que el mayor impacto en las diferentes categorías era debido al uso prolongado de los equipos eléctricos, aunado a esto se plantearon tres escenarios como propuestas de mejoras al proceso (1.Producción de biometano, 2.Cogeneración de energía y 3.Quema de biogás) los cuales también se evaluaron con finalidad comparativa, para elegir el escenario más conveniente.

ABSTRACT

"Life Cycle Analysis of an organic solid waste treatment plant for biofuels generation"

Elaborada por: I.I Denisse Astrid Hernández Castelán

Dirigida por: Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Laserre

The present work is a Life Cycle Analysis (LCA) applied to a pilot scale biogas plant for the anaerobic digestion of Organic Solid Wastes (OSW), the objective is to evaluate the environmental impact caused by the activities of the plant and develop strategies that reduce them and improve the process.

The LCA was carried out following the methodology indicated in the standard ISO 14040 which consists of four phases, in the first phase was established the objective of the study and the scope of this, in the second phase an inventory was carried out showing the flow of inputs and outputs of the plant process, in the third phase this inventory was evaluated in the software SimaPro using the eco-indicator IMPACT 2002+, in the fourth phase the results of the evaluation were interpreted which indicated that the greater impact in the different categories was due to the prolonged use of the electrical equipment, in addition to this, three scenarios were proposed as proposals for improvements to the process (1. Production of biomethane, 2. Energy cogeneration and 3. Biogas combustion), which also were evaluated for comparative purposes, to choose the most convenient scenario.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS.....	VI
NOMENCLATURA	VIII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	4
1.2 Efecto invernadero y calentamiento global	5
1.3 Digestión anaerobia y generación de biogás	6
1.3.1 Etapas de la digestión anaerobia	7
1.3.2 Principales factores de control en la digestión anaerobia	9
1.3.3 Digestión anaerobia en dos fases	10
1.3.4 Aplicaciones del biogás.....	11
1.4 Proceso de limpieza del biogás	12
1.4.1 Tecnologías de purificación del biogás	13
1.4.2 Lavado de gases “Water scrubbing”	13
1.4.3 Bioscrubber para eliminar sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	15
1.5 Antorchas quemadoras de biogás	16
1.6 Reactor de biopelícula	17
1.7 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI)	18
1.8 Reactor de Lecho Granular Expandido (EGSB)	19

1.9 Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	19
1.9.1 Origen del ACV	19
1.9.2 Norma ISO 14040	20
1.9.3 Fases del Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	23
1.9.4 ACV en el área de bioenergéticos.....	24
1.10 Evaluación ambiental.....	26
1.10.1 SimaPro y base de datos para el ACV	26
1.10.2 Método de evaluación de impacto del ACV.....	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.1 Definición del objetivo y alcance del ACV.....	37
2.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV).....	37
2.2.1 Obtención del inventario.....	38
2.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (ECV)	41
2.3.1 Clasificación	43
2.3.2 Caracterización	43
2.3.3 Normalización	43
2.3.4 Modelo funcional utilizado para la evaluación de los impactos.	43
2.4 Interpretación de los indicadores y propuestas de mejora.....	45
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
3.1 Objetivos y alcances del ACV	48
3.1.1 Objetivo del estudio.....	48
3.1.2 Alcance del estudio	48
3.1.3 Límites del sistema.....	49
3.1.4 Función y unidad funcional	50

3.2 Inventario del Ciclo de Vida de la planta de biogás	51
3.3 Evaluación e interpretación de los impactos de la planta de biogás.....	51
3.4 Evaluación e interpretación de los escenarios propuestos.....	61
3.4.1 Escenario 1 “Producción de biometano”.	61
3.4.2 Escenario 2 “Co-generación de energía”.	65
3.4.3 Escenario 3 “Quema del biogás”	69
3.4.4 Comparación de los tres escenarios propuestos.	71
CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Composición de los RSU por tipo de residuo (SEDESOL, 2012).....	5
Figura 1.2 Proceso de la digestión anaerobia (Molino et al., 2013).....	7
Figura 1.3 Conversión del biogás de RSO a biometano (Ryckebosch et al., 2011)..	12
Figura 1.4 Proceso “PWS” (Xu et al., 2015).	15
Figura 1.5 Proceso “Bioscrubber” (Allegue y Hinge, 2014).	16
Figura 1.6 Fases del Análisis del Ciclo de Vida (ISO 14040, 1998).	22
Figura 1.7 Esquema general de IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).	28
Figura 2.1 Metodología general del ACV de la planta de biogás.....	36
Figura 2.2 Planta a escala piloto de aprovechamiento de RSO.	37
Figura 2.3 RSO provenientes del mercado Emiliano Zapata.	39
Figura 2.4 Molino triturador marca VEYCO modelo MCV 320.	39
Figura 2.5 Reactores para la D.A en dos fases.....	40
Figura 2.6 Modelo de evaluación de IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).....	44
Figura 2.7 Escenario 1 “Producción de biometano”.	45
Figura 2.8 Escenario 2 “Cogeneración de electricidad”.....	46
Figura 2.9 Escenario 3 “Quema de biogás”.....	46
Figura 3.1 Sistema de producción de biogás a partir de residuos de alimentos.	50
Figura 3.2 Gráfica de la caracterización del inventario de la planta de biogás.....	53
Figura 3.3 Evaluación del inventario de la planta en categorías medias.....	54
Figura 3.4 Evaluación del inventario de la planta en categorías de daño.	56

Figura 3.5 Normalización de los impactos de la planta en categorías medias.	59
Figura 3.6 Normalización de impactos de la planta en categorías de daño.	59
Figura 3.7 Evaluación del escenario 1 en categorías de daño.	63
Figura 3.8 Normalización del escenario 1 en categorías de daño.	63
Figura 3.9 Evaluación del escenario 2 en categorías de daño.	68
Figura 3.10 Normalización del escenario 2 en categorías de daño.	68
Figura 3.11 Evaluación del escenario 3 en categorías de daño.	70
Figura 3.12 Normalización del escenario 3 en categorías de daño.	70
Figura 3.13 Evaluación de los tres escenarios en categorías medias.	72
Figura 3.14 Evaluación de los tres escenarios en categorías finales.	73
Figura 3.15 Normalización de los tres escenarios en categorías finales.	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Tratamientos secundarios de limpieza del biogás (Morero et al., 2010)...	14
Tabla 1.2 Estudios de ACV aplicados en el área de bioenergéticos.	25
Tabla 1.3 Metodologías de evaluación de impacto (Aranda y Zabalza, 2010).	27
Tabla 1.4 Sustancias de referencia y unidades usadas en IMPACT 2002+ (Humbert, 2014).	32
Tabla 2.1 Datos experimentales de la planta de biogás a escala piloto.	40
Tabla 2.2 Factores de impacto del inventario de la planta a escala piloto.	42
Tabla 3.1 Inventario de entradas y salidas de la planta de biogás.	51
Tabla 3.2 Caracterización del inventario de la planta de biogás.	52
Tabla 3.3 Evaluación del inventario de la planta en categorías medias.	55
Tabla 3.4 Evaluación del inventario de la planta en categorías de daño.	58
Tabla 3.5 Normalización de los impactos de la planta en categorías de daño.	58
Tabla 3.6 Inventario del escenario 1 “Producción de biometano”.....	62
Tabla 3.7 Evaluación del escenario 1 en categorías de daño.	64
Tabla 3.8 Normalización del escenario 1 en categorías de daño.	64
Tabla 3.9 Inventario del escenario 2 “Co-generación de energía”.....	66
Tabla 3.10 Evaluación del escenario 2 en categorías de daño.	67
Tabla 3.11 Normalización del escenario 2 en categorías de daño.	67
Tabla 3.12 Inventario del escenario 3 “Quema del biogás”	69
Tabla 3.13 Evaluación del escenario 3 en categorías de daño.	69

Tabla 3.14 Normalización del escenario 3 en categorías de daño. 71

NOMENCLATURA

Nomenclatura	Descripción	Unidad
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	-
RSU	Residuos Sólidos Urbanos	-
RSO	Residuos Sólidos Orgánicos	-
GEI	Gases de Efecto Invernadero	-
PCA	Potencial de Calentamiento Atmosférico	-
DA	Digestión Anaerobia	-
PWS	Pressured Water Scrubbing	-
RLF	Reactor de Lecho Fluidizado	-
RLFI	Reactor de Lecho Fluidizado Inverso	-
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed	-
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry	-
ISO	International Organization for Standardization	-
ACV	Análisis del Ciclo de Vida	-
ICV	Inventario del Ciclo de Vida	-
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	-
DQO	Demanda Química de Oxígeno	mg/L
ST	Sólidos Totales	mg/L

INTRODUCCIÓN

En los últimos años los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se han ido incrementando y gran parte de ellos son Residuos Sólidos Orgánicos (RSO), los daños causados por dichos residuos han sido perjudiciales al ambiente y a la salud, por ello surge como solución la utilización de las energías renovables que tiene como objetivo la protección de la salud humana, la naturaleza y los recursos (Xu et al., 2015). Entre las nuevas formas de generación de biocombustibles se encuentran las plantas de biogás que permiten el aprovechamiento de los RSO y que es el tema sobre el que se basa el actual trabajo.

Como cualquier otro tipo de generación de energía, su producción tiene un efecto sobre el medio ambiente, y con el fin de permitir un mayor desarrollo de esta tecnología, es importante ser consciente de la calidad y cantidad de los efectos causados, los cuales pueden ser medidos por varios métodos, siendo uno de los más calificados para este propósito el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), ya que es el único método basado en las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO).

El Análisis del Ciclo de Vida presente, estudia el proceso de la planta de biogás tomando en cuenta requerimientos del proceso e indicadores ambientales con el fin de realizar las cuatro etapas de este análisis establecido en la ISO 14040 (Definición de objetivos y alcances del estudio, análisis del inventario del flujo de entradas y salidas, la evaluación del impacto causado por las actividades de la planta llevado a cabo con la metodología IMPACT 2002+ y la interpretación de los resultados).

El seguimiento de las cuatro etapas de este análisis permite el desarrollo de estrategias de mejora que reducen el impacto de las actividades y mejoran el funcionamiento de la planta de biogás.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología ambiental para la optimización de los indicadores del impacto ecológico y económico de una planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para la producción de biogás, basada en el análisis del ciclo de vida (ISO 14040).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los alcances y objetivos del ACV a través de los requerimientos principales del proceso y los ambientales para el establecimiento de los indicadores a tomar en consideración.
- Identificar y cuantificar las entradas y salidas del sistema mediante la recolección de datos o simulación del proceso para la elaboración del inventario de emisiones.
- Clasificar, caracterizar y evaluar cada una de las emisiones siguiendo la metodología IMPACT 2002+ en SimaPro® para conocer el grado de impacto de cada una de ellas.
- Desarrollar estrategias de mejora del proceso con el objetivo de disminuir los impactos ambientales.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) son los generados en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas; son también los residuos que provienen de establecimientos o de la vía pública, o los que resultan de la limpieza de las vías y lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios (SEMARNAT, 2009).

Dentro de los RSU puede haber residuos orgánicos o residuos inorgánicos:

- Los residuos orgánicos provienen de los seres vivos como plantas, hongos y animales. Se pudren fácilmente y con ellos puede producirse abono para enriquecer suelos empobrecidos, fertilizar campos agrícolas o jardines domésticos. Algunos ejemplos de los residuos orgánicos son: Papel, cartón, restos de comida o de cosechas.
- Los residuos inorgánicos provienen de recursos naturales no vivos o inertes como algunos minerales o el petróleo. Son residuos que la naturaleza puede tardar muchísimos años en descomponer. Muchos de estos residuos pueden volver a utilizarse como materia prima, algunos de los residuos inorgánicos son: Plásticos, vidrio, materiales de construcción.

En 2011, a nivel nacional se generaron 112.5 mil toneladas diarias de RSU, de las cuales el 5.5 % correspondieron al estado de Veracruz, con una disposición final en rellenos sanitarios del 40 % de los residuos (SEMARNAT, 2013).

De los residuos que se generan en nuestro país, un poco más de la mitad (52%) son residuos orgánicos (Figura 1.1).

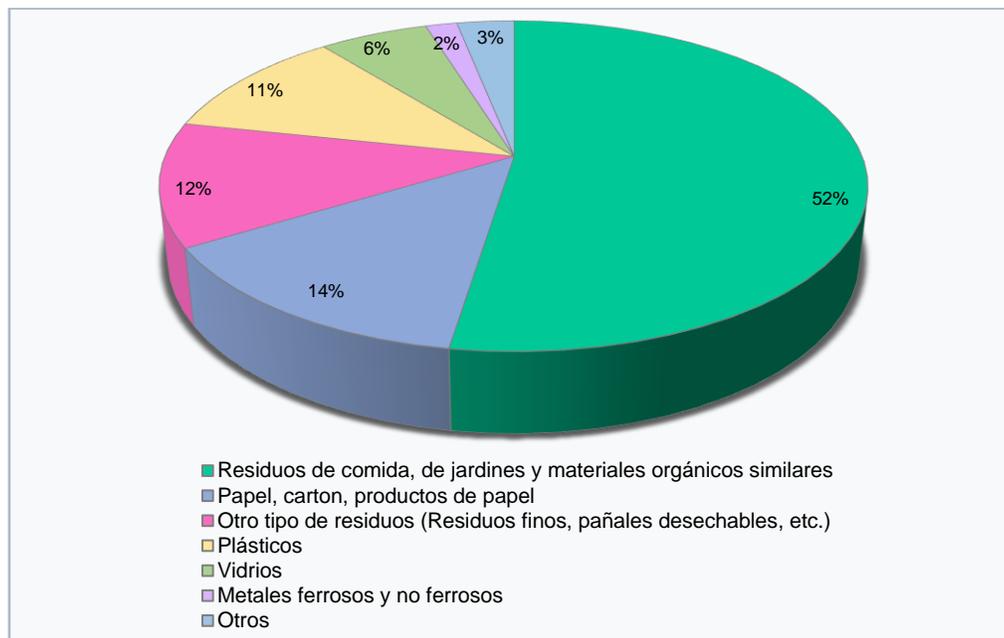


Figura 1.1 Composición de los RSU por tipo de residuo (SEDESOL, 2012).

1.2 Efecto invernadero y calentamiento global

El efecto invernadero es un fenómeno natural en el cuál la radiación de calor de la superficie de la tierra es absorbida por los gases de la atmósfera y es remitida en todas direcciones, lo que resulta en un aumento de la temperatura superficial. Los principales gases implicados en el efecto invernadero son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrógeno (N_2O) y gases fluorados.

El Calentamiento Global es un aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre que se ha estado observando desde finales del siglo XIX. El Calentamiento Global ha ido de la mano con una tendencia hacia un incremento en el CO_2 lo que indica que la causa de esta tendencia hacia el calentamiento es una intensificación del efecto invernadero (Caballero et al., 2007).

Vu et al., (2015) utilizaron el ACV para evaluar el impacto ambiental asociado con digestores a pequeña escala que trabajan con estiércol para la producción de biogás en Vietnam, el análisis de sensibilidad mostró que los digestores de biogás podrían ser un medio para reducir el calentamiento global si las emisiones de metano se mantienen bajas.

El metano es un GEI con un potencial de calentamiento global relativamente alto, cada Kg de metano calienta la tierra 23 veces más que la misma masa del dióxido de carbono cuando se promedian más de 100 años (Browne y Murphy, 2013). El metano es emitido de una variedad de actividades relacionadas con el hombre y de fuentes naturales. Las actividades humanas incluyen producción de combustibles fósiles, cría de animales, cultivos de arroz, combustión de biomásas y el manejo de desperdicios, estas actividades liberan cantidades significantes de metano a la atmosfera, y las fuentes naturales de metano incluyen humedales, cuerpos de agua dulce, océanos, termitas, incendios forestales, suelos no húmedos, hidratos de gas, etc. Estas emisiones pueden ser reducidas por métodos de digestión controlada.

Las emisiones antropógenas de GEI totales entre 2000 y 2010 fueron las más altas en la historia de la humanidad y llegaron a 49 ($\pm 4,5$) GtCO₂ eq/año en 2010 (IPCC, 2014).

1.3 Digestión anaerobia y generación de biogás

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales), estos son convertidos en biogás, una mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores. Mediante el proceso de digestión anaerobia es posible convertir grandes cantidades de residuos, como vegetales, estiércol, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la

industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. Los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo (Varnero, 2011).

1.3.1 Etapas de la digestión anaerobia

Muchos grupos de investigaciones han mostrado que el proceso de digestión anaerobia puede ser dividido en tres etapas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Figura 1.2).

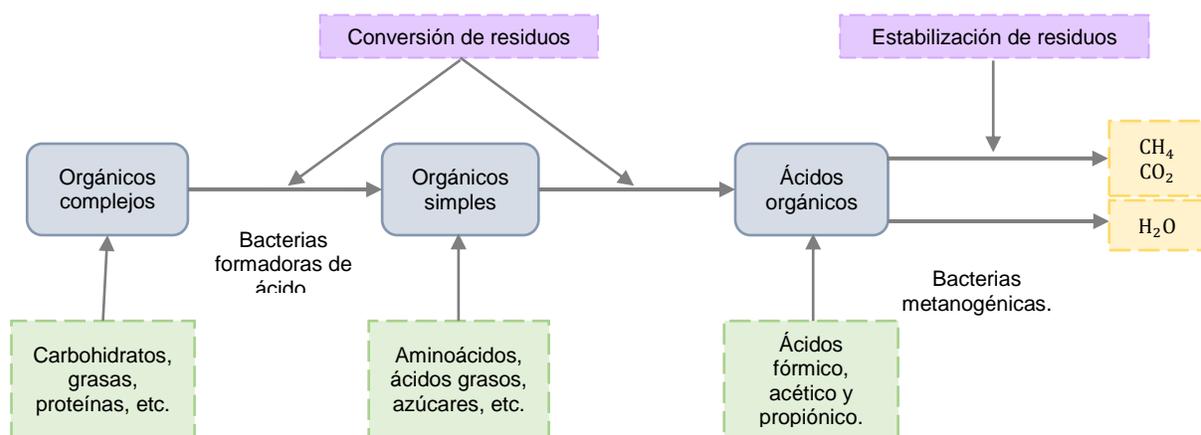


Figura 1.2 Proceso de la digestión anaerobia (Molino et al., 2013).

En la primer etapa se degrada tanto el material orgánico insoluble como los compuestos de alto peso molecular tales como lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, en sustancias orgánicas solubles por ejemplo, aminoácidos y

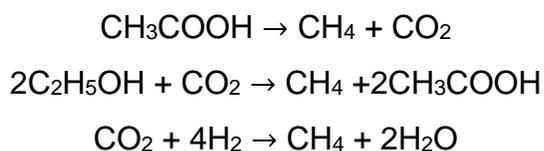
ácidos grasos (Appels et al., 2008). La actividad hidrolítica es de importancia significativa en el alto contenido orgánico de residuos y puede ser un limitante de la velocidad. Algunas operaciones industriales superan esta limitación usando reactivos químicos para mejorar el rendimiento del proceso de hidrólisis.

En la segunda etapa, las bacterias acetogénicas, también conocidos como formadores de ácidos, convierten los productos de la primera etapa a ácidos orgánicos simples, dióxido de carbono e hidrógeno. Los principales ácidos producidos son el ácido acético (CH₃COOH), ácido propiónico (CH₃CH₂COOH), ácido butírico (CH₃CH₂CH₂COOH), y etanol (C₂H₅OH). Los productos formados durante la acetogénesis se deben a un número de diferentes microbios, por ejemplo, *Syntrophobacter wolfei*, un descomponedor propionato y *Syntrophomonas wolfei*, un descomponedor butirato (Molino et al., 2013). La reacción acetogénesis se muestra a continuación:



Finalmente, en la tercera etapa, el metano es producido por bacterias formadoras de metano (también conocidos como metanógenos), esto sucede de dos maneras: o bien por medio de la escisión de las moléculas de ácido acético para generar dióxido de carbono y metano, o por reducción de dióxido de carbono con hidrógeno.

Las bacterias metanogénicas incluyen *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcina*. Los metanógenos también se pueden dividir en dos grupos: acetato y consumidores de hidrógeno (H₂) y dióxido de carbono (CO₂). Las reacciones metanogénesis se pueden expresar de la siguiente manera:



1.3.2 Principales factores de control en la digestión anaerobia

Como todo proceso biológico la digestión anaerobia depende de las condiciones presentes en el medio para que pueda efectuarse de manera exitosa. Para un adecuado desarrollo de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica en el proceso de biodegradación es importante conocer, en qué medida contribuyen ciertos factores físicos y químicos. Según un estudio realizado por Acosta et al., (2005) los principales factores físicos y químicos tienen la siguiente influencia en la digestión anaerobia:

- Composición del residual.
- Someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de retención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digester empleado.
- No variaciones bruscas de temperatura. De acuerdo a la temperatura las bacterias se pueden dividir en psicrófilas (25 °C), mesofílicas (32-38 °C) y termofílicas (42-55 °C). Con el fin de promover la actividad bacteriana un óptimo de funcionamiento se encuentra alrededor de los 35 °C. (Rutz et al., 2007).
- La acidez determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6.6 y 7.6, que se logra a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.
- Las mejores condiciones de operación resultan con menos de un 10 % de sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.

- Para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de nutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales).
- Existencia de cantidades de N y P en el residuo, compatibles con la cantidad de carbono.
- No deben existir tóxicos, cuando el residuo es digerido algunos compuestos pueden transformarse en tóxicos como N (NH_4^+ , NH_3) y S (S_2^-). Aparte del oxígeno, la digestión puede inhibirse con concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas, además de metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos.
- No debe haber sobrecargas orgánicas o tóxicas además del límite soportable por el proceso.

1.3.3 Digestión anaerobia en dos fases

En los reactores anaerobios de una sola fase todas las etapas de la digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) se llevan a cabo en un mismo ambiente, esto no resulta ser lo más apropiado para todos los miembros del consorcio, ya que las actividades metabólicas de las bacterias acidogénicas (tasa de crecimiento mayor) y de las metanogénicas (crecimiento lento y requerimiento estricto de pH) a largos Tiempos de Residencia Hidráulico (TRH), bajo condiciones ambientales que favorecen principalmente a las bacterias productoras de metano, suelen retardar el metabolismo de las poblaciones acidogénicas (Terreros-Mecalco et al., 2009).

Por este motivo se implementan los sistemas de digestión anaerobia en dos fases el cual consiste en un primer reactor con alto tiempo de retención, en el que se

favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor (Campos et al., 2012).

1.3.4 Aplicaciones del biogás

Existen diversas opciones para la utilización del biogás, dentro de las cuales destacan:

- **Producción de calor o vapor:** Esto aplica principalmente en aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua, y en ocasiones también para iluminación.
- **Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad:** Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria, otros producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. Las turbinas de gas se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S y vapor de agua.
- **Combustible para vehículos:** El biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro, además del sistema de gasolina normal de combustible. El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diésel.

1.4 Proceso de limpieza del biogás

El biogás de la digestión anaerobia y vertederos consiste principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), pero también existen componentes traza que son encontrados frecuentemente en el biogás son vapor de agua (H_2O), sulfuro de hidrógeno (H_2S), siloxanos, hidrocarburos, amoníaco (NH_3), oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO) y nitrógeno (N_2).

Existen dos pasos con fin de convertir el biogás a biometano, 1.-Proceso de limpieza de biogás para remover los componentes traza y 2.-Proceso de mejoramiento para ajustar el valor calorífico (Figura 1.3). Este último es generalmente con fin de mejorar los estándares para el uso de combustible vehicular o para la inyección a la red de gas natural.

Existen diferentes métodos para limpieza y mejoramiento del biogás, los cuales difieren en su funcionamiento, eficiencia y operación (Ryckebosch et al., 2011).

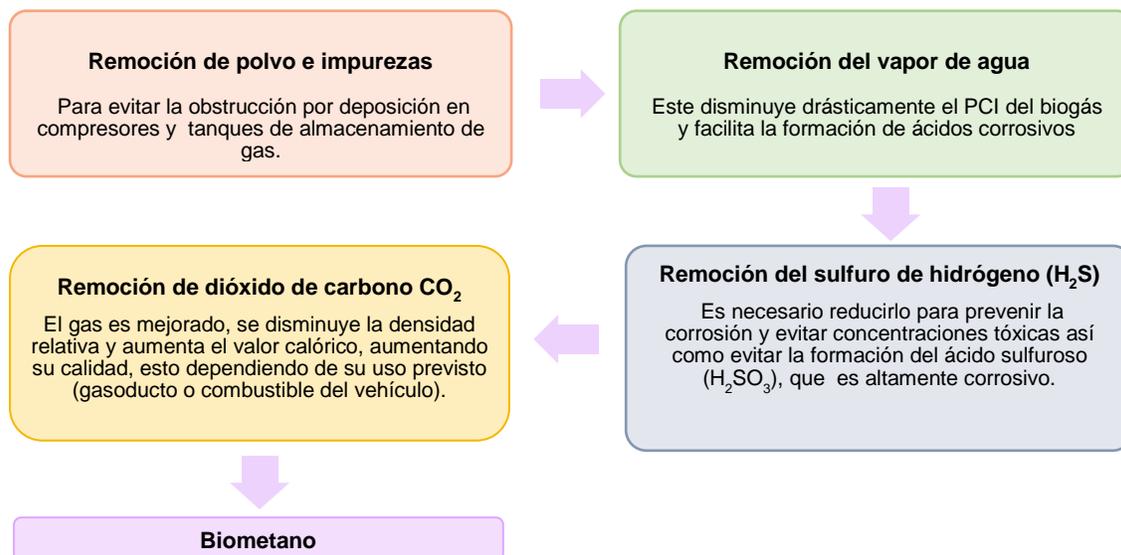


Figura 1.3 Conversión del biogás de RSO a biometano (Ryckebosch et al., 2011).

1.4.1 Tecnologías de purificación del biogás

Para eliminar el agua en combinación con espuma y polvo se utilizan métodos de condensación (separadores ciclónicos o trampas de humedad) y métodos de secado (adsorción o absorción).

Se han desarrollado varias técnicas para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás, tal como la dosificación de aire al biogás y la adición de cloruro de hierro ($FeCl_3$) al tanque del digestor. Técnicas como la adsorción en gránulos de óxido de hierro y la absorción en líquidos eliminan el sulfuro de hidrógeno (H_2S) después de la digestión. Posteriormente, los componentes traza como siloxanos, hidrocarburos, amoníaco (NH_3), oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO) y nitrógeno (N_2) pueden requerir etapas de extracción adicionales, si no se eliminan suficientemente por otras etapas de tratamiento. Por último, el metano (CH_4) debe separarse del dióxido de carbono (CO_2) mediante adsorción por oscilación de presión, separación por membrana, absorción física o química (Ryckebosch et al., 2011).

La Tabla 1.1 compara las principales características de las tecnologías de tratamiento secundario actualmente disponibles para la purificación de biogás. El método más sencillo, económico y simple para la eliminación de impurezas del biogás es el que se basa en la absorción física, utilizando agua presurizada como absorbente.

1.4.2 Lavado de gases “Water scrubbing”

Este proceso se basa en la absorción física empleando agua como solvente para disolver el dióxido de carbono (CO_2). La razón es por la solubilidad de dióxido de carbono (CO_2) en el agua es muchas veces más alta que la del metano (CH_4) en el agua. Esta tecnología se puede apreciar en la Figura 1.4.

Tabla 1.1 Tratamientos secundarios de limpieza del biogás (Morero et al., 2010).

Tratamiento	Diseño	Operación	Costo de inversión	Costo de Operación	Calidad del tratamiento
Absorción Física	Muy sencillo	Muy sencilla	Bajo	Bajo	Alta eficiencia de purificación. En algunos casos se obtiene metano puro.
Absorción química	Muy sencillo	Sencilla	Bajo	Medio	Principalmente se utiliza para remover CO ₂ , H ₂ S y vapor de agua. La eficiencia es alta aunque varía en función del compuesto químico utilizado.
Adsorción en una superficie sólida	Sencillo	Sencilla	Medio	Alto	A partir de una buena elección del absorbente, el proceso puede remover CO ₂ , H ₂ S, humedad y otras impurezas simultánea o selectivamente
Separación por membrana	Normal	Normal	Medio	Alto	Para alta purificación de CH ₄ , la permeabilidad debe ser alta, aunque los procesos de separación multietapas pueden lograr 98% de CH ₄
Separación criogénica	Normal	Normal	No hay datos disponibles	No hay datos disponibles	Tiene la ventaja de permitir la recuperación de los componentes puros en forma líquida, que pueden transportarse fácilmente, aunque no presenta alta eficiencia en la remoción de CO ₂ .
Método de conversión química	Complejo	Complejo	Muy alto	Muy alto	Reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas.
Procesos de Oxidación	Muy sencillo	Muy sencillo	Bajo	Bajo	Solo presenta alta eficiencia en la eliminación de H ₂ S y en algunos casos de vapor de agua.

El lavado con agua es usualmente una columna de absorción, el biogás es introducido en lo profundo de la columna y fluye hacia arriba, el agua entra en la columna por la parte superior y fluye hacia abajo, de manera que la transferencia de masa ocurre en una forma de contraflujo. El biogás purificado (biometano) deja la columna en la parte superior y el agua saturada con dióxido de carbono (CO₂) se deja salir en la parte inferior. La corriente de agua lavada se regenera en una columna de desorción y se reutiliza para su absorción o se utiliza solo por una vez (el

CO₂ es liberado a la atmósfera como un gas residual en caso del sistema de recirculación de agua o permanece en el agua en el caso de un sistema de paso único). El sistema sin recirculación puede ser adecuado para plantas con agua de bajo costo (por ejemplo, instalación de tratamiento de aguas residuales). Cualquier metano (CH₄) disuelto en agua es capturado y reciclado en la columna de absorción con el fin de aliviar las pérdidas de metano.

Este método también permite eliminar simultáneamente sulfuro de hidrógeno (H₂S), por lo que no es necesario un pretratamiento. El valor típico de pureza de metano (CH₄) es alrededor del 98%. (Niesner et al., 2013; Sun et al., 2015).

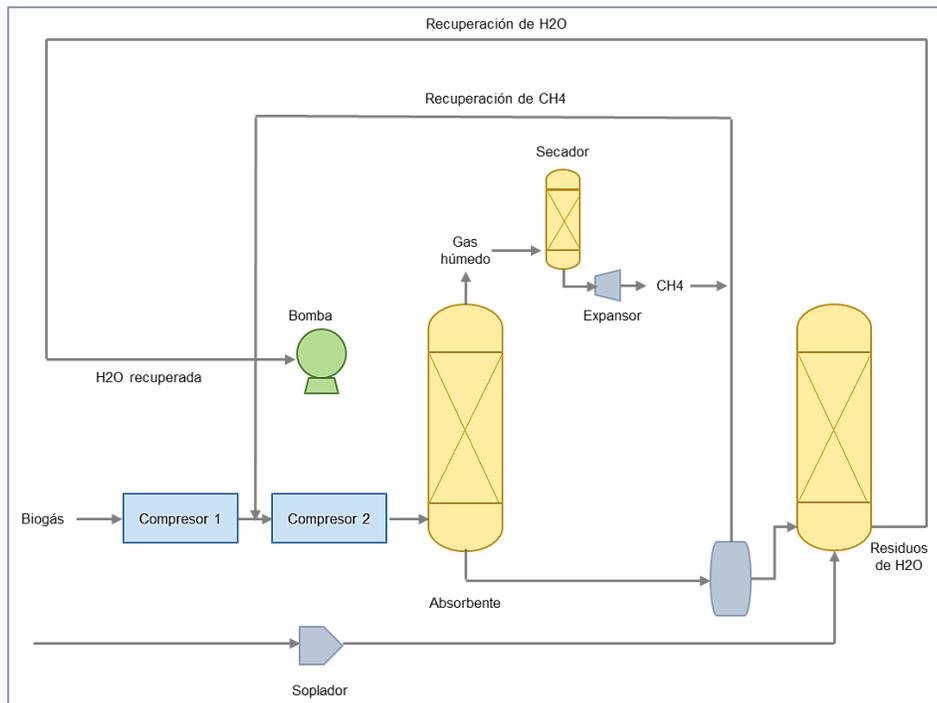


Figura 1.4 Proceso “PWS” (Xu et al., 2015).

1.4.3 Bioscrubber para eliminar sulfuro de hidrógeno (H₂S)

Esta tecnología consiste en dos reactores. La primera parte es una torre de absorción, donde los contaminantes son absorbidos en una fase líquida. Esta fase

líquida va a un segundo reactor, que es una especie de unidad de lodo activado, en este último, los microorganismos crecen en conglomeración de biopelículas en el agua degradando los contaminantes, el efluente de esta unidad se recircula sobre la torre de absorción. La adición de nutrientes, oxígeno y pH se controlan continuamente para mantener el crecimiento microbiano y alta actividad. El exceso de biomasa y subproductos se purgan continuamente del sistema.

Una ventaja de este proceso con respecto a los filtros biológicos es que no hay inyección de oxígeno o nitrógeno en la corriente de biogás. En general, el contenido de H_2S en el biogás se reduce de aproximadamente 2% en volumen a 10 a 100 ppmv, aunque también se pueden alcanzar niveles de sólo unos pocos ppmv. La Figura 1.5 ilustra el proceso de esta tecnología.

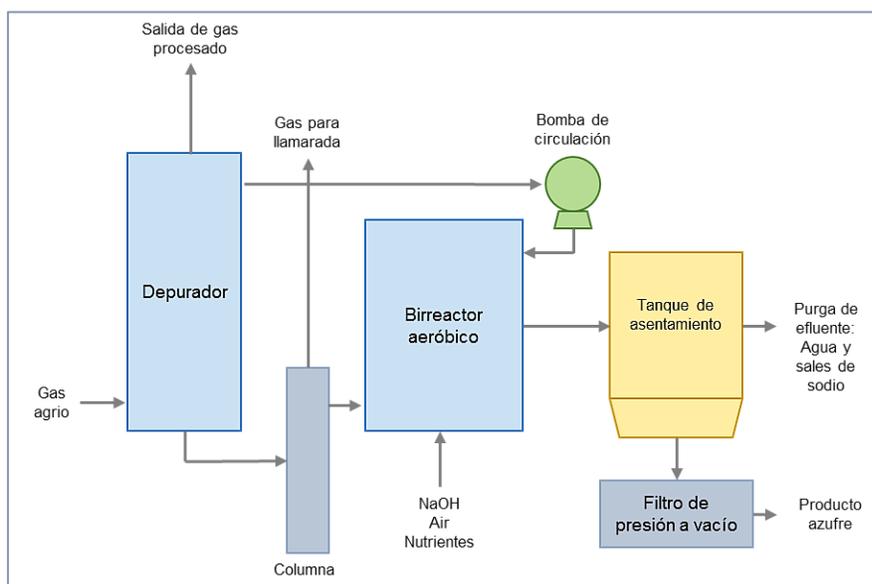


Figura 1.5 Proceso “Bioscrubber” (Allegue y Hinge, 2014).

1.5 Antorchas quemadoras de biogás

Las antorchas son los elementos de seguridad y protección para el medio ambiente, los productos de combustión son ambientalmente más ecológicos que los gases no

quemados. Los objetivos principales de la antorcha son la liberación de gas en situaciones de emergencia y quemar de forma segura y controlada estos gases no utilizables, evitando su emisión directa a la atmósfera. Las antorchas pueden ser de dos tipos, de llama abierta o de llama cerrada. En las de llama abierta el gas se quema en la atmósfera sin ningún tipo de control, mientras que en las de llama cerrada la combustión tiene lugar en una cámara refractada (EMISON, 2014).

Para lograr la máxima eficiencia en la combustión y el nivel de emisiones más bajo deben controlarse diferentes factores. Por una parte la temperatura de combustión debe ser mayor de 600 °C pero no debe sobrepasar 850 °C para evitar la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). Esto se optimiza mediante los sistemas de control que modulan la entrada y mezcla de aire de combustión. La temperatura máxima de la llama depende de la composición del gas. La utilización de catalizadores en los quemadores es una técnica que permite garantizar un bajo contenido de inquemados incluso con temperatura bajas, lo que representa un aumento de la vida útil de los equipos. El tiempo de residencia de la llama en la cámara de combustión es otro factor que ayuda a reducir contaminantes. Se debería mantener un tiempo de residencia mínimo de 1 segundo (PREMATECNIA, 2013).

1.6 Reactor de biopelícula

Un reactor de biopelícula utiliza colonias de bacterias en laboratorios y procesos industriales para producir sustancias como vinagre, ácido acético, etanol, ácido láctico, butanol, ácido fumárico, y ácido succínico. Los reactores de biopelícula son usados regularmente para el tratamiento de aguas residuales, la bacteria puede absorber o descomponer sustancias tóxicas en el agua. Los diferentes tipos de reactores de biopelícula incluyen de membrana, de lecho fluidizado, de lecho empaquetado, y de manto de lodo anaerobio de flujo ascendente.

Dentro de un reactor de biopelícula, las células bacterianas crecen dentro de una matriz estructural y se adhieren a una superficie (ya sea por carga eléctrica, atracción química, o por la concentración de nutrientes cerca de esta superficie). Las células deben estar primero adheridas irreversiblemente a la superficie para formar una biopelícula, lo cual ocurre cuando se producen sustancias poliméricas extracelulares. La biopelícula se desarrolla en el reactor en forma de canales de agua que llevan dentro muchos nutrientes que pueden llegar a las zonas del subsuelo. A medida en que se agotan los nutrientes, las células se centran en la producción de sustancias poliméricas extracelulares, después descomponen la matriz para alimento y para escapar.

1.7 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI)

Dentro de los reactores de biopelícula espontáneamente fijos más eficaces se encuentran los Reactores de Lecho Fluidizado (RLF), en los cuales la biomasa se fija en partículas de un lecho fluidizado por un líquido de flujo ascendente, esto debido a su área interfacial larga entre el líquido y la biopelícula, sus altas velocidades interfaciales y buenas características de transferencia de masa (Sokól et al., 2009).

El uso de la biomasa como soporte permite la reposición parcial del lecho fluidizado sin interrumpir la operación manteniendo una alta actividad microbiana, sin embargo el crecimiento excesivo de la biomasa en los medios de apoyo puede conducir al lavado de biopartículas, debido a que la carga de biomasa puede aumentar hasta que las biopartículas comiencen a ser arrastradas.

En Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI), las partículas de baja densidad (más pequeñas que las del líquido) son fluidizadas, ya sea por un flujo descendente de líquido o un flujo de gas ascendente a través de un lecho, lo que permite el control de carga de biomasa en un reactor, estas partículas inducen la inmovilización

y crecimiento de las bacterias, las cuales son responsables de la degradación de materia orgánica (Alvarado-Lassman et al., 2008).

1.8 Reactor de Lecho Granular Expandido (EGSB)

Este reactor es nombrado EGSB por sus siglas en inglés “Expanded Granular Sludge Bed”. Este reactor es uno de los ejemplos más importantes de los de tercera generación, ya que no necesita de soporte acarreador inerte, permite trabajar a velocidades ascensionales elevadas y tratar grandes volúmenes de agua residual en muy poco tiempo con una alta eficiencia de remoción de la carga orgánica.

Esta tecnología anaerobia emplea velocidades mayores al UASB, lo que permite mantener un lecho parcialmente expandido o fluidizado, esto mejora el contacto de la materia orgánica con la biomasa suspendida y la segregación de las partículas inactivas. Otra característica principal es su gran capacidad hidráulica que permite la construcción de reactores altos y esbeltos con escasa ocupación de espacio (Monsalvo et al., 2014)

1.9 Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

1.9.1 Origen del ACV

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) tiene sus raíces en la década de los sesenta especialmente en Estados Unidos, en donde se presentaron estudios importantes para determinar requerimientos de energía de algunos procesos y sistemas y el análisis de los efectos ambientales por el empleo de la energía, entre los que destacan el Informe de Harold Smith, presentado en la Conferencia Mundial de Energía y un estudio de la Coca Cola. A principios de la década de los setenta hasta finales de la década de los ochenta, la metodología que prevaleció para los proyectos y estudios de ACV fué el “Análisis del perfil ambiental y de recursos”. Poco

después la preocupación por el ambiente se enfocó en asuntos referentes al manejo de desechos peligrosos, la conferencia SETAC de 1990 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) en Vermont fue la primera en analizar el ACV en tres etapas principales (inventario, interpretación y mejora). Este marco de trabajo de la SETAC permaneció casi hasta finales de los noventa. En 1997 se publicó por primera vez la primera norma internacional de la serie ISO 14040 sobre ACV, titulada “Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework”. En la década del 2000, el principal énfasis fué perfeccionar las metodologías de ACV. Se realizaron esfuerzos para el desarrollo de estrategias, programas y metodologías para que las empresas y gobiernos aplicaran el ACV. Más tarde en la misma década se pasó de hablar de ACV a gestión del ciclo de vida, que incorpora no sólo los aspectos e impactos ambientales, sino también consideraciones económicas y sociales; hasta hoy se continúan estudiando métodos internacionalmente aceptados para incorporar estos dos últimos aspectos al ACV (Chacón, 2008).

1.9.2 Norma ISO 14040

Esta norma describe los principios y la estructura para efectuar estudios del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y para elaborar informes sobre los mismos, e incluye ciertos requisitos mínimos. El ACV es una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, mediante las siguientes actividades:

- Conformar un inventario de entradas y salidas relacionadas a un sistema.
- Evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a esos ingresos y rendimientos.
- Interpretar los resultados del análisis del inventario y las fases de evolución del impacto en relación con los objetivos del estudio.

El ACV estudia los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida de un producto (es decir desde la cuna hasta la tumba) desde la adquisición de la materia prima pasando por la producción, el uso y la eliminación. Entre las categorías generales de impactos ambientales que deben considerarse están el uso de recursos, la salud humana, y las consecuencias ecológicas (ISO 14040, 1998).

El ACV generalmente no considera aspectos económicos o sociales de un producto y como todas las técnicas tiene limitaciones, como las siguientes:

- Puede ser subjetiva la naturaleza de las selecciones y suposiciones que se hacen en el ACV.
- Los modelos utilizados para el análisis del inventario o para evaluar los impactos ambientales están limitados por sus propios supuestos, y es posible que no estén disponibles para todos los impactos potenciales o para todas las aplicaciones.
- Los resultados de los estudios de ACV enfocados hacia temas mundiales y regionales pueden ser inapropiados para las aplicaciones locales.
- La exactitud de los estudios de ACV puede estar limitada por la falla de acceso o de disponibilidad de los datos pertinentes, o por la calidad de los datos.
- La falta de dimensiones espaciales y temporales en los datos del inventario usados para la evaluación del impacto introduce incertidumbre en los resultados del impacto. Esta incertidumbre varía con las características espaciales y temporales de cada categoría de impacto.

Generalmente la información desarrollada en estos estudios debe ser utilizada como parte de un proceso de decisión completo o se deben usar para entender las transacciones amplias o generales. La comparación de resultados de diferentes estudios de ACV solo es posible si los supuestos y el contexto de cada estudio son similares. La ISO 14040 suministra los principios, la estructura y algunos requisitos metodológicos para realizar estudios de ACV. En las siguientes normas complementarias relacionadas con las diversas fases de este estudio se suministran detalles adicionales respecto a los métodos:

ISO 14041: Objetivo y alcance, definición y análisis del inventario del ciclo de vida.

ISO 14042. Evaluación del impacto del ciclo de vida.

ISO 14043: Interpretación del ciclo de vida.

El análisis del ciclo de vida debe incluir la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados, según se ilustra en la Figura 1.6.

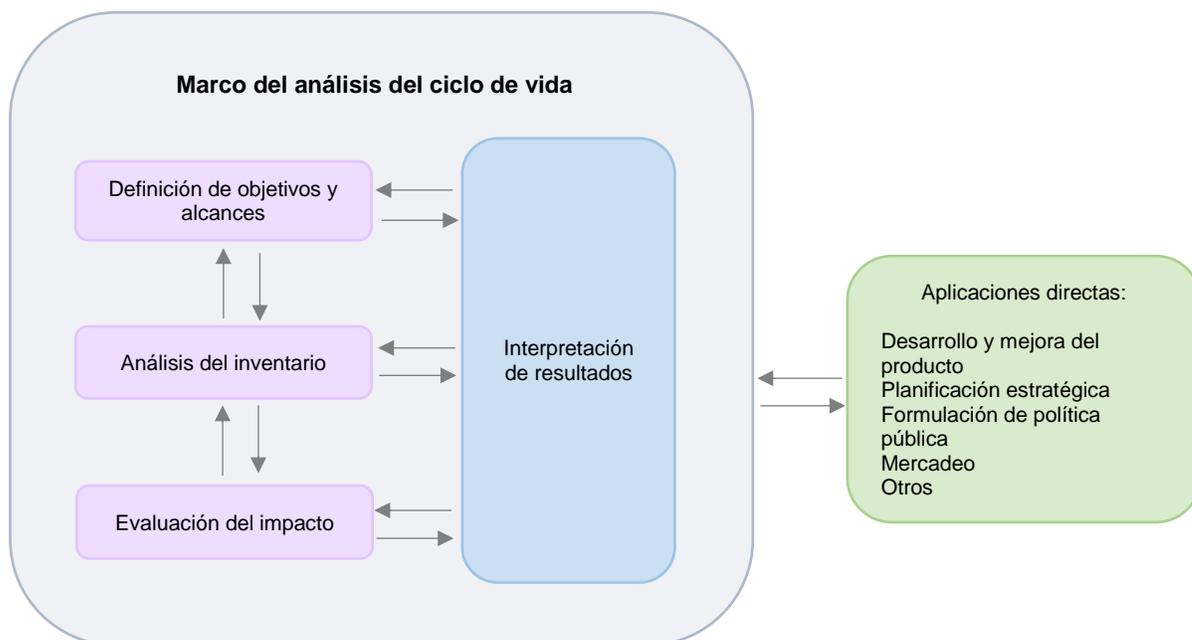


Figura 1.6 Fases del Análisis del Ciclo de Vida (ISO 14040, 1998).

1.9.3 Fases del Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

Basada en la estandarización anterior y de acuerdo con el estudio de Leinonen et al., (2013) del ACV de los sistemas de producción de huevos en Reino Unido, los principios y directrices de las cuatro fases del ACV hacen referencia a lo siguiente:

1. Definición de Objetivos y Alcance: Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.
2. Inventario del Ciclo de Vida (ICV): En esta etapa se obtienen los datos y procedimientos de cálculo necesarios para la cuantificación de las entradas del sistema, después se contabilizan todas las emisiones que tienen un efecto relevante en el proceso. Para que el inventario sea coherente con el objetivo del estudio debe haberse definido con claridad los límites del sistema, los criterios de valoración de datos y el entorno en el que se lleva a cabo el estudio.
3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV): En esta etapa el inventario de entradas y salidas es traspasado a indicadores de impactos ambientales potenciales para el medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales, para determinar su importancia. Para la realización de esta fase la norma ISO 14040 recomienda la inclusión de una clasificación (asignación de los datos obtenidos en el inventario a categorías de impacto), caracterización (modelización de los datos del inventario dentro de las categorías de impacto) y por último valoración (posible adición a los resultados en casos concretos, y sólo cuando proceda). Para el análisis de los datos y para poder efectuar valoraciones se utiliza una metodología basada en

los ecoindicadores, que son números que miden los impactos ambientales generados en un proceso

4. Interpretación de los resultados: Es la fase del ACV en la que los resultados del inventario y de la evaluación son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza un análisis de los resultados y se marcan las conclusiones. La interpretación se centra en la definición de las características del producto en términos de potencial de recuperación, reutilización, aprovechamiento y reciclado de materias primas y energía de las etapas de mayor impacto ambiental.

1.9.4 ACV en el área de bioenergéticos

Con el uso creciente de la biomasa para la energía, surgen preguntas sobre la validez de la bioenergía como un medio para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles.

La Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología capaz de revelar estos desempeños ambientales y energéticos, pero los resultados pueden ser diferentes incluso para sistemas de bioenergía aparentemente similares. Las diferencias se deben a varias razones: tipo y gestión de las materias primas, tecnologías de conversión, tecnologías de uso final, límites del sistema y sistema energético de referencia con el que se compara la cadena de bioenergía. La Tabla 1.2 muestra las diferentes aportaciones en el área e interés (Cherubini et al., 2009).

Tabla 1.2 Estudios de ACV aplicados en el área de bioenergéticos.

Autor	Sistema	Unidad funcional	Enfoque y aportación	Obtención de datos	Indicador utilizado
Gnansounou et al., 2009	Producción de bioetanol a partir del trigo	1 MJ (poder calorífico)	Cuna a la tumba -Medir el impacto ambiental -Comparar diferentes métodos para el proceso	Ecoinvent y otras bases de datos	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Cherubini et al., 2009	Producción de diferentes bioenergéticos	variadas	Cuna a la tumba -Comparar sistemas de producción de bioenergéticos y energéticos -Comparar el impacto ambiental	Literatura y simulación	GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems)
Adelt et al., 2011	Producción de biometano	1 MJ (poder calorífico)	-Medir el impacto ambiental -Medir la eficiencia del sistema	Experimentales y literatura	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Hijazi et al., 2015	Producción de biogás a partir de diferentes sustratos	1 MJ (electricidad) 1 t (biomasa)	Puerta a la tumba -Medir el impacto ambiental -Evaluar la producción del biogás	Literatura	Allocation
Vu et al., 2015	Producción de biogás a partir de estiércol de cerdos	1 t (estiércol)	Cuna a la tumba -Medir el impacto ambiental	Experimentales	ReCiPe 2008
Jin et al., 2015	Producción de biogás a partir de residuos de alimentos y generación de energía	1 t (residuos)	Puerta a la tumba -Medir el impacto ambiental	Reportes estadísticos y literatura	CML2001
Xu et al., 2015	Sistema de biogás a partir de residuos alimenticios	1 t (Sólidos volátiles)	Cuna a la tumba -Medir el impacto ambiental -Comparación de escenarios	Reportes ambientales y literatura	-ReCiPe (versión no especificada)
Wang et al., 2015	Producción de biogás a partir de paja	1 t (paja seca)	Cuna al a puerta -Medir el impacto ambiental -Medir el potencial de calentamiento global en diferentes horizontes de tiempo	Base de datos	Ecoindicador 99 e IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

1.10 Evaluación ambiental

La evaluación de los impactos es lo que diferencia al ACV de algunas otras técnicas de este tipo (ambientales), pues los indicadores utilizados son muy particulares, yendo más allá de algunos como la huella ecológica o huella de carbono. Hasta este punto el ACV sería sólo una identificación de entradas y salidas del sistema. Existen diversas formas relativamente sencillas de llevar a cabo esta evaluación, pues existen diversas herramientas útiles, como el software y bases de datos comerciales que llevan a cabo la tarea de cuantificar, clasificar, normalizar y ponderar los impactos con tan sólo la información del inventario (López, 2015).

1.10.1 SimaPro y base de datos para el ACV

Existen diversos software comerciales para la evaluación ambiental, en donde la decisión de cuál utilizar dependerá del objetivo y tipo de sistema a analizar.

En este estudio se utilizó SimaPro de la compañía holandesa Pré Consultants, este software es una herramienta completa y flexible ya que ofrece una interfaz de usuario intuitiva basada en la normativa ISO 14040 y puede ser utilizado para desarrollar complejos modelos parametrizados en distintos escenarios (Aranda y Zabalza, 2010). El software, como todos los demás, necesita de una base de datos para realizar la evaluación, dicha base de datos debe contener información sobre la producción de materias primas utilizadas en el proceso, así como las emisiones resultantes de dicha producción.

1.10.2 Método de evaluación de impacto del ACV

Los ecoindicadores son metodologías de evaluación que representan el impacto ambiental total de un proceso a través de cantidades numéricas, cuya interpretación

es relativamente simple: cuanto mayor es el indicador, mayor es el impacto ambiental asociado. Cabe mencionar que cada metodología maneja datos e hipótesis distintas y sus resultados no son comparables entre sí. La Tabla 1.3 muestra las principales metodologías aplicadas en el ACV.

Para el análisis presente de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para la generación de biogás se decidió utilizar uno de los indicadores que se encuentra entre los más comunes, el indicador IMPACT 2002+ ya que brinda una fácil interpretación de los impactos evaluados, pues cada una de las emisiones se transforma en una sustancia de referencia. Otra de las razones de su elección es el uso de indicadores globales o puntos finales (endpoints), los cuales son la sumatoria de las categorías iniciales (midpoints), haciendo así más sencilla la representación final.

Tabla 1.3 Metodologías de evaluación de impacto (Aranda y Zabalza, 2010).

Metodología	Características
Ecoindicador 95	Método de distancia al objetivo, basado en objetivos científicos, incluye modelos orientados a los daños
Ecoindicador 99	Actualización del método Ecoindicador 95, utiliza indicadores de categoría de impacto final, incluye tres versiones que consideran distintas hipótesis.
CML 92	Método de impacto intermedio muy utilizado con una caracterización relativamente simple y diversas opciones de normalización.
CML 2 baseline 2000	Actualización del método CML 92 con modelos más avanzados
EPS 2000	Método orientado a daños que considera la monetarización (disposición a pagar) como ponderación.
IMPACT 2002 +	Método orientado a los daños con muchas semejanzas al método Ecoindicador 99, pero con los factores de toxicidad completamente recalculados.
RECIPE	Método reciente que integra y actualiza los métodos Ecoindicador 99 y CML 2, incluyendo categorías de impacto intermedio y final.

Jolliet et al., (2003) propone el uso de la metodología IMPACT 2002+ (Impact Assessment of Chemical Toxics) por su implementación factible de un enfoque combinado punto-medio/daño (midpoint/damage), en mejores palabras enlaza todos

los tipos de resultados del inventario (flujos elementales y otras intervenciones) a categorías medias (15 midpoints) y después a categorías de daño (4 categorías finales) como se muestra en la Figura 1.7.

Los 15 puntos medios pueden describirse a continuación:

1. Carcinógenos. Hacen referencia a aquellas sustancias y que por inhalación, ingestión o penetración cutánea pueden producir cáncer o aumento de su frecuencia.

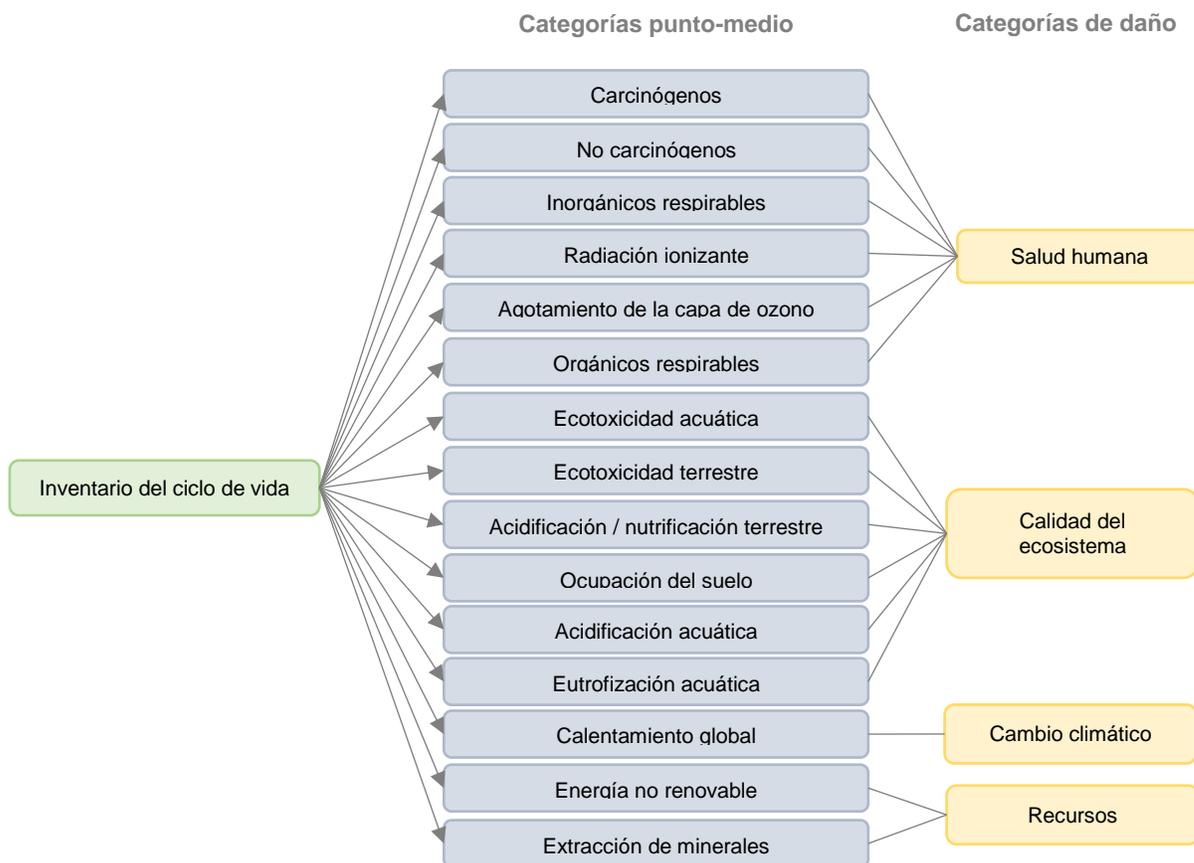


Figura 1.7 Esquema general de IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).

2. No-carcinógenos. Hacen referencia a sustancias con efectos diferentes al cáncer, como síntomas neurotóxicos, alteraciones de la microcirculación periférica, alteraciones cutáneas del tipo de la esclerodermia, alteraciones óseas, alteraciones de hígado y bazo con alteraciones de la celularidad sanguínea asociadas, síntomas genotóxicos, entre otros, cuando existe una exposición prolongada.
3. Inorgánicos respirables. Se refiere a los efectos respiratorios que son causadas por sustancias inorgánicas. Los factores de conversión se dan únicamente para emisiones al aire (ya que no es muy probable que estos contaminantes se emitirán en el suelo o agua). Las partículas superiores a 2.5 micrómetros no tienen efectos adversos, ya que no pueden entrar en el pulmón. Estas partículas pueden causar tos, dificultad para respirar, agravamiento del asma, daño al pulmón, muerte prematura en individuos con enfermedades existentes del corazón y del pulmón.
4. Radiación ionizante. La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa y beta o neutrones). La desintegración espontánea de los átomos se denomina radiactividad, y la energía excedente emitida es una forma de radiación ionizante. Los elementos inestables que se desintegran y emiten radiación ionizante se denominan radionúclidos (OMS, 2016). Los factores de conversión de esta categoría se indican para emisiones al aire y al agua.
5. Agotamiento de la capa de ozono. Esta categoría mide la degradación de la capa de ozono por la utilización de clorofluorocarbonos en su mayoría. Los factores de conversión de agotamiento de la capa de ozono se dan para las

emisiones a la atmósfera únicamente, ya que no es muy probable que los contaminantes considerados serán emitidos en el suelo o el agua.

6. Orgánicos respirables. Esta categoría puede tener impacto en la salud humana y en la calidad de los ecosistemas. Puede provocar efectos sobre el sistema nervioso central, a elevadas concentraciones puede causar asfixia sin que la víctima se dé cuenta, sus síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad, y por otra parte es causante del smog fotoquímico.
7. Ecotoxicidad acuática. Se refiere al daño de los organismos acuáticos o a las personas a través de vías acuáticas de exposición debido a sustancias incluidas bajo la categoría de toxicidad acuática. Los factores de conversión de este punto medio están dados por emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo y cuantificar los efectos sobre la superficie de agua dulce en referencia a los ríos y lagos.
8. Ecotoxicidad terrestre. Se refiere al deterioro del suelo causado por químicos, dejándolo inutilizable para cualquier actividad agrícola o social. Se ha estimado que las sustancias tienen efectos ecotoxicológicos solamente por la exposición a través de la fase acuosa en el suelo.
9. Acidificación acuática. Se define como el descenso en curso del pH de los océanos de la Tierra, causado por la absorción de dióxido de carbono antropogénico desde la atmósfera.
10. Eutrofización acuática. Es un proceso natural que consiste en el enriquecimiento de nutrientes de las aguas, a un ritmo tal que no puede ser

compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas. Sus efectos interfieren de modo importante con los distintos usos que el hombre puede hacer de los recursos acuáticos como abastecimiento de agua potable, riego, recreación, etc.

11. Acidificación/nutrificación terrestre. Es el proceso por el cual el suelo absorbe cationes de hidrógeno, reduciendo su pH, esto ocurre cuando un donante aporta protones al suelo, el donante puede ser un ácido, como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico (componentes de la lluvia ácida), estos reaccionan con el suelo liberando protones. La acidificación también ocurre cuando un elemento base como calcio, magnesio, potasio y sodio son filtrados al suelo. Los factores de conversión de este impacto están dados para emisiones al aire únicamente.
12. Ocupación del suelo. Se refiere a la cantidad de m² de tierra ocupada normalmente para cultivos orgánicos, así como los efectos causados por pesticidas y fertilizantes.
13. Calentamiento global. Se refiere a la cantidad de CO₂ equivalente emitido al aire, que causa un efecto invernadero en el planeta, aumentando la temperatura y provocando desastres naturales. Se utilizan los Potenciales de Calentamiento Atmosférico (PCA) para un horizonte temporal de 100 años.
14. Energía no-renovable. Se refiere al consumo de energías no-renovables, en términos de la energía primaria total extraída, sus factores de caracterización se calculan utilizando los valores de calentamiento superior.

15.Extracción de minerales. Hace referencia a los daños causados por la extracción de minerales de la naturaleza.

Estas categorías de punto medio son relacionadas con las cuatro categorías de daño y cada una de estas categorías tiene su propia unidad de medida que en el caso de los midpoints son sustancias de referencia y para endpoints unidades de daño más globales y entendibles como se muestra en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Sustancias de referencia y unidades usadas en IMPACT 2002+ (Humbert, 2014).

Midpoint	Sustancia de referencia	Categoría de daño	Unidad de daño
Carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	Salud humana	DALY
No carcinógenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq		
Inorgánicos respirables	kg PM _{2.5} eq ⁵		
Radiación ionizante	Bq C-14 eq ⁶		
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq ⁷		
Orgánicos respirables	kg C ₂ H ₄ eq		
Ecotoxicidad acuática	kg TEG water ⁸	Calidad del ecosistema	PDF·m ² ·Y
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG soil ⁵		
Acidificación/ nutricación terrestre	kg SO ₂ eq		
Ocupación del suelo	m ² org.arable		
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq		
Eutrofización acuática	kg PO ₄ P- lim		
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	Cambio climático	CO ₂ eq
Energías no renovables	MJ primary	Recursos	MJ
Extracción de minerales	MJ surplus		

⁵ Partículas de 2.5 micrómetros de tamaño, ⁶ Becquerel Carbono-14, ⁷ Triclorofluorometano, ⁸ TEG= trietilenglicol.

Los diferentes tipos de unidades en los tres niveles (punto medio, daño y daño normalizado) son explicadas a continuación.

En nivel punto medio:

- Kg de sustancia s_{-eq} (Equivalencia en kg de una sustancia de referencia “s”) expresa la cantidad de una sustancia de referencia “s” que es igual al impacto del contaminante considerado dentro de la categoría de punto medio de estudios (por ejemplo, el potencial de calentamiento global del metano es 27.75 veces mayor que el del CO₂, por lo que su factor de conversión es de 27.75 kg CO₂-eq).

En nivel de daño:

- DALY (Disability-Adjusted Life Years) caracteriza la gravedad de la enfermedad, lo que representa tanto la mortalidad (años de vida perdidos por muerte prematura) como la morbilidad (el tiempo de vida con menor calidad debido a una enfermedad, por ejemplo en el hospital). Por ejemplo, un producto con una puntuación de 3 DALY con respecto a salud humana, implica la pérdida de tres años de vida sobre la población general.
- PDF·m²·Y (Fracción de especies desaparecidas potencialmente sobre una cierta cantidad de m² durante una cierta cantidad de años) es la unidad de medida de los impactos en los ecosistemas, representa la fracción de las especies que desaparecieron en 1 m² de superficie de la tierra durante un año. Por ejemplo, un producto que tiene una puntuación de 0.2 PDF·m²·Y con respecto a la calidad de los ecosistemas supone la pérdida del 20 % de las especies en 1 m² de superficie terrestre durante un año.
- MJ (Megajoules): mide la cantidad de energía extraída o la necesaria para extraer un recurso.

En nivel de daño normalizado:

- Points (Son iguales a $\text{pers} \cdot Y$). Un point representa el impacto promedio en una categoría específica causada por una persona (pers) durante un año. En una primera aproximación (Sin tomar en cuenta los impactos intergeneracionales y transfronterizos), para la salud humana, también representa el impacto promedio sobre una persona durante un año (Por ejemplo un impacto de 3 points en la calidad del ecosistema representa el impacto promedio anual de 3 personas), esta interpretación es válida también para el cambio climático y recursos.

CAPITULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presenta una descripción de la metodología de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aplicado al estudio de una planta de generación de biogás, bajo los requisitos y especificaciones de la norma ISO 14040. Esta metodología tiene como objetivo la obtención del impacto ambiental causado por las actividades realizadas en la planta, permitiendo así dar una posibilidad de mejora a través de la correcta interpretación de los resultados. Los pasos de los que consta esta metodología se pueden observar detalladamente en la Figura 2.1.

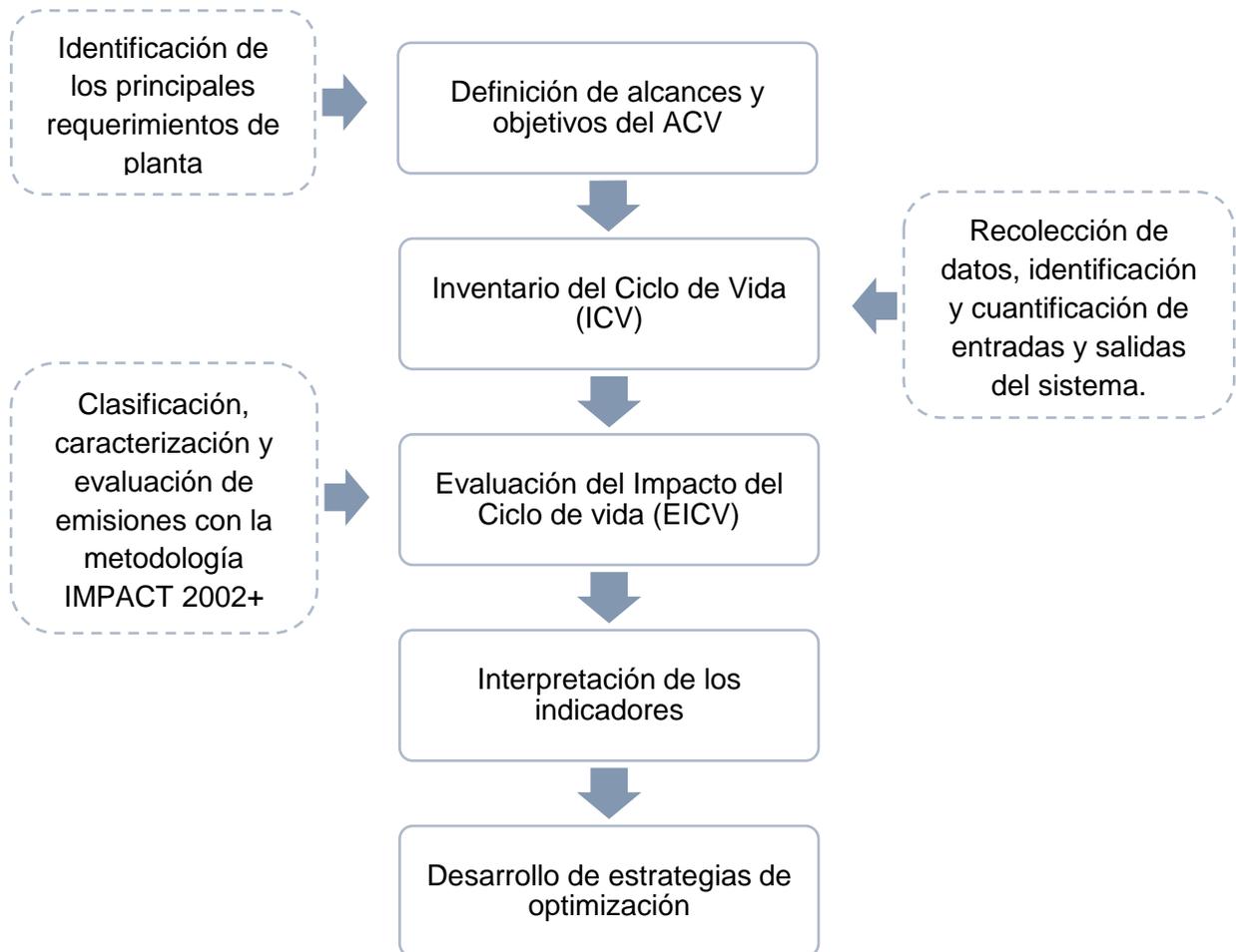


Figura 2.1 Metodología general del ACV de la planta de biogás.

2.1 Definición del objetivo y alcance del ACV.

En esta primera etapa del ACV se estipuló claramente la aplicación prevista del estudio, que incluyeron las razones del mismo y su objetivo. Dentro del enfoque del estudio se identificaron las funciones de la planta a escala piloto, sus requerimientos principales y los datos a utilizar para el inventario, se analizó la estructura del sistema de producción de biogás y cada proceso unitario, también se estableció la unidad funcional y los límites del sistema, y se seleccionó la metodología de evaluación de impacto, cabe mencionar que todos los aspectos mencionados anteriormente son la base para desarrollar las otras etapas, las cuales deben realizarse bajo el objetivo y el alcance establecido, lo que permitirá cumplir con un correcto ACV.



Figura 2.2 Planta a escala piloto de aprovechamiento de RSO.

2.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

En esta segunda etapa del ACV se recopilaban los datos referentes a las entradas y salidas al sistema. Las entradas cuantificadas incluyeron la materia prima (residuos orgánicos), los materiales (NaOH) y el uso de recursos (consumo de energía eléctrica y agua). Las salidas cuantificadas incluyeron las emisiones del producto final (emisiones al aire y al agua).

2.2.1 Obtención del inventario

El criterio de selección de las entradas y salidas fue basado en un análisis de sensibilidad, considerando masa, energía y pertinencia ambiental, de acuerdo a las que resultaron con mayor porcentaje de influencia sobre el producto del sistema, tal como lo sugiere la ISO 14041 (1999).

Las entradas y salidas fueron cuantificadas en base a la unidad funcional, esta hace referencia a una medida de funcionamiento de las salidas funcionales del sistema del proceso, su propósito es suministrar una referencia con la cual se relacionen las entradas y salidas para asegurar la compatibilidad de los resultados de la ECV.

A continuación se mencionan las entradas y salidas del proceso de generación de biogás que fueron considerados para el ICV.

Entradas:

- Los residuos orgánicos (residuos alimenticios) son la materia prima para llevar a cabo todo el proceso, estos son obtenidos del mercado Emiliano Zapata en la Ciudad de Orizaba, Veracruz (Figura 2.3).
- El primer consumo de energía eléctrica es debido al uso de un molino triturador marca VEYCO modelo MCV 320 que tritura los residuos transformándolos en una masa semisólida, el cual funciona con un motor de 5 hp (Figura 2.4). La trituradora se mantiene encendida 2.6 horas para triturar aproximadamente 89 kg de residuos.
- El consumo de agua es de suma importancia ya que se utiliza para solubilizar la materia orgánica.

- El hidróxido de Sodio (NaOH) es utilizado para elevar el pH del sustrato y favorecer la hidrólisis.
- El segundo consumo de energía es requerido para el proceso de DA y está dado por dos bombas centrifugas con cabezal de polipropileno marca Weg modelo MSL1J de 0.5 HP y una bomba marca Leroy Somer modelo 621 VI/RE de 0.5 HP, las cuales se encargan de la alimentación y recirculación en los tres reactores (Reactor hidrolítico, RLFI y EGSB). Las bombas se mantienen encendidas 6 horas por día.



Figura 2.3 RSO provenientes del mercado Emiliano Zapata.



Figura 2.4 Molino triturador marca VEYCO modelo MCV 320.

Salidas:

- Se consideraron las emisiones al aire en este caso los principales gases contenidos en el biogás, considerando el rendimiento reportado en las investigaciones experimentales, es decir metano en un 77 %, dióxido de carbono en un 22 %, oxígeno y sulfuro de hidrógeno en proporciones menores al 1 % (Tabla 2.1).
- Para las emisiones al agua se consideró la cantidad de DQO y ST contenidos en el efluente después de la Digestión Anaerobia (D.A), esto basado también en los datos reportados.



Figura 2.5 Reactores para la D.A en dos fases.

Tabla 2.1 Datos experimentales de la planta de biogás a escala piloto.

Autor	Biogás (L/d)	RLF1			EGSB			
		CH4 (%)	Remoción DQO (%)	Remoción ST (%)	Biogás (L/d)	CH4 (%)	Remoción DQO (%)	Remoción ST (%)
Miranda,2016	1000	77	82	39	960	77	85	41
Magdaleno,2013	1001	77	85	28	961	77	88	53
Lopez,2012	560	78	-	-	779	79	-	-
Perez,2016	735	76	89-93	-	712	75	89-93	-

Consideraciones para la solución del ICV:

- La obtención de la materia prima no fue tomada como parte del proceso debido a que no hay vehículo como medio del transporte que tenga un impacto sobre el medio ambiente.
- El remanente semisólido es la parte de los residuos que no son aprovechables para el proceso y pueden ocasionar daños al equipo como huesos, cáscaras, etc., y aproximadamente el 10 % de estos residuos son regresados al mercado Zapata, motivo por el cual no fueron considerados dentro del inventario.
- El volumen de alimentación diaria para el reactor hidrolítico es de 350 L. de materia orgánica solubilizada, la cual está conformada por 175 Kg de masa semisólida (residuos ya triturados) y 175 L de agua. El sustrato de salida del RH posteriormente es bombeado para la alimentación de los otros dos reactores, 200 L al EGSB y 150 L al RLFI. Lo anterior se consideró para la conversión de los datos de acuerdo a la unidad funcional establecida.
- Para las conversiones del consumo eléctrico cabe mencionar que un 1hp es equivalente a 0.7457 KW y que este consumo depende del tiempo que se utilice cada equipo (Molino triturador y bombas).

2.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (ECV)

Esta es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos potenciales de un sistema. La evaluación se realizó a través de una clasificación, caracterización, y normalización. La Tabla 2.2 muestra los factores de impacto de los elementos del inventario según sus diferentes categorías.

Tabla 2.2 Factores de impacto del inventario de la planta a escala piloto.

Categoría de impacto	Unidad	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	DQO	NaOH	Agua	C.E (trituradora)	C.E (bombas)
Carcinógenos	Kg C ₂ H ₃ Cl eq	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.98E-02	2.53E-07	2.55E-02	2.76E-02
No carcinógenos	Kg C ₂ H ₃ Cl eq	0.00E+00	0.00E+00	3.05E-01	0.00E+00	1.50E-02	8.92E-07	3.40E-03	3.92E-03
Inorgánicos respiratorios	Kg PM _{2.5} eq	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.35E-03	1.95E-07	1.49E-03	1.61E-03
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.05E+01	6.58E-04	5.13E+00	5.55E+00
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.52E-07	7.65E-12	5.09E-08	5.53E-08
Orgánicos respiratorios	Kg C ₂ H ₄ eq	6.01E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.73E-04	2.02E-08	1.22E-04	1.33E-04
Ecotoxicidad acuática	Kg TEG water	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.71E+01	7.03E-05	2.66E+01	3.11E+01
Ecotoxicidad terrestre	Kg TEG soil	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.14E+01	7.52E-05	5.03E+00	6.55E+00
Acidificación/nutrición terrestre	Kg SO ₂ eq	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.26E-02	6.78E-06	8.90E-03	9.65E-03
Ocupación de la tierra	m ² org.arable	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-02	0.00E+00	3.38E-03	3.69E-03
Acidificación acuática	Kg SO ₂ eq	0.00E+00	0.00E+00	1.88E+00	0.00E+00	6.77E-03	1.48E-06	3.31E-03	3.59E-03
Eutrofización acuática	Kg PO ₄ P-lim	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.20E-02	3.31E-04	2.29E-07	1.25E-04	1.40E-04
Calentamiento global	Kg CO ₂ eq	7.61E+00	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.12E+00	5.63E-04	6.14E-01	6.69E-01
Energía no renovable	MJ primary	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.63E+01	2.38E-03	9.53E+00	1.03E+01
Extracción mineral	MJ surplus	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.38E-02	1.49E-06	3.11E-03	5.68E-03

2.3.1 Clasificación

Se empleó la metodología de evaluación IMPACT 2002+ del software SimaPro para transformar los datos recogidos en el ICV a sus 15 categorías punto medio “midpoints” (e.g. calentamiento global, toxicidad humana, oxidación fotoquímica, etc.) y posteriormente a categorías de daño “endpoints” (e.g. salud humana, calidad del ecosistema, etc.) llamadas puntos finales (endpoints).

2.3.2 Caracterización

Una vez que cada sustancia del ICV fué asignada a una o más categorías de impacto ambiental a través de la clasificación, se comparó su valor con respecto a la sustancia de referencia de dicha categoría. Cada sustancia se multiplicó por su correspondiente factor de caracterización, de este modo se pudieron obtener valores con unidades equivalentes, los cuales pueden ser sumados para medir la contribución de las sustancias a esa categoría de impacto.

2.3.3 Normalización

Se realizó la conversión de los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización. A través de estos factores se representó el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental.

2.3.4 Modelo funcional utilizado para la evaluación de los impactos.

La figura 2.6 hace referencia a la metodología Impact 2002+, muestra el modelo de evaluación del software y la manera esquematizada del cálculo de los resultados.

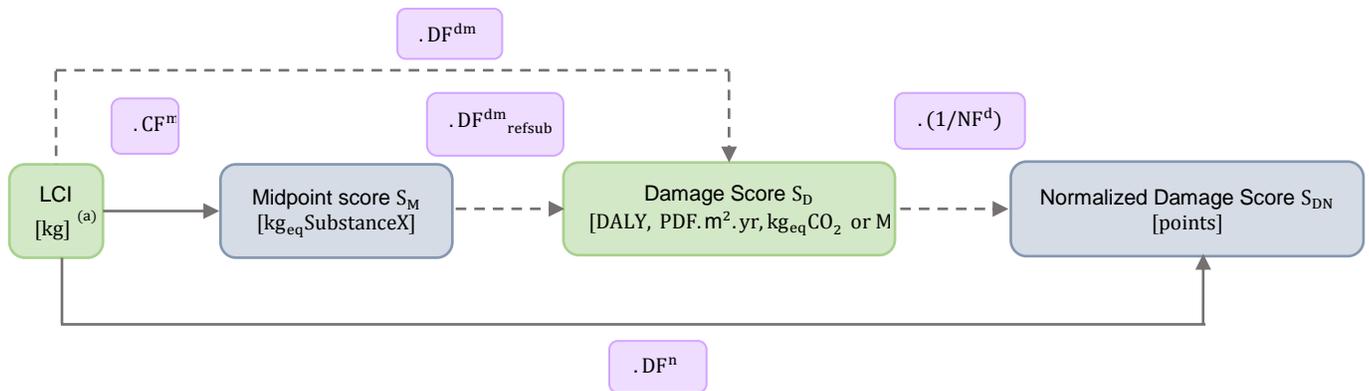


Figura 2.6 Modelo de evaluación de IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003).

Los elementos se describen a continuación:

- LCI=Flujo generalmente expresado en kg, pero (a) puede también ser expresado in Bq, m².yr o MJ
- CF^m=Factor de caracterización de midpoints [kg_{eq}SubstanceX/Kg_{emitted}]
- DF^{dm}=Factor de daño para las categorías midpoint consideradas [Damage/Kg_{emitted}]
- DF^{dm}_{refsub} = Factor de daño de la sustancia de referencia considerada para la categoría midpoint considerada [Damage/kg_{eq}SubstanceX]
- DFⁿ =Factor de daño normalizado [Points/Kg_{emitted}]
- NF_D =Factor de normalización para la categoría de daño considerada [Damage/points]

La normalización es el puntaje final y puede ser calculado de la siguiente manera:

- Midpoint score (S_M) = $\sum(\text{emissions} \cdot CF^m)$
- Damage score (S_D) = $\sum(\text{emissions} \cdot DF^{dm})$
- Normalized Damage score (S_{DN}) = $\sum(\text{emissions} \cdot DF^n)$

2.4 Interpretación de los indicadores y propuestas de mejora

En esta etapa final del ACV, se realizó un análisis tanto del inventario como de los resultados arrojados de la evaluación (tablas y gráficos), esto de acuerdo al objetivo y alcance definidos inicialmente.

Después de interpretar la evaluación, se plantearon tres escenarios alternativos como solución al problema principal del funcionamiento de la planta, con la intención de disminuir los impactos, los cuales son un proceso continuo después de la digestión anaerobia. Los tres escenarios se describen brevemente a continuación:

1.-Producción de biometano (Figura 2.7), el cual consiste en el proceso de limpieza del biogás, que consta de la eliminación de polvo e impurezas, la remoción de vapor de agua, de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y la separación del metano (CH_4) con el dióxido de carbono (CO_2). La tecnología empleada para este escenario fue Pressured Water Scrubbing (PWS).

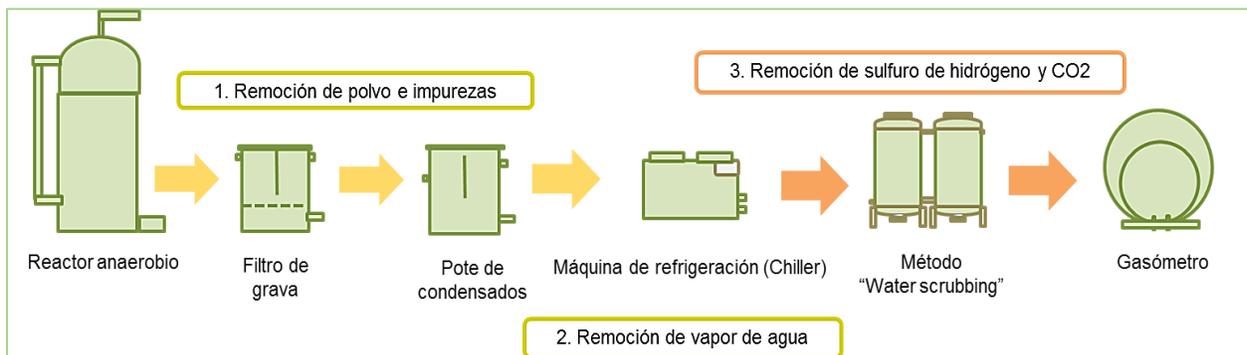


Figura 2.7 Escenario 1 “Producción de biometano”.

2.-Cogeneración de electricidad (Figura 2.8), en el cual se utilizan máquinas de flujo (Motor a gas) encargadas de transformar la energía química obtenida del biogás en energía mecánica para la producción de electricidad y calor, para este proceso se deben eliminar tanto vapor de agua como sulfuro de hidrógeno (H_2S) pero sin llegar

a la separación de (CO₂). La tecnología empleada para este escenario fue un proceso biológico “Bioscrubber”.

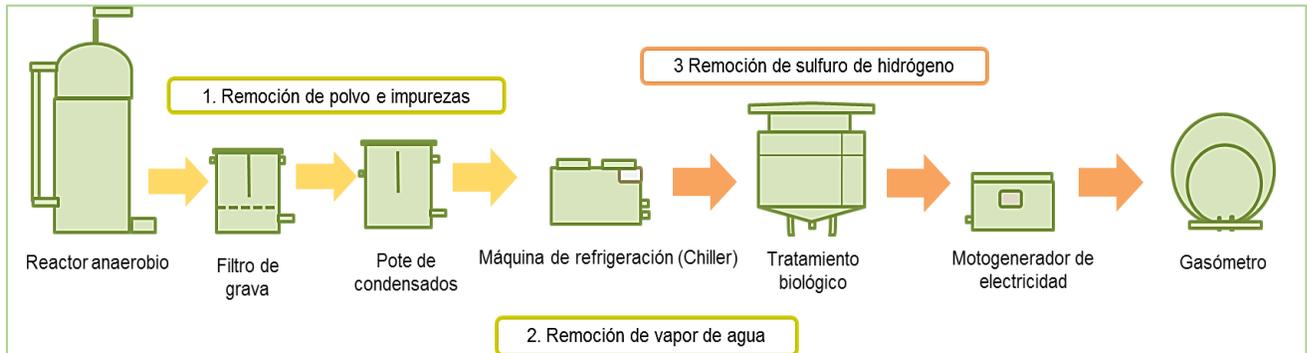


Figura 2.8 Escenario 2 “Cogeneración de electricidad”.

3.-Quema de biogás (figura 2.9), este escenario consiste en almacenar el biogás que producen los reactores anaerobios utilizar una antorcha de llama oculta, esta se encarga de quemar el biogás generado en el reactor eliminando consigo los contaminantes.

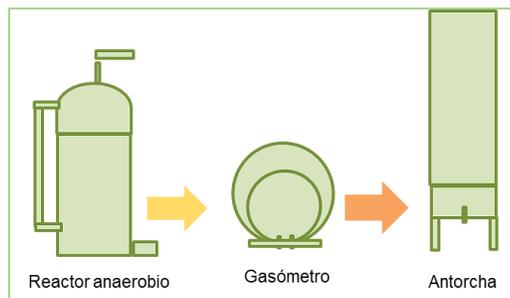


Figura 2.9 Escenario 3 “Quema de biogás”.

Para concluir con las mejoras y disminuir el impacto ambiental se realizó una consulta bibliográfica para llevar a cabo los inventarios para los tres diferentes escenarios, después fueron evaluados con la misma metodología e interpretados de la misma manera que el escenario original, finalmente se propuso el escenario con menor impacto ambiental negativo.

CAPÍTULO 3
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El capítulo presente muestra los resultados y un análisis detallado de las etapas del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) descritas en el capítulo anterior, lo cual permite la resolución de la problemática inicial y el cumplimiento de los objetivos establecidos.

3.1 Objetivos y alcances del ACV

3.1.1 Objetivo del estudio

El objetivo del estudio es evaluar el impacto ambiental causado por las actividades realizadas dentro de la planta de generación de biogás a escala piloto del Tecnológico de Orizaba, con la finalidad de disminuir los impactos negativos en el ecosistema, en la salud, en los recursos y desarrollar estrategias de mejora para el proceso.

3.1.2 Alcance del estudio

El sistema bajo evaluación es la producción de biogás a partir de residuos orgánicos mediante el proceso de digestión anaerobia, el enfoque del estudio es “Gate to grave” ya que la materia prima son los residuos de alimentos y el biogás producido en la planta es el producto final.

Lo que se requiere para llevar a cabo el estudio es la cuantificación de entradas y salidas del sistema para la realización de un inventario que nos permita la evaluación de cada una de las emisiones de la planta, los datos serán recopilados de investigaciones experimentales de la planta piloto pertenecientes a los últimos años y también de consultados de literatura.

La evaluación de los impactos se desarrollará en SimaPro mediante el Ecoindicador IMPACT 2002+ y se presentara el informe de la interpretación de resultados para proponer mejoras que reduzcan dichos impactos y optimicen el funcionamiento de la planta.

3.1.3 Límites del sistema

Se consideraron como entradas al sistema la materia prima que son los residuos orgánicos, la energía requerida para llevar a cabo el proceso de producción de biogás, productos químicos necesarios para una digestión adecuada y agua para la dilución del sustrato para reducir la carga orgánica y para la digestión dentro de los reactores.

Como salidas del sistema se incluyó el agua tratada que surge de la digestión anaerobia en el Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI) y el producto final que es el biogás.

El proceso de producción de biogás consta de tres etapas que son:

1. Pretratamiento mecánico: En donde se lleva a cabo la trituración de la materia prima, es decir, los residuos de alimentos, después estos residuos son filtrados para obtener la fracción soluble.
2. Acondicionamiento del sustrato: En esta parte del proceso, la fracción soluble (sustrato) es almacenada en un tanque y acondicionada con hidróxido de sodio para aumentar el pH y mejorar el proceso de hidrólisis.
3. Digestión Anaerobia: Este proceso se lleva a cabo en dos reactores con el fin de facilitar la degradación de la materia orgánica. Primeramente en un reactor de biopelícula (que es alimentado y recirculado por medio de bombas) ocurren

las primeras etapas; hidrólisis y acidogénesis, y la fase de la metanogénesis se lleva a cabo en el RFLI o en el reactor EGSB que de igual manera se alimenta del reactor de biopelícula mediante bombas.

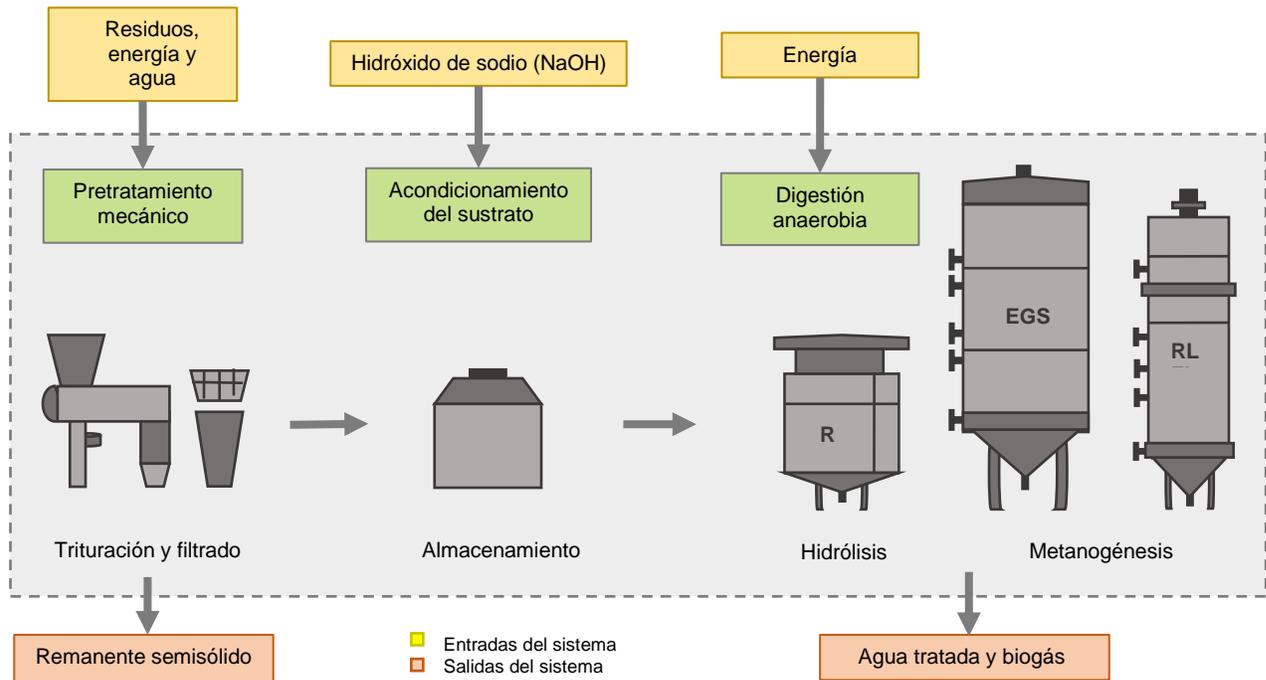


Figura 3.1 Sistema de producción de biogás a partir de residuos de alimentos.

3.1.4 Función y unidad funcional

La planta tiene como función dar tratamiento a los residuos orgánicos con el fin de disminuir la carga ambiental, tales residuos son tratados biológicamente mediante digestión anaerobia y el producto final obtenido de este proceso es el biogás, es por eso que como unidad funcional se estableció 1 m³ de biogás. De acuerdo a esta unidad funcional fueron cuantificados los flujos de entradas y salidas al sistema.

3.2 Inventario del Ciclo de Vida de la planta de biogás

La siguiente tabla muestra el flujo de entradas y salidas cuantificadas de cada proceso unitario del sistema de producción de la planta de biogás de acuerdo a la unidad funcional establecida (1 m³ de biogás).

Tabla 3.1 Inventario de entradas y salidas de la planta de biogás.

	Material o recurso	Unidad	Cantidad	Fuente
Entradas	Residuos orgánicos	Kg	89.28	DE
	Consumo eléctrico (trituradora)	Kw/h	9.7	DE, DL
	Consumo de agua	Kg	89.28	DE
	Hidróxido de sodio (NaOH)	Kg	0.005	DE
	Consumo eléctrico (bombas)	Kw/h	6.71	DE, DL
Salidas	Metano (CH ₄)	Kg	0.51	DE, DL
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Kg	0.35	DE, DL
	Oxígeno (O ₂)	Kg	0.0029	DL
	Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	Kg	0.006	DL
	DQO	Kg	9.3	DE
	ST	m ³	0.01515	DE

DL= Datos de literatura, DE=Datos experimentales

3.3 Evaluación e interpretación de los impactos de la planta de biogás.

Después de ingresar los datos del inventario al software SimaPro y evaluarlos con la metodología IMPACT 2002+, se obtuvieron los siguientes resultados.

La Tabla 3.2 muestra los resultados de la caracterización, en esta se puede observar que cada categoría de impacto maneja una unidad (sustancia de referencia) con un total que suman todos los elementos, cabe mencionar que aunque ecotoxicidad terrestre resultó con una cifra mayor sobre las demás no indica algún tipo de impacto, ya que la primer parte de la evaluación del ciclo de vida es una caracterización del inventario con las sustancias de referencia de cada categoría.

Tabla 3.2 Caracterización del inventario de la planta de biogás.

Categoría de impacto	Unidad	Total	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	DQO	NaOH	Agua	C.E (trituradora)	C.E (bombas)
Carcinógenos	Kg C ₂ H ₃ Cl eq	4.33E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.89E-05	2.26E-05	2.48E-01	1.86E-01
No carcinógenos	Kg C ₂ H ₃ Cl eq	6.13E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.83E-03	0.00E+00	7.50E-05	7.96E-05	3.30E-02	2.63E-02
Inorgánicos respiratorios	Kg PM _{2.5} eq	2.53E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.18E-05	1.74E-05	1.45E-02	1.08E-02
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	8.71E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.03E-01	5.87E-02	4.97E+01	3.72E+01
Agotamiento de la capa de ozono	Kg CFC-11 eq	8.68E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.26E-09	6.83E-10	4.93E-07	3.71E-07
Orgánicos respiratorios	Kg C ₂ H ₄ eq	5.14E-03	3.06E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.64E-07	1.81E-06	1.19E-03	8.89E-04
Ecotoxicidad acuática	Kg TEG water	4.67E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.36E-01	6.27E-03	2.58E+02	2.09E+02
Ecotoxicidad terrestre	Kg TEG soil	9.28E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.07E-01	6.71E-03	4.88E+01	4.39E+01
Acidificación/nutrición terrestre	Kg SO ₂ eq	1.52E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.13E-04	6.05E-04	8.63E-02	6.48E-02
Ocupación de la tierra	m ² org.arable	5.77E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.10E-04	0.00E+00	3.28E-02	2.48E-02
Acidificación acuática	Kg SO ₂ eq	6.77E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.13E-02	0.00E+00	3.39E-05	1.32E-04	3.21E-02	2.41E-02
Eutrofización acuática	Kg PO ₄ P-lim	2.07E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.05E-01	1.66E-06	2.04E-05	1.21E-03	9.38E-04
Calentamiento global	Kg CO ₂ eq	1.47E+01	3.88E+00	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	5.60E-03	5.03E-02	5.95E+00	4.49E+00
Energía no renovable	MJ primary	1.62E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.17E-02	2.13E-01	9.25E+01	6.92E+01
Extracción mineral	MJ surplus	6.89E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.19E-04	1.33E-04	3.02E-02	3.81E-02

La Figura 3.2 son los datos graficados de la caracterización anterior, en esta figura se puede observar que gran porcentaje en la mayoría de las categorías lo ocupa el consumo de electricidad tanto de la trituradora como de las bombas, seguido del metano (CH₄) que se reflejó en la categoría orgánicos respirables y calentamiento global, esta última categoría también muestra un porcentaje notable de dióxido de carbono (CO₂) con aproximadamente un 5 %, en tercer lugar se encuentra el sulfuro de hidrógeno (H₂S) que se notó principalmente en las categorías no carcinógenos con aproximadamente 5 % y en acidificación acuática con casi el 20 %, después se encuentra la DQO, que abarco casi el 100% de la categoría eutrofización acuática, y por último se tiene el hidróxido de sodio (NaOH) y el consumo de agua que aunque en cantidades menores al 1 % se reflejaron en las categorías no carcinógenos, acidificación terrestre, acidificación acuática, agotamiento de la capa de ozono y extracción mineral.

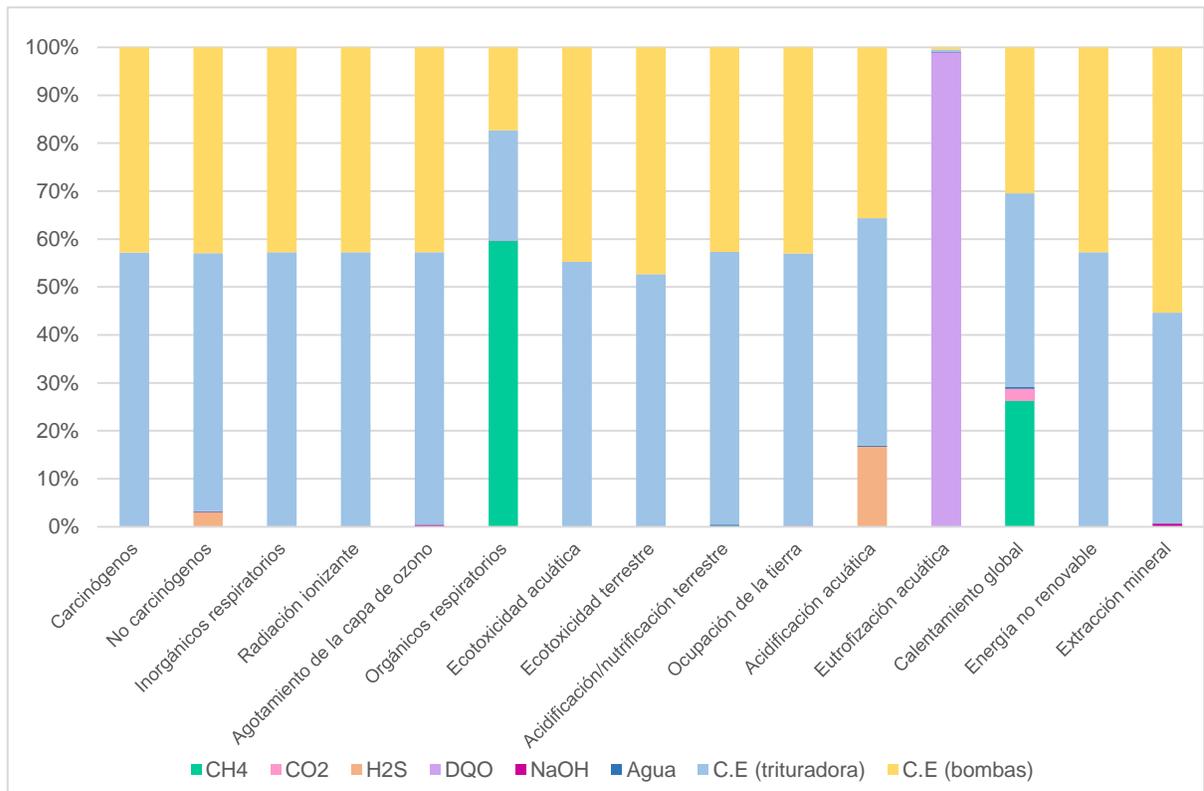


Figura 3.2 Gráfica de la caracterización del inventario de la planta de biogás.

Después de la caracterización, el software realiza una evaluación multiplicando los datos caracterizados por el factor de daño de cada una de las quince categorías, dando como resultado el impacto en cada una de ellas. La Figura 3.3 y la Tabla 3.3 muestran los resultados de esta evaluación, mismos que no variaron mucho de la primera caracterización, ya que nuevamente se observa que el consumo de electricidad se encuentra presente en todas las categorías de impacto y en la mayoría de éstas abarca el mayor porcentaje, el metano (CH₄) también se mantuvo las mismas categorías al igual que los demás elementos en sus proporciones mínimas, la diferencia radica en que en esta parte de la evaluación desaparecieron dos acidificación acuática y eutrofización acuática, esto es debido a que las unidades para clasificarlo a calidad del ecosistema (categoría final a la cual pertenecen) se encuentran aún en desarrollo.

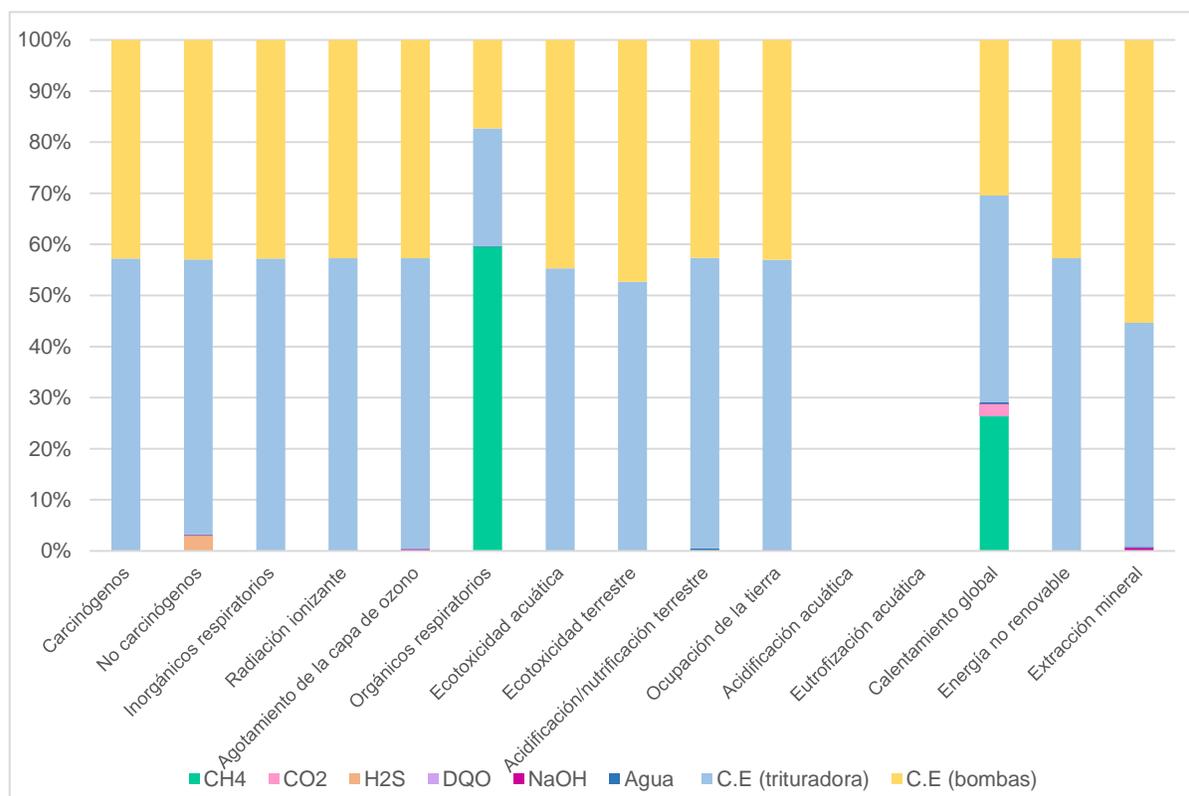


Tabla 3.3 Evaluación del inventario de la planta en categorías medias.

Categoría de impacto	Factores de daño	Total	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	DQO	NaOH	Agua	C.E (trituradora)	C.E (bombas)
Carcinógenos	2.80E-06	1.21E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.77E-10	6.32E-11	6.94E-07	5.19E-07
No carcinógenos	2.80E-06	1.72E-07	0.00E+00	0.00E+00	5.12E-09	0.00E+00	2.10E-10	2.23E-10	9.24E-08	7.37E-08
Inorgánicos respiratorios	7.00E-04	1.77E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.23E-09	1.22E-08	1.01E-05	7.58E-06
Radiación ionizante	2.10E-10	1.83E-08	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.16E-11	1.23E-11	1.04E-08	7.82E-09
Agotamiento de la capa de ozono	1.05E-03	9.12E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.42E-12	7.17E-13	5.18E-10	3.90E-10
Orgánicos respiratorios	2.13E-06	1.10E-08	6.53E-09	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.84E-12	3.85E-12	2.53E-09	1.89E-09
Ecotoxicidad acuática	5.02E-05	2.34E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.69E-05	3.15E-07	1.29E-02	1.05E-02
Ecotoxicidad terrestre	7.91E-03	7.34E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.47E-04	5.31E-05	3.86E-01	3.48E-01
Acidificación/nutrición terrestre	1.04E+00	1.58E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.17E-04	6.30E-04	8.98E-02	6.74E-02
Ocupación de la tierra	1.09E+00	6.28E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.20E-04	0.00E+00	3.57E-02	2.70E-02
Acidificación acuática	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Eutrofización acuática	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Calentamiento global	1.00E+00	1.47E+01	3.88E+00	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	5.60E-03	5.03E-02	5.95E+00	4.49E+00
Energía no renovable	1.00E+00	1.62E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.17E-02	2.13E-01	9.25E+01	6.92E+01
Extracción mineral	5.10E-02	3.51E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.14E-05	6.76E-06	1.54E-03	1.94E-03

La Figura 3.4 muestra los resultados de la evaluación anterior, es decir, el impacto de los elementos del inventario sobre estas cuatro categorías de daño finales, puede observarse que el consumo de electricidad tiene el mayor impacto en todas las categorías a excepción del cambio climático, en donde el 25 % es debido a la influencia del metano (CH₄), aproximadamente el 4 % debido al dióxido de carbono (CO₂) y menos del 1 % es debido al consumo de agua.

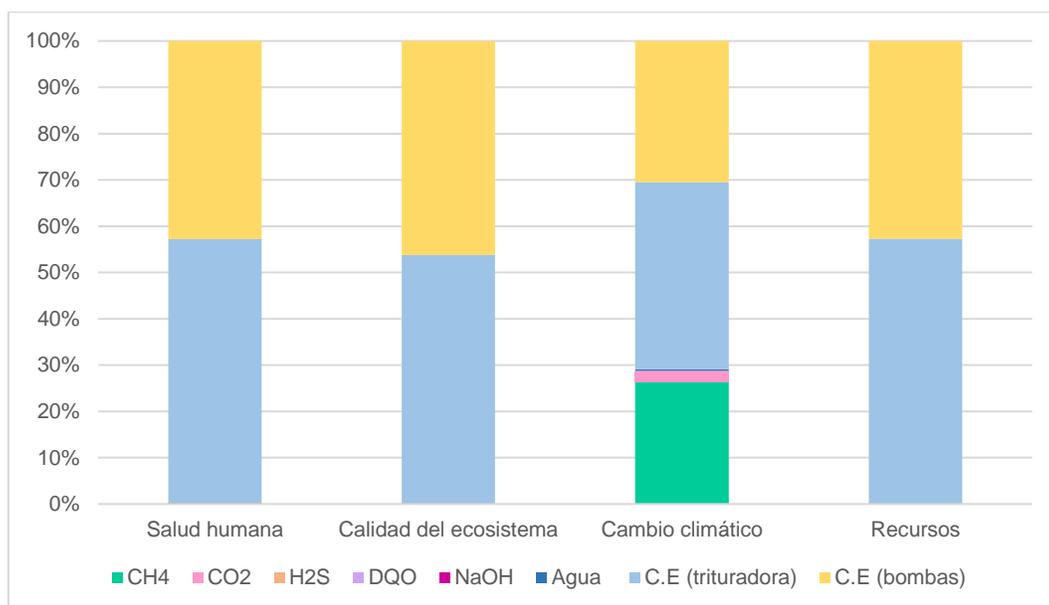


Figura 3.4 Evaluación del inventario de la planta en categorías de daño.

La Tabla 3.4 muestra los resultados de la Tabla 3.3, pero clasificados en categorías de daño finales, estos impactos totales pueden leerse de la siguiente manera:

- 1.91E-05 DALY indican la fracción de años perdidos sobre la población general.
- 9.79E-01 PDF*m²*yr es el porcentaje de especies perdidas en 1m² de superficie terrestre en un año (aproximadamente el 1 %).
- 1.47E+01 kg CO₂ eq es el resultado del potencial de calentamiento global.
- 1.62E+02 MJ fué la energía extraída para poder llevar a cabo el proceso.

Ahora bien, continuando con la evaluación se procede a normalizar los resultados, de la misma manera en que se multiplicaron los datos de la caracterización por un factor de normalización, ahora los resultados de la evaluación de las quince categorías se dividieron entre un factor de normalización, y después fueron clasificados en categorías de daño finales, los resultados pueden leerse de la siguiente manera:

- 2.70E-03 Points es el impacto a la salud humana causado por una persona durante un año.
- 7.14E-05 Points es el impacto a la calidad del ecosistema causada por una persona en un año.
- 1.48E-03 Points es el impacto al cambio climático causado por una persona en un año.
- 1.07E-03 Points es el impacto a los recursos causado por una persona en un año.

La Figura 3.5 es una gráfica de comparación de afectación entre las quince categorías, es decir entre más “Points” hayan obtenido las categorías, mayor es el impacto sobre una persona en un año. La Figura indica que el mayor impacto lo obtuvo la categoría inorgánicos respiratorios principalmente debido al consumo eléctrico, seguido del calentamiento global, que a parte del consumo eléctrico también se debió al metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), ya que son emisiones del biogás liberadas al ambiente sin ser aprovechadas, la categoría media con menor puntaje en points fue extracción mineral.

La Figura 3.6 muestra los resultados de la normalización graficados con respecto a las cuatro categorías finales, salud humana fué la categoría que resultó con mayor points, en su totalidad a causa del consumo eléctrico y este a su vez es debido en su mayoría al uso de la trituradora, y la categoría con menor impacto fue la de calidad del ecosistema.

Tabla 3.4 Evaluación del inventario de la planta en categorías de daño.

Categoría de impacto	Unidad	Total	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	DQO	NaOH	Agua	C.E (trituradora)	C.E (bombas)
Salud humana	DALY	1.91E-05	6.53E-09	0.00E+00	5.12E-09	0.00E+00	8.74E-09	1.25E-08	1.09E-05	8.18E-06
Calidad del ecosistema	PDF*m ² *yr	9.79E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.10E-03	6.83E-04	5.24E-01	4.52E-01
Cambio climático	kg CO ₂ eq	1.47E+01	3.88E+00	3.50E-01	0.00E+00	0.00E+00	5.60E-03	5.03E-02	5.95E+00	4.49E+00
Recursos	MJ primary	1.62E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.17E-02	2.13E-01	9.25E+01	6.92E+01

Tabla 3.5 Normalización de los impactos de la planta en categorías de daño.

Categoría de impacto	Total [Points]	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	DQO	NaOH	Agua	C.E (trituradora)	C.E (bombas)
Salud humana	2.70E-03	9.19E-07	0.00E+00	7.21E-07	0.00E+00	1.23E-06	1.76E-06	1.54E-03	1.15E-03
Calidad del ecosistema	7.14E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.04E-08	4.99E-08	3.83E-05	3.30E-05
Cambio climático	1.48E-03	3.90E-04	3.52E-05	0.00E+00	0.00E+00	5.63E-07	5.05E-06	5.98E-04	4.51E-04
Recursos	1.07E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.37E-07	1.40E-06	6.08E-04	4.55E-04

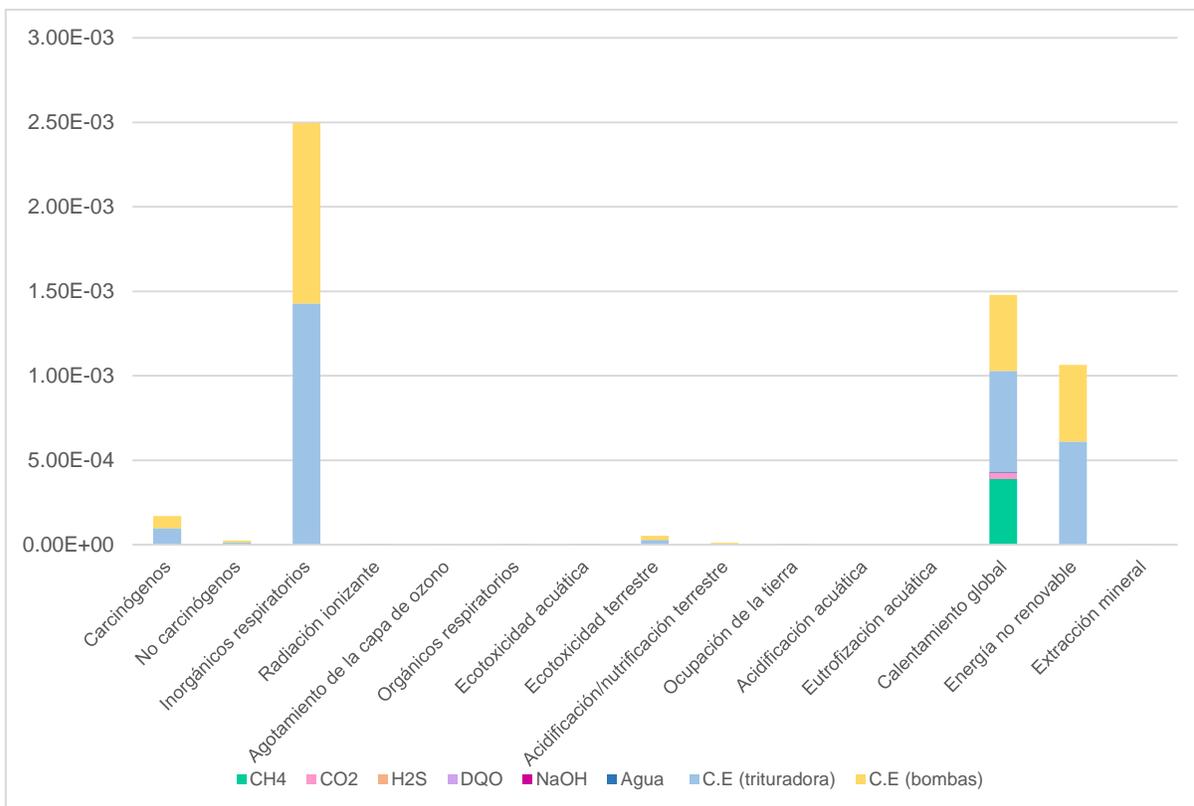


Figura 3.5 Normalización de los impactos de la planta en categorías medias.

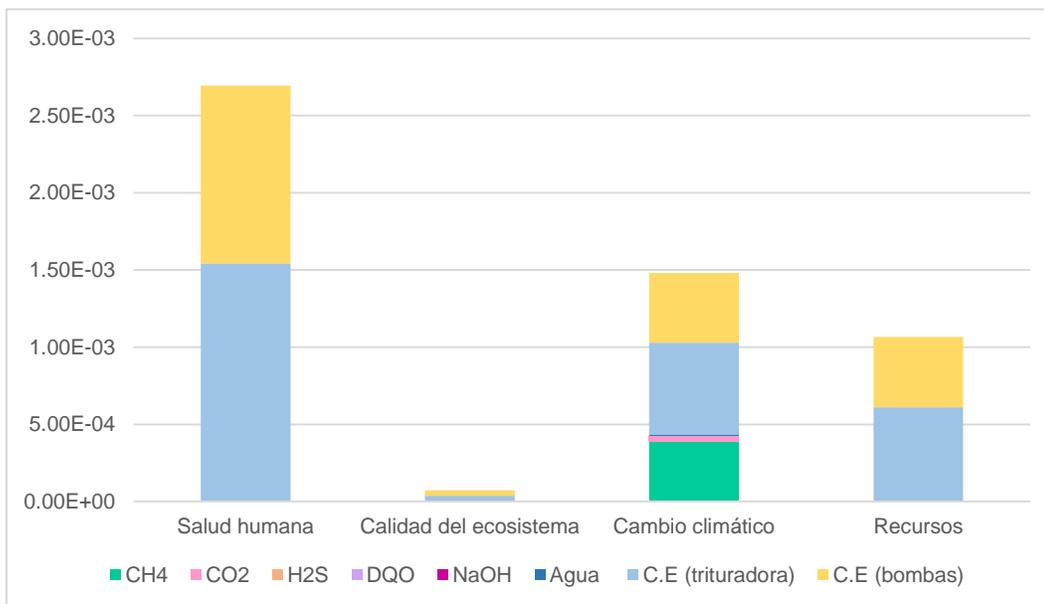


Figura 3.6 Normalización de impactos de la planta en categorías de daño.

En diversos casos de estudio, cuando se realiza la EICV, se ha demostrado que algunos elementos del inventario tienen mayor porcentaje sobre las categorías de daño finales, pero en la etapa de normalización de los datos no siempre mantienen el mismo puntaje, esto es porque se realiza una priorización sobre un daño general.

Con respecto a los resultados mostrados en párrafos anteriores existen diversos estudios que resultaron con altos impactos debido al consumo energético y a las emisiones de la D.A tal como lo presenta este estudio.

Vu et al., (2015) utilizaron la metodología ReCiPe para evaluar una planta de biogás a escala piloto en Vietnam, sus resultados mostraron claramente que el mayor contribuyente al calentamiento global fue el metano (CH_4) al igual que en el presente estudio, ésto debido a la liberación intencional de biogás, el autor explica que cuando la producción excede el consumo se puede comprometer seriamente cualquier ahorro hecho por el remplazo de combustibles alternativos.

Ozeler et al., (2006) evaluaron un escenario de D.A a partir de residuos y demostró que a pesar de ser un proceso biológico tuvo un alto impacto en el uso de energía, esto fue debido al pretratamiento que recibieron los residuos, por lo tanto el consumo de energía fue más alto que su producción de energía.

Xu et al., (2015) aplicaron un ACV a un relleno sanitario de China que utiliza como tratamiento para sus residuos de alimentos la D.A, como método de evaluación utilizaron ReCiPe. Xu y colaboradores mencionan que entre las categorías con mayor impacto en sus resultados se encontraron el cambio climático y la eutrofización acuática. Cabe mencionar que otros autores como Cozma et al., 2015 también reportan la eutrofización y acidificación acuática como categorías dominantes en sus estudios. En este estudio se observó que tanto la DQO como el H_2S tuvieron influencia en ambas categorías dentro de la etapa de caracterización,

sin embargo no se reflejaron en los impactos finales en la normalización debido a que sus unidades para IMPACT 2002+ se encuentran aún en desarrollo.

3.4 Evaluación e interpretación de los escenarios propuestos.

Los escenarios planteados son alternativas propuestas con el fin de disminuir el impacto a la salud humana, a la calidad del ecosistema, al cambio climático y a los recursos, estas propuestas son procesos continuos a la digestión anaerobia, las tecnologías que se proponen para cada escenario fueron seleccionadas de acuerdo a sus ventajas sobre otras tecnologías, y también se consideró el costo de operación e inversión de estas, su complejidad de operación, su eficiencia, y el tipo de residuos que generan.

Posteriormente basado en literatura se elaboraron los inventarios respectivos a cada escenario, tomando en cuenta diversos casos de estudios y fichas técnicas de los diferentes equipos utilizados, tales inventarios fueron evaluados y los resultados pueden observarse en los apartados siguientes. Cabe mencionar que el escenario original que ya ha habido sido evaluado y guardado en el software dentro de la categoría de combustibles con el nombre de “biogás” ahora fue tomado en cuenta como un flujo de entrada en los inventarios, es decir se ingresó al software como un recurso utilizado para llevar a cabo los procesos planteados, esta vez sin considerar sus emisiones, ya que estas simularan no ser emitidas al ambiente, por lo contrario el biogás será tratado.

3.4.1 Escenario 1 “Producción de biometano”.

La producción de biometano es el escenario más amplio, porque que consta de un proceso de limpieza y mejoramiento del biogás, que va desde la eliminación de impurezas, hasta la separación del dióxido de carbono (CO₂). La metodología seleccionada para esta propuesta de mejora fue Pressured Water Scrubbing (PWS),

éste método hace uso de agua presurizada como un absorbente, es útil tanto para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H₂S) como para la separación del dióxido de carbono (CO₂), según Olugasa et al., (2014) es un método menos complicado que requiere menor infraestructura y tiene un costo moderado.

Tabla 3.6 Inventario del escenario 1 “Producción de biometano”

	Material	Unidad	Cantidad
Entradas	Biogás	m ³	1
	Consumo de agua	Kg	1.2
	Consumo eléctrico (bombas)	Kw/h	0.043
	Consumo eléctrico (motor de refrigeración)	Kw/h	0.033
	Consumo eléctrico (compresor)	Kw/h	0.09
	Consumo eléctrico (soplador)	Kw/h	0.017
Salidas	Dióxido de carbono (CO ₂)	Kg	0.32
	DQO	Kg	9.3
	ST	m ³	0.01515

En la Figura 3.7 y en la Tabla 3.7 se observan los resultados de la evaluación de este escenario, se puede analizar que existe un porcentaje mayor al 96 % de impacto del biogás sobre las cuatro categorías finales, esto es debido a que dentro de este elemento se encuentran incluidas la mayoría de las actividades del proceso principal y por ende el mayor uso de recursos, por otra parte se puede observar que el consumo de electricidad sigue afectando en todas las categorías debido al equipo utilizado para llevar a cabo el PWS, sin embargo dentro de la categoría cambio climático el dióxido de carbono (CO₂) que se libera después de la separación del metano (CH₄) también es notable en un 3 %.

En la Tabla 3.8 y la Figura 3.8 se muestran los resultados de la evaluación ya normalizados en donde la mayoría de points la obtuvo la categoría de salud humana con 2.72E-03 points, y la minoría de points la obtuvo la categoría calidad del ecosistema con 7.25E-05, como se puede observar en las cuatro categorías el uso

de biogás como recurso es el motivo de la mayoría de puntos en cada categoría, debido a lo antes mencionado.

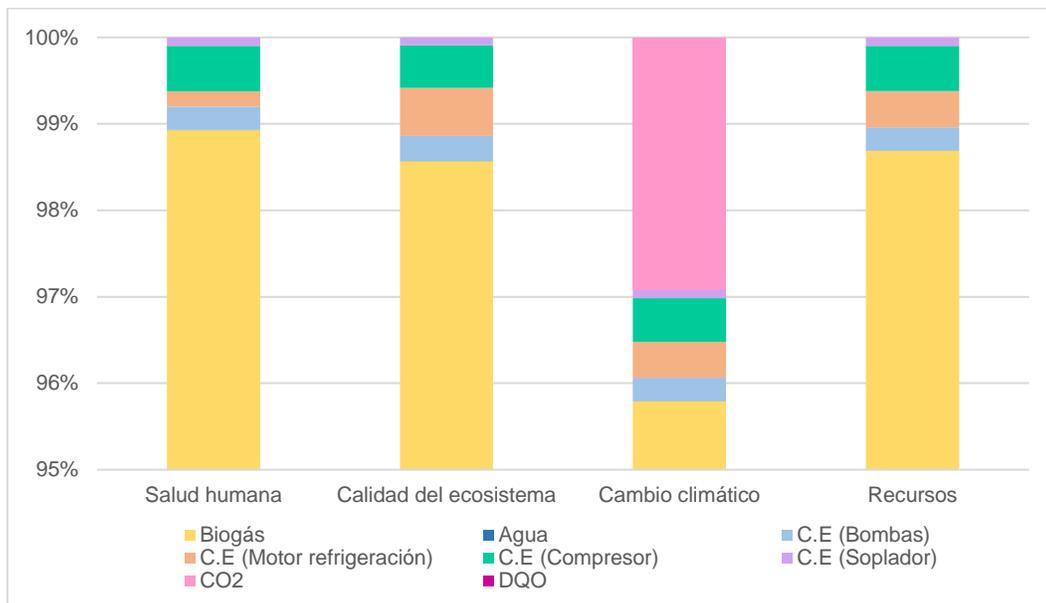


Figura 3.7 Evaluación del escenario 1 en categorías de daño.

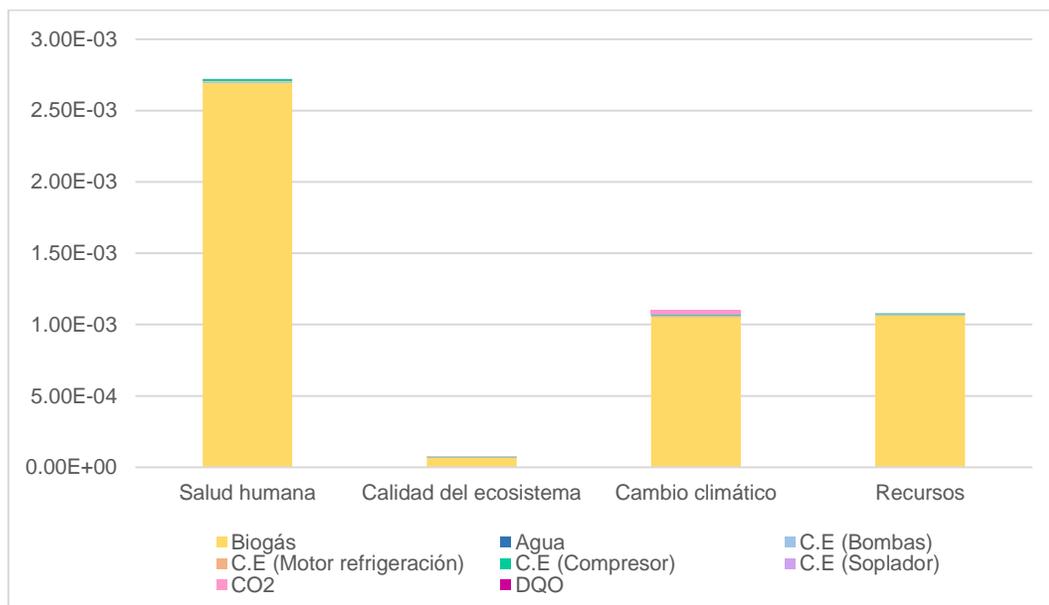


Figura 3.8 Normalización del escenario 1 en categorías de daño.

Tabla 3.7 Evaluación del escenario 1 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Biogás	Agua	C.E (Bombas)	C.E (Motor refrigeración)	C.E (Compresor)	C.E (Soplador)	CO ₂	DQO
Salud humana	DALY	1.93E-05	1.91E-05	1.68E-10	5.24E-08	3.41E-08	1.01E-07	1.91E-08	0.00E+00	0.00E+00
Calidad del ecosistema	PDF*m2*yr	9.93E-01	9.79E-01	9.18E-06	2.90E-03	5.52E-03	4.86E-03	9.19E-04	0.00E+00	0.00E+00
Cambio climático	kg CO2 eq	1.06E+01	1.05E+01	6.76E-04	2.87E-02	4.56E-02	5.52E-02	1.04E-02	3.20E-01	0.00E+00
Recursos	MJ primary	1.64E+02	1.62E+02	2.86E-03	4.43E-01	6.86E-01	8.58E-01	1.62E-01	0.00E+00	0.00E+00

Tabla 3.8 Normalización del escenario 1 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Total [Points]	Biogás	Agua	C.E (Bombas)	C.E (Motor refrigeración)	C.E (Compresor)	C.E (Soplador)	CO ₂	DQO
Salud humana	2.72E-03	2.69E-03	2.37E-08	7.39E-06	4.81E-06	1.43E-05	2.70E-06	0.00E+00	0.00E+00
Calidad del ecosistema	7.25E-05	7.14E-05	6.70E-10	2.12E-07	4.03E-07	3.55E-07	6.71E-08	0.00E+00	0.00E+00
Cambio climático	1.10E-03	1.05E-03	6.79E-08	2.89E-06	4.58E-06	5.55E-06	1.05E-06	3.22E-05	0.00E+00
Recursos	1.08E-03	1.07E-03	1.88E-08	2.92E-06	4.51E-06	5.64E-06	1.07E-06	0.00E+00	0.00E+00

3.4.2 Escenario 2 “Co-generación de energía”.

Se propone como escenario dos la co-generación de energía, ya que en comparación con los sistemas normales, la producción de electricidad usando biogás ahorra emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de 0.188 a 1.193 kg CO₂eq per kW/h (Bacenetti et al., 2013).

Para llevar a cabo esto, se necesita al igual que el escenario uno, llevar a cabo la limpieza del biogás, aunque en este escenario no es necesario llegar a la separación del dióxido de carbono (CO₂), esto es porque normalmente el motor de combustión interna que se contempla para llevar a cabo la co-generación de energía puede trabajar con una mezcla de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), y el límite para la concentración de metano (CH₄) es de aproximadamente 21 % (mol), con fin de mantener las condiciones óptimas de combustión (Sun et al., 2015; Karim et al., 1992).

Para el proceso de desulfuración se decidió utilizar un lavado biológico, por sus diversas ventajas, entre las cuales destaca su bajo requerimiento energético, condiciones medias y azufre como subproducto si es un proceso parcialmente oxidativo (Zhao et al., 2010). Además tiene capacidad de tratar con las concentraciones altas del olor y también fluctuación severa, y su eficiencia de remoción es de 90-99% (Pokethitiyook et al., 2006).

A continuación se muestra el inventario del escenario dos, en el cual cabe mencionar que el consumo eléctrico del generador es negativo debido a que 1 m³ de biogás puede generar 2.5 Kw de energía eléctrica (Uddin et al., 2016).

Tabla 3.9 Inventario del escenario 2 “Co-generación de energía”

	Material	Unidad	Cantidad
Entradas	Biogás	m3	1
	Consumo de agua	kg	0.021
	Consumo eléctrico (soplador)	Kw/h	0.0174
	Consumo eléctrico (máq. de refrigeración)	Kw/h	0.033
	Consumo eléctrico (generador)	Kw/h	-2.5
	Hidróxido de sodio NaOH	Kg	1
	Fertilizante	Kg	0.5
	Aire suministrado	kg	20
Salidas	DQO	kg	9.3
	ST	m3	0.01515

La Tabla 3.10 y la Figura 3.9 muestran los resultados de la evaluación de esta segunda propuesta, en esta se puede observar que el uso de biogás como recurso principal del proceso obtuvo en las cuatro categorías un impacto de 43 a 67 % aproximadamente, en porcentajes menores a 10 % resultó el uso de hidróxido de sodio (NaOH), el uso de fertilizante y el uso del recurso “aire”, estos tres elementos tuvieron más porcentaje de impacto en la categoría calidad del ecosistema, y por último a diferencia de los escenarios anteriores se pudo observar que el consumo energético de los equipos no tuvo impacto alguno en ninguna de las categorías, esto se puede explicar a que el cogenerador eléctrico utiliza la energía producida por la misma planta.

Los resultados de la normalización están contenidos en la Tabla 3.11 y la Figura 3.10, y se observa que la categoría con mayor cantidad de points fue salud humana con 8.18E-04 points, debido principalmente al uso de biogás como recurso, y la categoría con menor cantidad de points fue calidad del ecosistema con 3.59E-05 points, en la cual el biogás fue casi irrelevante.

Tabla 3.10 Evaluación del escenario 2 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Biogás	Agua	C.E (soplador)	C.E (máq. refrigeración)	C.E (generador)	NaOH	Fertilizante	Aire	DQO
Salud humana	DALY	5.80E-06	5.31E-06	8.17E-13	5.90E-09	1.12E-08	-7.90E-07	4.86E-07	6.66E-07	1.13E-07	0.00E+00
Calidad del ecosistema	PDF*m2*yr	4.92E-01	2.72E-01	4.46E-08	3.26E-04	6.18E-04	-4.26E-02	6.12E-02	8.44E-02	1.16E-01	0.00E+00
Cambio climático	kg CO2 eq	3.46E+00	2.91E+00	3.29E-06	3.23E-03	6.13E-03	-4.33E-01	3.11E-01	4.60E-01	1.98E-01	0.00E+00
Recursos	MJ primary	5.34E+01	4.50E+01	1.39E-05	4.99E-02	9.45E-02	-6.68E+00	4.54E+00	8.15E+00	2.26E+00	0.00E+00

Tabla 3.11 Normalización del escenario 2 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Total [Points]	Biogás	Agua	C.E (soplador)	C.E (máq. refrigeración)	C.E (generador)	NaOH	Fertilizante	Aire	DQO
Salud humana	8.18E-04	7.48E-04	1.15E-10	8.30E-07	1.57E-06	-1.11E-04	6.84E-05	9.39E-05	1.59E-05	0.00E+00
Calidad del ecosistema	3.59E-05	1.98E-05	3.26E-12	2.38E-08	4.51E-08	-3.11E-06	4.47E-06	6.16E-06	8.46E-06	0.00E+00
Cambio climático	3.48E-04	2.93E-04	3.30E-10	3.25E-07	6.16E-07	-4.35E-05	3.13E-05	4.62E-05	1.99E-05	0.00E+00
Recursos	3.51E-04	2.96E-04	9.14E-11	3.28E-07	6.22E-07	-4.40E-05	2.99E-05	5.36E-05	1.49E-05	0.00E+00

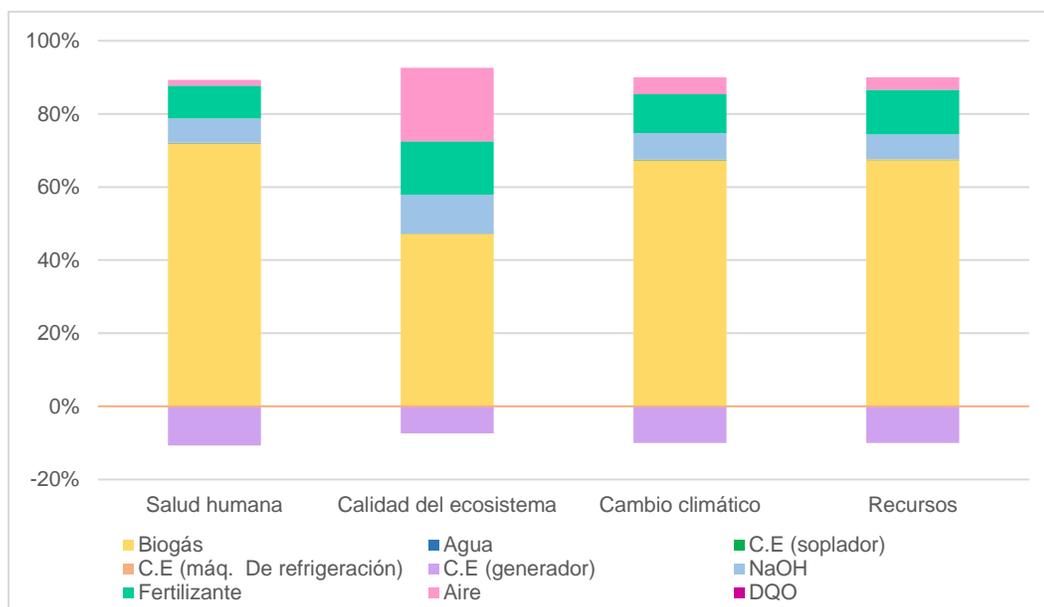


Figura 3.9 Evaluación del escenario 2 en categorías de daño.

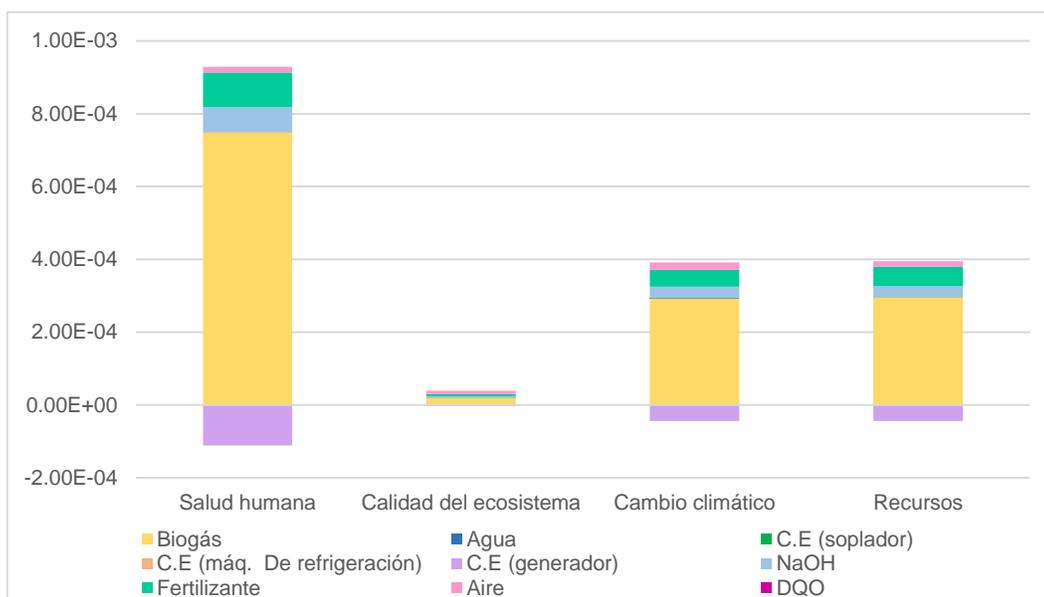


Figura 3.10 Normalización del escenario 2 en categorías de daño.

3.4.3 Escenario 3 “Quema del biogás”.

Se propuso como alternativa quemar el biogás ya que esto reduce las emisiones de metano (CH₄) a la atmósfera contribuyendo globalmente a la reducción de gases de efecto invernadero y localmente a la mejora de la calidad del aire. La antorcha que se propone utilizar es de llama cerrada que contiene el conjunto de quemadores en la parte inferior con chimenea recubierta con material refractario.

Tabla 3.12 Inventario del escenario 3 “Quema del biogás”

	Material	Unidad	Cantidad
Entradas	Biogás	Kg	1
	Consumo eléctrico (soplador)	Kw/h	0.0174
	Consumo eléctrico (motor de la antorcha)	Kw/h	0.0625
Salidas	DQO	kg	9.3
	ST	m ³	0.01515

Como se puede observar en el inventario anterior, no existe gran flujo de entradas y salidas debido a que es el proceso más corto, es decir después de la digestión anaerobia, se almacena el gas en un gasómetro y posteriormente pasa a una antorcha de llama cerrada, conservando como salidas la DQO y ST.

Con respecto a la evaluación la Tabla 3.13 y la Figura 3.11 indican que el mayor impacto es debido al uso del biogás como en los escenarios anteriores, y menos del 1 % es repartido entre el consumo eléctrico del soplador y el motor de la antorcha.

Tabla 3.13 Evaluación del escenario 3 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Unidad	Total	Biogás	C.E (soplador)	C.E (antorcha)	DQO
Human health	DALY	1.92E-05	1.91E-05	2.12E-08	7.62E-08	0.00E+00
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	9.84E-01	9.79E-01	1.17E-03	4.21E-03	0.00E+00
Climate change	kg CO ₂ eq	1.05E+01	1.05E+01	1.16E-02	4.18E-02	0.00E+00
Resources	MJ primary	1.63E+02	1.62E+02	1.79E-01	6.45E-01	0.00E+00

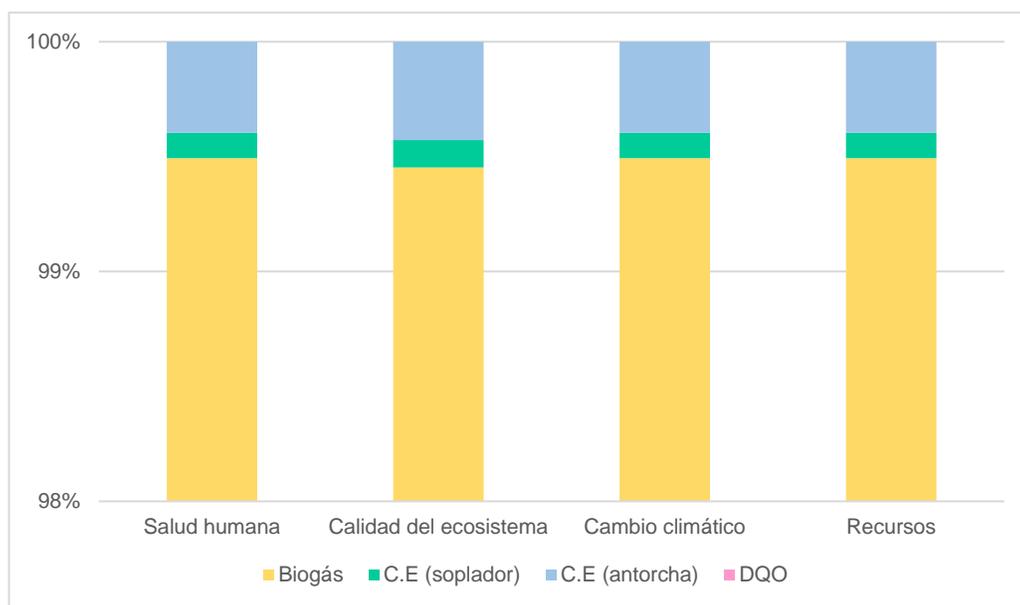


Figura 3.11 Evaluación del escenario 3 en categorías de daño.

La normalización de los datos anteriores se aprecia en la Figura 3.12 y en la Tabla 3.14, en donde la categoría salud humana tuvo $2.71E-03$ points siendo el mayor impacto y la categoría calidad del ecosistema el menor impacto con $7.18E-05$ points.

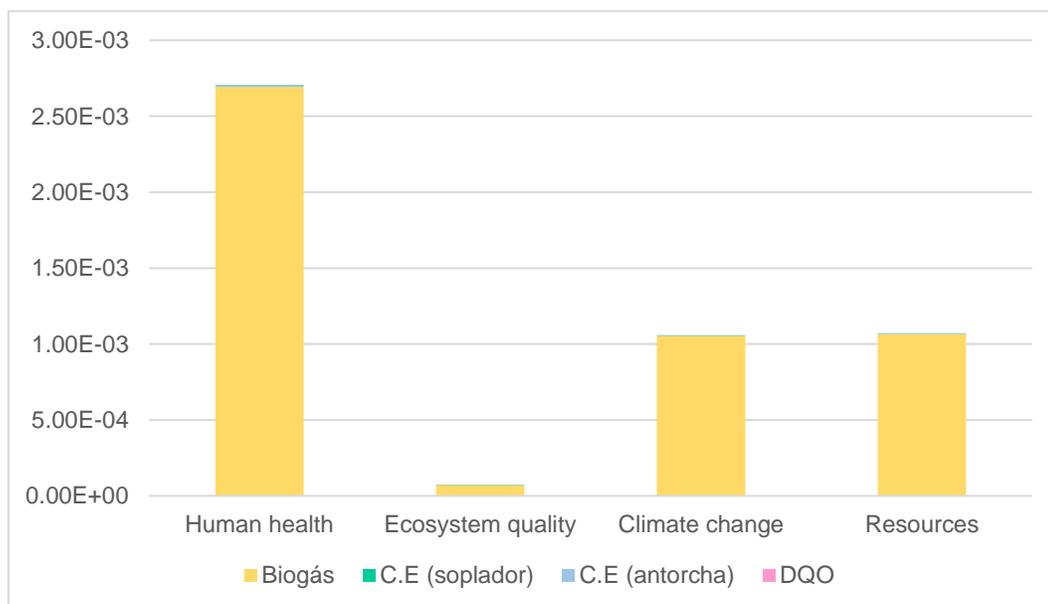


Figura 3.12 Normalización del escenario 3 en categorías de daño.

Tabla 3.14 Normalización del escenario 3 en categorías de daño.

Categoría de impacto	Total [Points]	Biogás	C.E (soplador)	C.E (antorcha)	DQO
Human health	2.71E-03	2.69E-03	2.99E-06	1.07E-05	0.00E+00
Ecosystem quality	7.18E-05	7.14E-05	8.56E-08	3.08E-07	0.00E+00
Climate change	1.06E-03	1.05E-03	1.17E-06	4.20E-06	0.00E+00
Resources	1.07E-03	1.07E-03	1.18E-06	4.24E-06	0.00E+00

3.4.4 Comparación de los tres escenarios propuestos.

En este apartado se realiza una comparación de los impactos de la evaluación de los tres escenarios propuestos con el fin de elegir el proceso y la tecnología que cause menor impacto.

La Figura 3.13 es una comparación de los tres escenarios en sus 15 categorías medias, se puede apreciar que las categorías más afectadas en los tres escenarios fueron energía no renovable y calentamiento global.

La Figura 3.14 muestra los mismos resultados pero en sus cuatro categorías finales, se observa que la categoría más afectada fué recursos por el consumo de energía eléctrica, y la menor afectada salud humana.

Cozma et al., (2013) evaluó el proceso PWS en un sistema de purificación de biogás utilizando el indicador EI99, sus resultados mostraron que el cambio climático tuvo el mayor impacto, esto se encuentra relacionado en gran medida con las emisiones indirectas generadas durante el consumo de energía.

Como se mencionó anteriormente, la normalización es una priorización en este caso realizada en Points que es el impacto provocado por una persona en el periodo de un año, y es así que a pesar de que salud humana no era la más afectada en los resultados de la evaluación, en la normalización final se aprecia que en los tres

escenarios es la que obtuvo más Points, seguida de cambio climático y recursos que en todos los escenarios no difieren mucho en su nivel de impacto, y por último la categoría con menor points resultó la calidad del ecosistema.

Como se aprecia en los últimos gráficos (Figura 3.14 y Figura 3.15), el escenario que menos tuvo impacto tanto en la evaluación como en la normalización, fue el escenario 2 “Co-generación de energía” esto se debió a que el consumo energético no tuvo impacto porque se utiliza el mismo combustible generado por la planta.

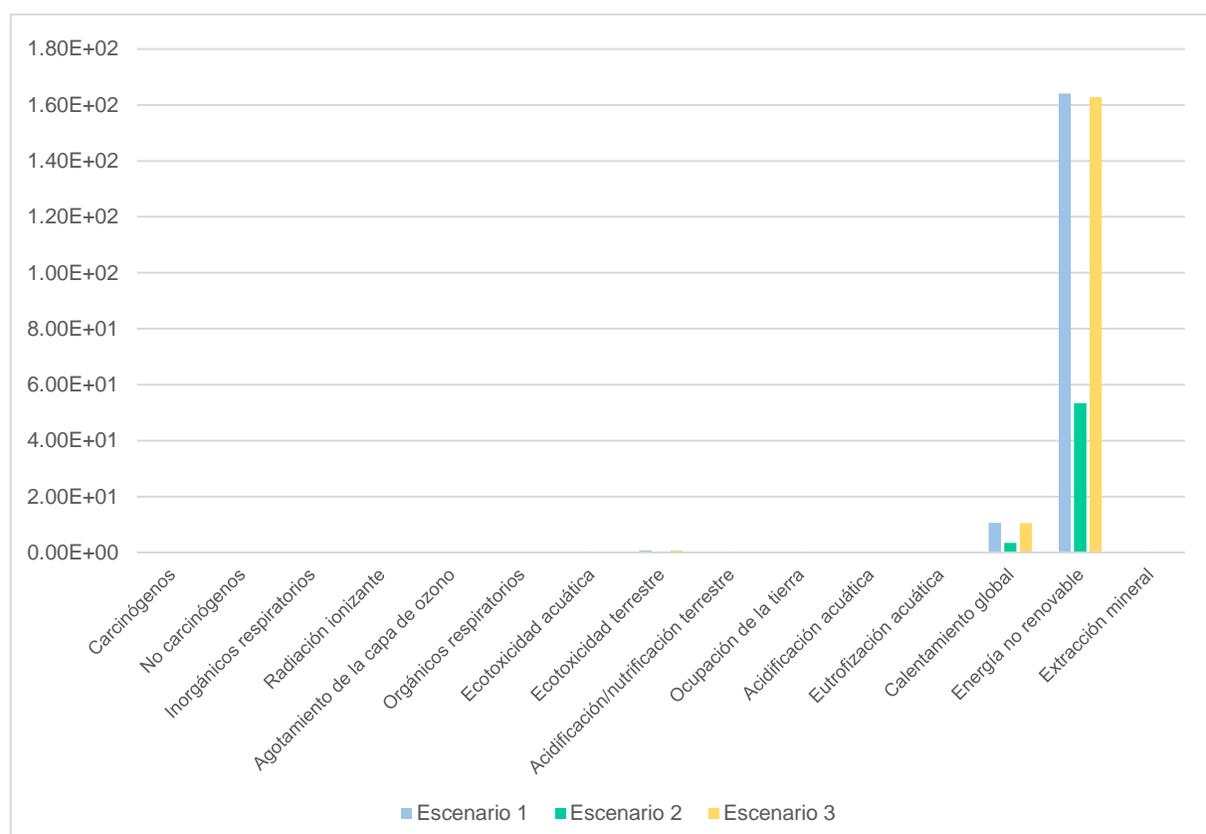


Figura 3.13 Evaluación de los tres escenarios en categorías medias.

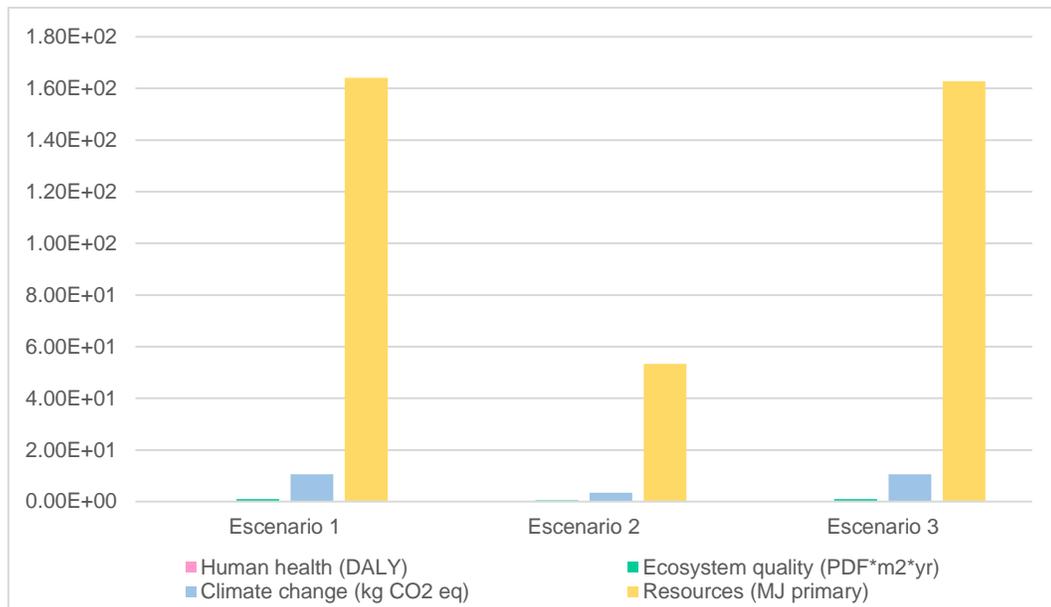


Figura 3.14 Evaluación de los tres escenarios en categorías finales.

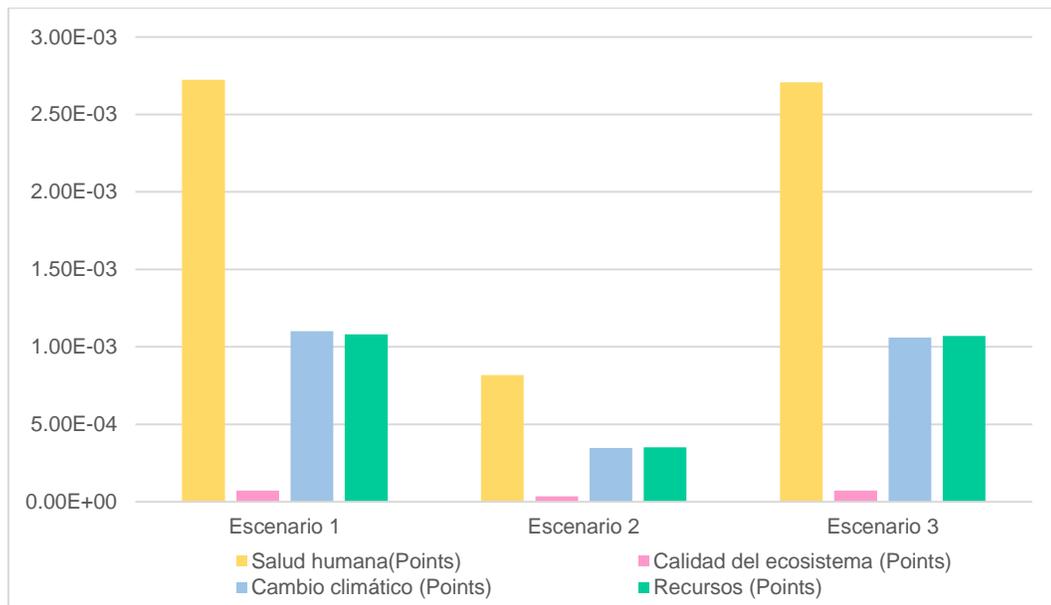


Figura 3.15 Normalización de los tres escenarios en categorías finales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La aportación del actual trabajo al estado del arte consistió en medir el impacto ambiental de un sistema de producción de biogás a través de un ACV, este análisis se llevó a cabo con un enfoque de la puerta a la tumba y con una unidad funcional de 1 m³ de biogás, los resultados del estudio permitieron identificar las actividades que causaban un impacto negativo y proponer alternativas de mejora.

En las primeras dos etapas del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se observó que el proceso de generación de biogás llevado a cabo en la planta tiene un flujo de entradas y salidas muy determinados, lo que permitió un inventario con mayor exactitud. Por tanto en la tercera etapa, la evaluación, se realizó en SimaPro con la metodología IMPACT 2002+ y la interpretación de los resultados arrojados mostró que el mayor impacto de las actividades de la planta es debido al consumo eléctrico, por el uso del molino triturador, y el uso de las bombas.

Este consumo eléctrico tuvo el mayor porcentaje en la mayoría de las categorías medias, principalmente respiratorios inorgánicos, energía no renovable y calentamiento global, lo que impacta finalmente en la salud humana, uso de recursos y al calentamiento global.

Otra de los aspectos que también obtuvieron gran porcentaje de impacto en la evaluación fueron las emisiones de la Digestión Anaerobia (DA) ya que no tienen un aprovechamiento adecuado.

De los gases emitidos al aire, el CH₄ y el CO₂ afectaron mayormente a la categoría media calentamiento global, lo que contribuye finalmente al cambio climático en un 30 % aproximadamente, esto en comparación con otros aspectos de la planta. Por otro lado el S₂H tuvo un notable porcentaje en las categorías no carcinógenos y

acidificación acuática, aunque su impacto en las categorías finales, no fue muy notable. Con respecto a las emisiones al agua, la DQO del efluente tuvo el mayor porcentaje en la categoría eutrofización acuática, pero al igual que el S₂H no fue notable en el impacto final, ésto debido a las unidades en desarrollo mencionadas anteriormente.

El uso de NaOH y de agua, fueron los aspectos que menor impacto mostraron, ya que solo se reflejaron dentro de categorías medias en proporciones menores a 1 %.

Con respecto a tres los escenarios evaluados se puede concluir que el que mostró resultados más benéficos para el medio ambiente fue el escenario 2 “Co-generación de energía”, esto es debido a que la tecnología seleccionada para llevar a cabo este proceso (lavado biológico) ocupa un mínimo consumo eléctrico. Estos resultados también fueron debidos a que la planta genera su propio combustible para el Motogenerador que proveerá la energía para llevar a cabo el proceso.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados de la evaluación obtenidos, se recomienda la co-generación de energía. Cabe mencionar que aunque en promedio la planta produce 1 m³ de biogás, se obtendrían mayores resultados con una mayor producción, o haciendo funcionar los dos reactores (RLF1 y EGSB) al mismo tiempo, esto para generar más de 2.5 Kw de energía y hacer más eficiente el proceso.

Por otro lado el proceso de PWS del escenario 1 “Producción de biometano” también arroja resultados favorables con el medio ambiente, y aunque en comparación con otros tratamientos de absorción física es el mejor, resulta un poco menos favorable con el medio ambiente en volúmenes de producción pequeño, este escenario es recomendable si se decide aumentar el volumen de producción y utilizar un motogenerador al igual que el escenario 2, ya que en un determinado periodo de tiempo se verían mejores resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Adelt, M., D. Wolf y A. Vogel. 2011. LCA of biomethane. *J. Nat. Gas. Sci. Eng.* **3**(5): 646–650.

Acosta-Lorenzo, Y. y M. C. Obaya-Abreu. 2005. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. *ICIDCA.* **39**(1):35-48.

Alvarado-Lassman, A., E. Rustrián, M.A. García-Alvarado, G.C. Rodríguez-Jiménez y E. Houbroun. 2008. Brewery Wastewater Treatment Using Anaerobic Inverse Fluidized Bed Reactors. *Bioresource Technol.* **99**(8): 3009–3015.

Appels, L., R. Dewil, J. Baeyens, y J. Degréve. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energy Combust. Sci.* **34**(6): 755-781.

Aranda, A. y I. Zabalza. 2010. Ecodiseño Y Análisis de Ciclo de Vida. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, España.

Bacenetti, J., M. Negri, M. Fiala y González-García, S. 2013. Science of the Total Environment Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process. *Sci. Total Environ.* **463**: 541-551.

Allegue, L. B., y J. Hinge. 2014. Biogas upgrading Evaluation of methods for H₂S removal. Danish Technological Institute. Denmark.

Browne, J. D., y J. D. Murphy. 2013. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Appl. Energy.* **104**:170–177.

Caballero, M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Campos, E., J. Elías y X. Flotats. 2012. Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje. Ediciones Díaz de Santos. Madrid, España.

Chacón Vargas, J. R. 2008. Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). Rev. de La Escuela Colombiana de Ingeniería. **72**: 37–70.

Cherubini, F., N. D. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger y S. Woess-Gallasch. 2009. Energy and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. Resour. Conserv. Recycl. **53**(8): 434–447.

Cozma, P., C. Ghinea, I. Mamaliga, W. Wukovits, A. Friedl y M. Gavrilescu. 2013. Environmental impact assessment of high pressure water scrubbing biogas upgrading technology. CLEAN–Soil, Air, Water. **41**(9): 917-927.

EMISON. 2014. La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales. www.emison.com (Consultada marzo, 2017)

Gnansounou, E., A. Dauriat, J. Villegas y L. Panichelli. 2009. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. Bioresour. Technol. **100**(21): 4919–4930.

Hijazi, O., S. Munro, B. Zerhusen y M. Effenberger. 2016. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. Renew. Sust. Energ. Rev. **54**: 1291–1300.

Humbert, S., M. Margni y O. Jolliet. 2014. IMPACT 2002+: user guide. Quantis sustainability counts .USA

IPCC. 2014. Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Suiza.

ISO 14040. 1998. Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y estructura.

ISO. 14041. 1999. Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y análisis del ciclo de vida.

Jolliet, O., M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet y G. Rebitzer. 2003. Presenting a New Method IMPACT 2002 +: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **8**(6): 324–330.

Leinonen, I., A. G. Williams, J. Wiseman, J. Guy y I. Kyriazakis. 2012. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Egg production systems. *Poult. Sci.* **91**(1): 26–40.

López, J. 2015. Optimización multi-criterio de los impactos ambientales, económicos y de salud del ciclo de vida en una planta procesadora de aves, a través de la norma ISO 14040 y técnicas de inteligencia artificial. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Magdaleno, S. 2013. Implementación y comparación de la eficiencia de los sistemas RH-EGSB y RH-RLFI para realizar la digestión anaerobia de los RSOM. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Miranda, A. 2016. Mejoramiento del rendimiento de metano en una planta de aprovechamiento de RSU. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México. México.

Molino, A., F. Nanna, Y. Ding, B. Bikson y G. Braccio. 2013. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*. **103**: 1003–1009.

Monsalvo, V. M., N. Garcia-Mancha, D. Puyol, A. F. Mohedanoy J. J Rodríguez. 2014. Anaerobic biodegradability of mixtures of pesticides in an expanded granular sludge bed reactor. *Water Sci. and Technol.* 69(3): 532-538.

Moreno, B., E. Gropelli y E. Campanella. 2010. Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y Tecnología*. 187–202.

Niesner, J., D. Jecha y P. Stehlík. 2013. Biogas upgrading technologies: State of art review in european region. *Chem. Eng. Trans.* **35**(1): 517–522.

OMS. 2016. Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. www.who.int. (Consultada abril, 2016)

Pérez, O. 2016. Evaluación del desempeño de un reactor de biopelícula a escala piloto en el proceso de conversión de RSOM en bioenergéticos. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.

Potivichayanon, S., P. Pokethitiyook y M. Kruatrachue. 2006. Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film bioscrubber system Hydrogen sulfide removal by a novel fixed-film. *Process Biochem.* **41**(3): 708-715

Olugasa, T. T., I. F. Odesola y M.O Oyewola. 2014. Energy production from biogas : A conceptual review for use in Nigeria. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **32**: 770–776.

Ozeler, D., U. Yetis y G. N. Demirer. 2006. Life cycle assesment of municipal solid waste management methods: Ankara case study. *Environ. Int.* **32**(3): 405-411.

PREMATECNIA. 2013. Tecnología de antorchas con emisiones reducidas. www.prematecnica.com (Consultada marzo, 2017)

Rutz, D., y J. Rainer. 2007. BioFuel Technology Handbook. W. R. Energies. Munchen, Germany.

Ryckebosch, E., M. Drouillon y H. Vervaeren. 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenergy*. **35**(5), 1633–1645.

SEDESOL. 2012. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México.

SEMARNAT.2009. Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México

SEMARNAT.2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambiental. Indicadores clave y de desempeño ambiental. México.

Sokół, W., A. Ambaw y B. Woldeyes. 2009. Biological wastewater treatment in the inverse fluidised bed reactor. *Chem. Eng. J.* **150**(1): 63–68.

Sun, Q., H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu y X. Yu. 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **51**: 521–532.

Terreros-Mecalco, J., A. Olmos-Dichara, A. Noyola-Robles, F. Ramírez-Vives y O. Monroy-Hermosillo. 2009. Digestión anaerobia de lodo primario y secundario en dos reactores UASB en serie. *Rev. Mexicana de Ingeniería Química*. **8**(2): 153–161.

Uddin, W., B. Khan, N. Shaukat, M. Majid, G. Mujtaba, A. Mehmood, A. M Almeshal. 2016. Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **54**: 25–33.

Varnero, M. T. 2011. Manual De Biogás. O.N.U. para la A. y la Agricultura. Ed. Santiago de Chile.

Vu, T. K. V, D. Q. Vu, L. S. Jensen, S. G. Sommer y S. Bruun. 2015. Life Cycle Assessment of Biogas Production in Small-scale Household Digesters in Vietnam. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* **28**(5): 716–29.

Wang, Q.-L., W. Li, X. Gao y S-L Li. 2016. Life cycle assessment on biogas production from straw and its sensitivity analysis. *Bioresour. Technol.* **201**: 208–214.

Xu, C., W. Shi, J. Hong, F. Zhang y W. Chen. 2015. Life cycle assessment of food waste-based biogas generation. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **49**: 169–177.

Xu, Y., Y. Huang, B. Wu, X. Zhang & S. Zhang. 2015. Biogas upgrading technologies: Energetic analysis and environmental impact assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. **23**(1): 247–254.

Zhao, Q., E. Leonhardt, C. Macconnell, C. Frear y S. Chen. 2010. Purification Technologies for Biogas Generated by Anaerobic Digestion. *CSANR*. 1–24.