



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Análisis del ciclo de vida de un relleno sanitario ubicado en
una ciudad de la sierra ecuatoriana:**

**¿Representa un beneficio ambiental la recuperación del biogás
para generación de electricidad?”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN ECOEFICIENCIA INDUSTRIAL

Presentada por:

Ana María Melendres Palma

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2021

AGRADECIMIENTO

A Dios,

A mi director de proyecto, el Dr.

Ángel Ramírez,

Al Dr. Paúl Vanegas, al Ing. Ismael

Izquierdo y a la Universidad de

Cuenca,

A la Empresa Municipal de Aseo de

Cuenca,

A BGP ENGINEERS B.V,

A la MSc Andrea Boero,

A mis compañeros de trabajo,

A mis amigos,

A mi familia y

A todas las personas que hicieron

posible la culminación de este

trabajo.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres Hugo y Ana por ser mi ejemplo a seguir y motivarme a cumplir mis metas, a mi esposo Alfonso por su amor, apoyo y paciencia en este camino, a mis hermanos Michelle y Hugo por apoyarme incondicionalmente en todo lo que emprenda, a mis hijos Alfonso y Ana Camila que junto a mis sobrinos Nicolás y Emma son mi motivación y principal fuente de inspiración, y a toda mi familia política por los ánimos y el apoyo. Esto es por y para ustedes.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

**Ángel Ramírez M., PhD.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE**

**Ángel Ramírez M., PhD.
DIRECTOR**

**Jorge Amaya R., PhD.
VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Titulación, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Ana María Melendres Palma

RESUMEN

La gestión de residuos sólidos representa un gran problema ambiental que afecta a todos ya que deriva en daños ambientales y en la salud humana. Para el 2016 se han generado 2010 millones de toneladas de residuos y se espera que en los próximos 30 años llegue a los 3400 millones de toneladas. A nivel mundial, aproximadamente el 37% de los residuos generados son dispuestos en rellenos sanitarios, 19% se recicla y el 11% se incinera; sin embargo el 33% de los residuos se disponen en botaderos a cielo abierto.

Ecuador por su parte, en 2019 tuvo una recolección del 87% y una generación aproximada de 12 mil kilogramos al día, de los cuales el 40% se dispone en rellenos, 33% en botaderos a cielo abierto y el restante corresponde a reciclaje, compostaje e incineración. El relleno sanitario recibe 531 toneladas al día de residuo sólidos municipales y cuenta con un proceso de extracción de biogás generado en el relleno sanitario para la generación de energía eléctrica.

Por su parte, el análisis de ciclo de vida es una herramienta clave para determinar los impactos ambientales relacionados a un producto o actividad en toda su vida útil, por lo que, en este estudio se utilizó para evaluar el desempeño ambiental del relleno sanitario. Este estudio se realizó en cooperación entre el Grupo de Ingeniería Sostenible y Economía Circular de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y el Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca.

El análisis se realizó de la fase de operación del relleno desde la llegada de los residuos sólidos municipales al relleno sanitario hasta la disposición final incluyendo la captación de biogás para generación de electricidad, excluyendo colección y transporte. La unidad funcional establecida para el estudio fue de "1 tonelada de residuo sólido municipal dispuesto en el relleno sanitario". Se utilizó el software OpenLCA y se modelaron 3 escenarios: el escenario 0 o actual (40% de captación de biogás), escenario 1 (70% de captación y el escenario 2 (100% de captación de biogás). Para evaluar los impactos se utilizó siete categorías de impacto haciendo uso de la metodología ReCiPe Midpoint (H) V1.13.

Los principales resultados obtenidos muestran que para la categoría de calentamiento global para el escenario base es de 220.51 kgCo₂-Eq por la unidad funcional, y 109.40 y -1.95 51 kgCo₂-Eq por la unidad funcional para los escenarios 1 y 2 respectivamente, lo que supone una disminución de los impactos debido a la mejora en la captación del biogás, evitando así las emisiones de metano a la atmósfera. Respecto a las categorías de agotamiento de recursos fósiles, eutrofización de agua dulce y agotamiento de la capa de ozono se muestra una mejora respecto al valor de sus impactos en los escenarios 1 y 2, está mejora relacionada a los créditos ambientales que otorga la generación de energía entregada a la red ecuatoriana.

Las categorías de formación de partículas, oxidación fotoquímica y acidificación terrestre no mostraron un cambio notable para los escenarios de mayor captación.

En base a la comparación realizada de este estudio con otros similares se concluye que el caso base representa una mejora respecto a otros sistemas de gestión que no realizan ningún tipo de tratamiento a los residuos, y se recomienda la situación propuesta en el escenario 1. Además se recomienda incluir en un próximo estudio ampliar los límites de sistema respecto a la recolección, transporte y reciclaje.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	II
ABREVIATURAS	IV
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivo específico	2
1.3 Justificación del estudio.....	3
CAPÍTULO 2	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Manejo de residuos sólidos en el mundo.....	4
2.2 Manejo de residuos sólidos en Ecuador	5
2.3 Los rellenos sanitarios	10
2.3.1 Biogás de relleno sanitario	11
2.3.2 Botadero a cielo abierto	12
2.3.3 Celdas emergentes	12
2.4 Aspectos ambientales de los rellenos sanitarios	13
2.5 Análisis de ciclo de vida.....	13
2.6 Análisis de ciclo de vida de manejo de desechos.....	14
CAPÍTULO 3	20
3. MARCO METODOLÓGICO	20
3.1 Alcance	20
3.1.1 Descripción del Relleno Sanitario	20
3.1.1.2 Relleno Sanitario	20
3.1.1.3 Planta de esterilización	25
3.1.1.4 Centro de acopio.....	25
3.1.1.5 Planta de generación de electricidad a partir de biogás	26
3.1.2 Unidad funcional.....	30
3.1.3 Límites del sistema.....	30
3.1.3.1 Límites con respecto al sistema natural	30
3.1.3.1.1 Colocación y recubrimiento	32

3.1.3.1.2	Relleno sanitario	32
3.1.3.1.3	Procesamiento de biogás	32
3.1.3.1.4	Incineración de biogás	32
3.1.3.1.5	Generación de energía	33
3.1.3.2	Límites geográficos	33
3.1.3.3	Límite temporal.....	33
3.2	Paquete informático	33
3.3	Análisis de inventario de ciclo de vida.....	33
3.3.1	Obtención de datos primarios	33
3.3.2	Obtención de datos secundarios.....	34
3.4	Evaluación de impacto de ciclo de vida.	35
CAPÍTULO 4	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	Análisis de inventario de ciclo de vida.....	36
4.1.1	Hojas de proceso desarrolladas para este estudio	36
4.1.1.1	Colocación y recubrimiento.....	36
4.1.1.2	Degradación de relleno sanitario	36
4.1.1.3	Procesamiento de biogás	37
4.1.1.4	Generación de energía eléctrica.....	38
4.1.1.5	Incineración de biogás	38
4.2	Evaluación de impactos de ciclo de vida.....	39
4.3	Comparación con estudios similares.....	42
4.3.1	Calentamiento global.....	44
4.3.2	Acidificación.....	44
4.3.3	Otras categorías de impacto	45
CAPÍTULO 5	46
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1	Conclusiones.....	46
5.2	Recomendación	47
BIBLIOGRAFÍA		

ABREVIATURAS

RS	Relleno sanitario
AD	Anaerobic digestion
RSM	Residuos sólidos municipales
GEI	Gases de efecto invernadero
GWP100a	Global Warming
FDP	Fossil depletion
FEP	Freshwater eutrophication
MEP	Marine eutrophication
LU	Land Use
ODPinf	Ozone depletion
PMFP	Particulate matter formation
POFP	Photochemical oxidant formation
TAP100	Terrestrial acidification
WDP	Water depletion
HTP	Human Toxicity
GMI	Global Methane Initiative
GAD's	Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales
COOTAD	Código Orgánico Organización territorial autonomía descentralización
MAE	Ministerio de Ambiente y Energía
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
PNGIDS	Programa nacional de gestión integral de desechos sólidos
MIPRO	Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca
OMS	Organización Mundial de la Salud
CFC	Clorofluorocarbonos
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambientes
ISO	International Organization for Standardization
ACV	Análisis de ciclo de vida
AICV	Análisis de inventario de ciclo de vida
EICV	Evaluación de los impactos de ciclo de vida
UTM	Universal Transverse Mercator
OHSAS	Occupational Health and Safety Assesment Series

ASME	American Society of Mechanical Engineers
HDPE	High Density PolyEthylene
VOC	Volatile Organic Compounds
LFGTE	Lanfills Gas to Energy
WtE	Waste to Energy

SIMBOLOGÍA

t	Tonelada
kg	Kilogramo
B	Billones
M	Millones
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
J	Joules
MM	Miles de millones
Ha	Hectáreas
M ³	Metros cúbicos
Hp	Horse power
mm	Milímetros
cm	Centímetros
s	Segundos
W	Watts
M	Mega
SO ₂	Dióxido de Azufre
P	Fósforo
N	Nitrógeno
PM	Partículas
kWh	Kilowatts hora
G	Giga

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso de la gestión de residuos sólidos.	4
Figura 2.2 Composición de los residuos en América Latina	5
Figura 2.3 Cobertura de barrido Ecuador histórica [2015-2019].....	7
Figura 2.4 Cantidad de residuos recolectados (kg/día), histórico 2015-2019.....	7
Figura 2.5 Recolección de residuos histórico 2017-2019.....	8
Figura 2.6 Composición de residuos sólidos histórico 2017-2019	8
Figura 2.7 Disposición final de los residuos sólidos %, histórico 2015-2019.....	9
Figura 2.8 Generación per cápita, histórico 2017-2019.....	9
Figura 2.9 Relleno Sanitario	11
Figura 3.1 Vista satelital del relleno sanitario	21
Figura 3.2 Historial de pesos 2015-2019	23
Figura 3.3 Piscina de lixiviados	24
Figura 3.4 Canales para aguas lluvias.....	25
Figura 3.5 Centro de acopio.....	26
Figura 3.6 Procesador de biogás	27
Figura 3.7 Cabezas de pozo	27
Figura 3.8 Esquema de los pozos y las redes de biogás del relleno sanitario	28
Figura 3.9 Bioprocesador, procesamiento del biogás, BGP.....	29
Figura 3.10 Motor de combustión interna, BGP.....	29
Figura 3.11 Límites del sistema	31
Figura 4.1 Resultados de ACV normalizados en base a Escenario 0.	41
Figura 4.2 Análisis de contribución de cada escenario por categoría de impacto.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Revisión bibliográfica de estudios similares respecto a límites del sistema. ...	17
Tabla 2	Revisión bibliográfica de estudios de indicadores similares.....	18
Tabla 3	Revisión bibliográfica respecto a la categoría de Calentamiento Global.	19
Tabla 4	Características del relleno sanitario	21
Tabla 5	Composición de residuos	23
Tabla 6	Escenarios previstos para el estudio.....	32
Tabla 7	Información secundaria obtenida de base de datos	34
Tabla 8	Información secundaria obtenida de literatura	34
Tabla 9	Categorías de impacto utilizadas en este estudio	35
Tabla 10	Inventario de la fase de colocación y recubrimiento	36
Tabla 11	Inventario de la fase de degradación de relleno	37
Tabla 12	Inventario de la fase de procesamiento de biogás	37
Tabla 13	Inventario de la fase de generación de energía eléctrica	38
Tabla 14	Inventario de la incineración del biogás	39
Tabla 15	Resultados del análisis de ciclo de vida por escenarios. FU: 1 ton RSM colocados en el relleno sanitario.....	40
Tabla 16	Comparación de estudios similares. FU: 1 ton de RSM	43

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La gestión de residuos sólidos municipales (GRSM) representa un gran desafío en todas las comunidades tanto urbano como rural debido a su desmesurada generación, poca o nula segregación en la fuente y la disposición final (Wang et al. 2020).

En el 2016 el mundo generó 2.01 billones de toneladas de residuo sólido, de las cuales el 33% no realizó una GRSM correcta. La generación per cápita promedio es de 0.77kg pero tiene un mínimo de 0.11kg y un máximo de 4.54kg, lo cual denota preocupación en la gestión de residuos sólidos (Kaza et al. 2018)

Los países con un nivel de ingresos altos cuentan con una tasa de recolección de residuos efectiva promedio del 96%, mientras que los de nivel medio y bajo cuentan con 82% y 51% respectivamente; por su parte los países de bajo nivel de ingreso experimentan una recolección baja del 39% (The World Bank 2016).

En América latina, la generación en el 2016 fue de 231 millones de toneladas (Mt) por año de residuos sólidos (The World Bank 2016). En esta zona la tasa de recolección es de 73.6%, de dicha cobertura solo el 55% de los residuos recibe una disposición final adecuada (Grau et al. 2015).

Se espera que para el 2050 la generación de residuos sólidos del mundo sea de 3400 Mt de residuos sólidos, Latinoamérica por su parte aportará con 369 Mt de estos (Kaza et al. 2018).

Los residuos sólidos se pueden tratar de diferentes maneras: relleno sanitario, incineración, compostaje, recuperación y reciclaje, compostaje y pirolisis (Rinkesh 2009).

Los residuos sólidos pueden ser del tipo municipal, industrial, doméstico y peligroso; siendo los municipales los de mayor volumen y en los que nos enfocaremos en este estudio. Los residuos sólidos municipales (RSM) se componen en un 44% de materia orgánica, 17% de papel y cartón, 12% de plástico, 5% de vidrio, 4% de metal, 2% de madera y el restante en otros (The World Bank 2016).

A nivel mundial el 33% de los RSM se disponen en botaderos a cielo abierto, 25% en rellenos sanitario no controlados, 13.5% se recicla, 11% incineración, 7.7% a rellenos sanitarios con colección de biogás, 5.5% compostaje, 4% relleno sanitarios controlados y menos del 1% en otros (Kaza et al. 2018).

Dentro de los rellenos sanitarios el proceso de descomposición/degradación anaerobia de los residuos generan biogás (U.S. Environmental Protection Agency 2019), este biogás está compuesto en un 50% de metano y de manera general 50% de CO₂ (US EPA 2017).

El potencial de calentamiento global del metano es 25 veces mayor al del CO₂ (Defra 2011) y las principales fuentes de generación de metano son los sectores de la energía, industria, agricultura y residuos, constituyendo este último el 13% de las emisiones a la atmósfera no relacionadas al CO₂ (US EPA 2012).

A nivel mundial, se estima que el 2016 se generó 1.6 billones de toneladas de CO₂ Eq relacionados a la actividades de los rellenos sanitarios y se espera que para el 2050 lleguen a 2.38 Bt de CO₂ Eq (Kaza et al. 2018).

Debido a esta problemática se han creado grupos como la Global Methane Initiative GMI (GMI 2004) que tienen como objetivo ayudar a superar la barrera de información de los países respecto a la gestión de RSM, crear bases de datos internacionales y presentarles oportunidades de mejoras tanto ambientales como sociales y económicas. Ecuador es socio de la GMI desde el 2016 y en su página se muestra los proyectos que son partes de esta organización y las proyecciones de las emisiones de metano para el Ecuador proveniente de diversas fuentes (GMI 2004).

Según (GMI 2004) en Ecuador en el 2020 se registra 12 MtCO₂ de emisiones de metano y se estima que para el 2050 están lleguen a 16 MtCO₂ siendo el 99% de las mismas derivadas de la descomposición de residuos. GMI presenta a sus países socios estrategias para la recuperación del metano y la generación de bioenergía evitando así su emisión a la atmósfera y a su vez generando ingresos y empleo a las comunidades.

El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC (INEC 2020), respecto a la GRSM registra que el país se dispone de 72 rellenos sanitarios controlados, 45 celdas emergentes y 104 botaderos a cielo abierto.

En este contexto la disposición final es un punto crítico en el ciclo de vida de los residuos.

Este estudio permitirá evaluar el desempeño ambiental de un Relleno Sanitario con captación de biogás para la generación de energía eléctrica, mediante el uso de la herramienta de análisis de ciclo de vida. Y se realizará en cooperación entre el Grupo de Ingeniería Sostenible y Economía Circular de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral y el Departamento Interdisciplinario de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

- Cuantificar el desempeño ambiental de un relleno sanitario con recuperación de biogás para generación de electricidad mediante el uso de la metodología de ciclo de vida.

1.2.2 Objetivo específico

- Identificar las entradas y salidas en los procesos relacionadas a la gestión de residuos sólidos municipales en un relleno sanitario con recuperación de biogás y generación de energía.
- Cuantificar los impactos por indicadores de categorías designadas según su afectación al uso de recursos o emisiones.
- Identificar los puntos críticos del estudio.
- Comparar el desempeño ambiental de diferentes escenarios de captación de biogás para generación de energía.

1.3 Justificación del estudio

Los países de economías estables con alto crecimiento demográfico tienen una mayor contribución al total de emisiones de biogás pero, a partir del 2005 se incluyeron programas regulatorios sobre la gestión de residuos sólidos por lo que sus emisiones han disminuido y se estima que seguirá en descenso, mientras que, el resto de países a pesar de ser menores contribuyentes a las emisiones de metano totales se estima el ascenso de las mismas para el año 2050 (US EPA 2012).

Para alcanzar la reducción de las emisiones de GEI es importante la recuperación del biogás generado en los rellenos, teniendo en cuenta que el poder calorífico del CH₄ es de 20 MJ/Kg, la mitad del gas natural (Defra 2011), y que, por cada m³ de biogás recuperado se puede generar 2.5 kWh/m³ (Surroop and Mohee 2011).

El relleno sanitario administrado por una empresa pública encargada del aseo inició sus operaciones el 3 de septiembre del 2011, tiene un área equipada de 130 hectáreas, recibe 521 toneladas al día. En el 2012, la empresa administradora junto a una empresa extranjera formó una compañía de capital mixto para la construcción de una planta de generación de electricidad de 2MW para aprovechar el biogás que se genera en el relleno sanitario (EMAC 2020) (EBE 2015) (Eastern Research Group and Carbon Trade 2007).

Ecuador realizó sus primeros estudios de análisis de ciclo de vida de la mano de la academia con las publicaciones en el sector energético (Ramirez et al. 2019)(Ramirez et al. 2020) (Ramirez et al. 2019) y de la construcción sostenible (Petroche et al. 2015; Salas et al. 2016, 2018). Respecto a la gestión de residuos sólidos se han realizado estudios sobre su aprovechamiento energético (Narváez C. 2013)(Hidalgo-Crespo et al. 2019).

Con perspectiva de análisis de vida se realizó la evaluación del sistema de gestión de residuos de la ciudad de Quito (Chicaiza et al. 2020) y se estableció una línea base para la toma de decisiones en esta ciudad.

Países vecinos como Perú han realizados estudios de ciclo de vida de la disposición final de residuos (Ziegler-Rodriguez et al. 2019).

El uso de análisis de ciclo de vida para gestión de residuos permite tener bases para evaluar diferentes alternativas de manejo de residuos que pudieran plantearse en futuro.

El metano tiene un periodo de vida corto en la atmósfera, por lo que, las reducciones que se haga hoy se verá rápidamente reflejada en el calentamiento global, además la recuperación del mismo representa también beneficios económicos y sociales para las comunidades.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Manejo de residuos sólidos en el mundo

Los desechos sólidos es la basura generada de actividades humanas o animales, resultante de algún proceso industrial, doméstico, comercial o agrícola, pero cuando hablamos de residuo nos referimos a un material con potencial de aprovechamiento de cualquier tipo (US EPA 2018).

Los residuos sólidos se pueden dividir en diferentes categorías. Según la fuente se dividen en industriales, residencial, comerciales, institucionales, construcción servicios municipales, agricultura, plantas de tratamiento, y biomedicinales. Los residuos sólidos también se pueden dividir en peligrosos y no peligrosos (Rinkesh 2009).

Según (Rinkesh 2009) la composición de residuos se divide en: orgánicos, reciclables, inflamables, tóxicos, cenizas o polvo, residuos peligrosos, animales muertos, escombros, entre otros.

Es relevante conocer la composición de los residuos pues de esto dependerá su tratamiento y disposición final (Ziegler-Rodriguez 2019).

El manejo de los residuos sólidos se refiere a la recolección, tratamiento y disposición final de los residuos que se generan en una sociedad, siendo un servicio importante en toda comunidad (Rick Leblanc 2020).

Un manejo responsable de residuos debe cumplir con los siguientes pasos propuestos en la figura 2.1.

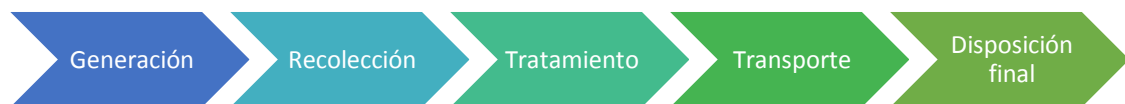


Figura 2.1 Proceso de la gestión de residuos sólidos.

Fuente: (CNC 2019)

Los tratamientos de residuos sólidos pueden ser:

- *Relleno sanitario.*- los residuos se colocan en capas, se compactan y se recubren con arcilla.
- *Incineración.*- se queman los residuos a altas temperaturas hasta que se conviertan en cenizas.
- *Recuperación y reciclaje.*- Recupera materiales para darle una segunda vida útil o para reincorporarlos a procesos como materia prima.
- *Compostaje.*- Se degrada los residuos orgánicos para convertirlos en compost.
- *Pirolisis.*- los residuos se descomponen químicamente sin presencia de oxígeno, el resultado es gases, cenizas y agua (Rinkesh 2009).

A nivel mundial el 33% se dispone en botaderos a cielo abierto, 25% de los residuos se disponen en algún tipo de relleno no especificado, 13.5% corresponde a reciclaje, 11% a incineración, 7.7% a rellenos sanitarios con recolección de biogás, 5.5% compostaje, 4% rellenos controlados y el 1% de otros tipos de tratamiento o disposición final (Kaza et al. 2018).

En el 2019, América Latina por su parte genera 295000 t de residuo sólido al día, y un promedio de generación per cápita de 0.96 kg. Tiene una tasa de recolección de residuos del 89.9% (CNC 2019).

La composición de los residuos se muestra en la figura 2.2 y se puede observar que los residuos orgánicos representan a más de la mitad de toda la composición y un 15% de los residuos no han sido caracterizados (Kaza et al. 2018).

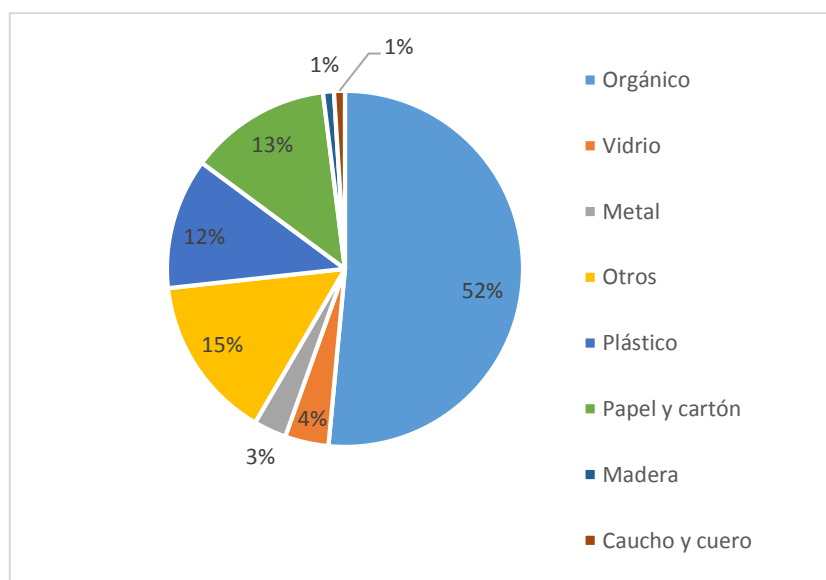


Figura 2.2 Composición de los residuos en América Latina

Fuente: (Kaza et al. 2018)

La cantidad de residuos sólidos municipales generados y la composición de los mismos se ve afectado por varios parámetros socioeconómicos como son el nivel de educación, estatus social y la fuerza laboral, esto representa un factor importante en la gestión de RSM (Hidalgo et al. 2019), esta afectación se muestra deriva en la alta cantidad de RSM generados.

Respecto al tratamiento y la disposición final de los residuos en América Latina el 52% se dispone en rellenos sanitarios, 26.8% en botaderos a cielo abierto, 15% en rellenos controlados, 4.5% recicla, 1.5% en rellenos no especificados, y menos del 1% composta, incinera y hace digestión anaeróbica (Kaza et al. 2018).

2.2 Manejo de residuos sólidos en Ecuador

En Ecuador hasta el 2002 no se hablaba de gestión responsable de residuos, en ese año, la Organización Mundial de la Salud OMS junto con la Organización Panamericana

de la Salud OPS auspiciaron que se realice un análisis sectorial de los residuos sólidos municipales con el objetivo de conocer la gestión actual (Ministerio del Ambiente 2014)

A partir de esta fecha los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales GAD's tienen las competencias exclusivas del manejo de residuos sólidos municipales, esto se estipuló en el Código Orgánico Organización territorial autonomía descentralización, COOTAD, artículo 55 inciso d. Los GAD's asumieron este desafío creando unidades anexadas a direcciones de higiene, pero estas unidades no contaban con independencia financiera ni administrativa, lo que impidió una correcta gestión (Ministerio del Ambiente 2010).

En 2009, se analizó nuevamente la situación de la gestión de RSM, teniendo como resultado una poca o nula mejoría respecto al análisis del 2002. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC, el número de habitantes en el Ecuador en el 2010 era de 15'012,228 millones, y generaban 0.57 kg de residuo por habitante al día, el 77% de hogares contaba con un sistema de recolección, y de este solo el 28% se disponía en rellenos mientras que el restante los disponía de manera no controlada en terrenos baldíos o los quemaba (INEC 2010).

Debido a esta problemática en abril del 2010 se crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos, PNGIDS, el cual se planteó como objetivo: diseñar e implementar un plan nacional de gestión integral de los residuos sólidos, esto en el periodo del 2010-2021 desde una perspectiva integral y sostenible para así disminuir los impactos ambientales relacionados, mejorar las condiciones de salud y la calidad de vida de las personas (Ministerio del Ambiente 2010). Para dicho cumplimiento se establecieron objetivos secundarios como: mejorar el sistema de recolección nacional, cerrar botaderos a cielo abierto y mejorar los rellenos sanitarios, concientizar en la segregación en la fuente y repotenciar el reciclaje (Ministerio del Ambiente 2010)

El programa PNGIDS determinó que los GAD's municipales en el 2010 tenían un servicio de recogida de residuos en un 88% en áreas urbanas y un 54.1% en áreas rurales, de los RSM recogidos solo el 28% era dispuesto en rellenos sanitarios controlados, mientras que el restante se disponía en botaderos a cielo abierto. No se tenía evidencia de segregación en la fuente ni reciclaje.

Teniendo en cuenta que la gestión de residuos sólidos contempla las etapas de: generación de residuos, recolección, tratamiento o reciclaje, transporte y disposición final.

A partir del 2011, la Asociación de Municipalidades Ecuatorianas, levanta información cada año de los GAD's entre ellos, la gestión de los RSM (CNC 2019).

Para el 2019, se ha logrado canalizar en gran parte lo establecido en el programa.

El barrido de residuos sólidos para el 2019 ha incrementado 2.3% con respecto al 2018 y 9% a la del 2017 (figura 2.3). Además se observa un decaimiento en la recolección de 9.3 puntos en el 2017 respecto al año anterior.

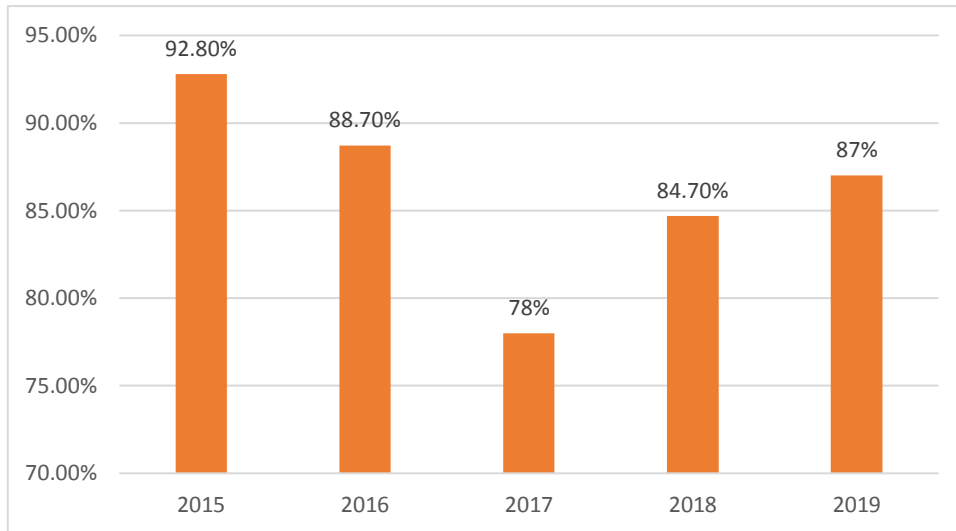


Figura 2.3 Cobertura de barrido Ecuador histórica [2015-2019]

Fuente: (Argüello et al. 2020; Argüello, Salazar, and Nabernegg 2018; Cando, Salazar, and Carbajal 2020)

La figura 2.4 presenta un histórico de cantidad de residuos recogidos 2015-2019.

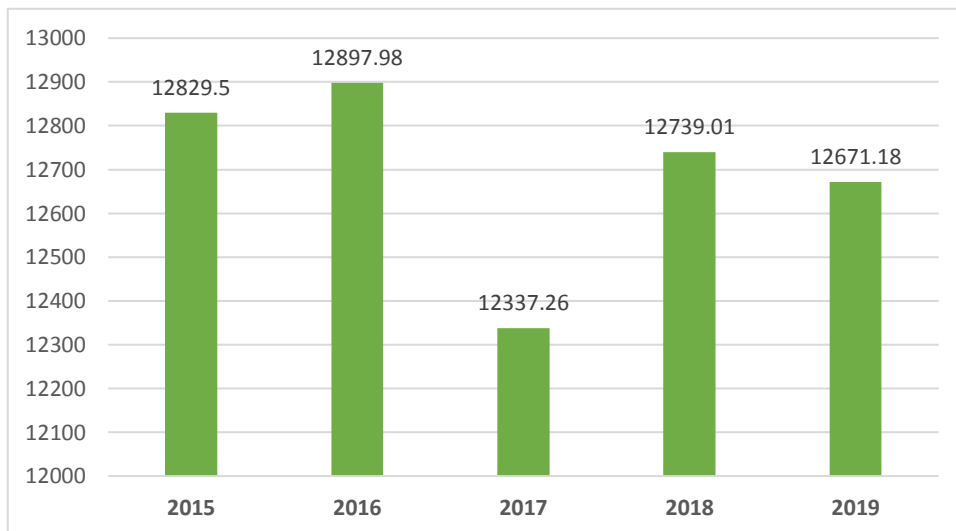


Figura 2.4 Cantidad de residuos recolectados (kg/día), histórico 2015-2019.

Fuente: (Argüello et al. 2018)(Cando et al. 2020)(Argüello et al. 2020)

La recolección en el 2019 se realizó un 13.5% de forma diferenciada (separación de residuos), mientras que el restante fue no diferenciada, en la figura 2.5 se muestra la comparación con de este proceso en los años 2017 a 2019.

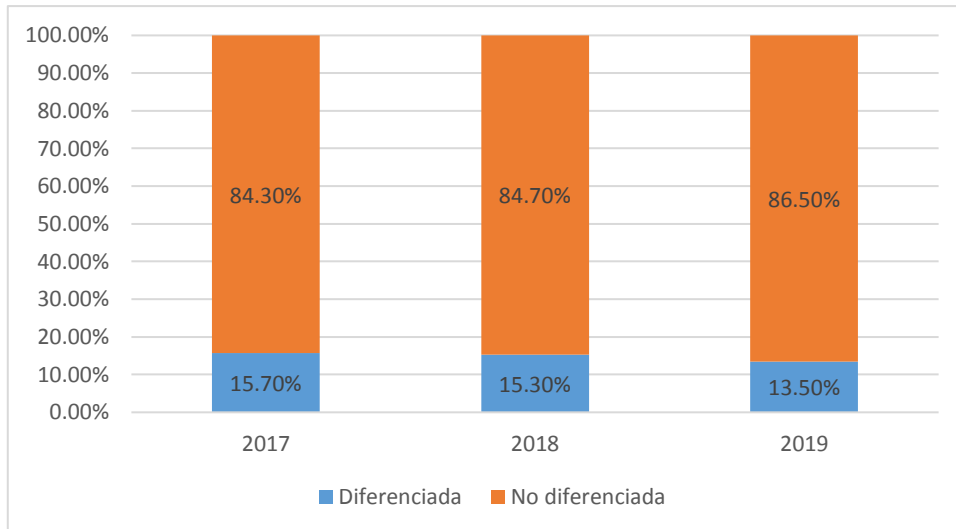


Figura 2.5 Recolección de residuos histórico 2017-2019

Fuente: (Argüello et al. 2018)(Cando et al. 2020)(Argüello et al. 2020)

La composición de los residuos sólidos recolectados es mostrada en la figura 2.6. No se evidencia una diferencia notable en los años analizados.

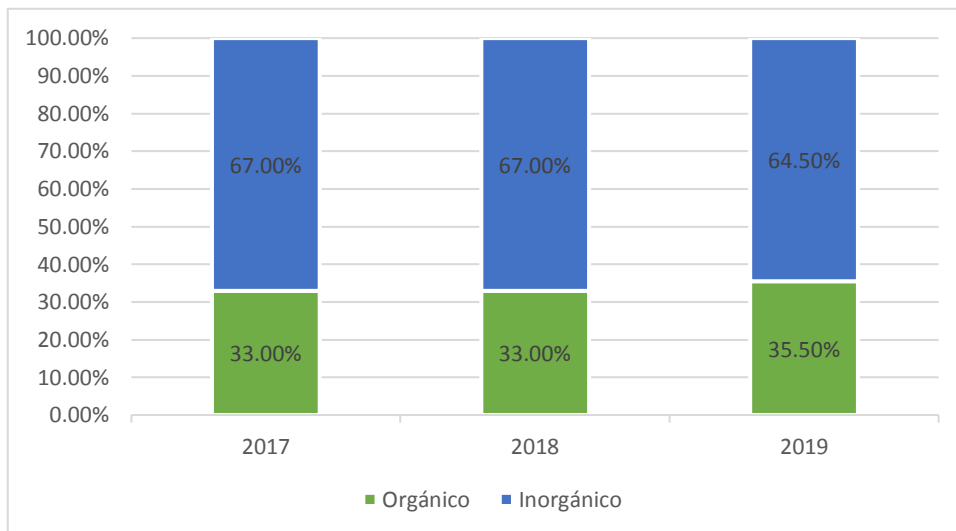


Figura 2.6 Composición de residuos sólidos histórico 2017-2019

Fuente: (Argüello et al. 2018)(Cando et al. 2020)(Argüello et al. 2020)

Respecto a la disposición final en el 2019 de los residuos recolectados, el 48.2% se dispone en rellenos sanitarios, el 32.7% en celdas emergentes y el 19.10% en botaderos a cielo abierto.

En la figura 2.7 se muestra la evolución de la fase de disposición final en el Ecuador y se evidencia una ligera mejora del sistema de manejo de residuos sólidos municipales respecto a esta fase.

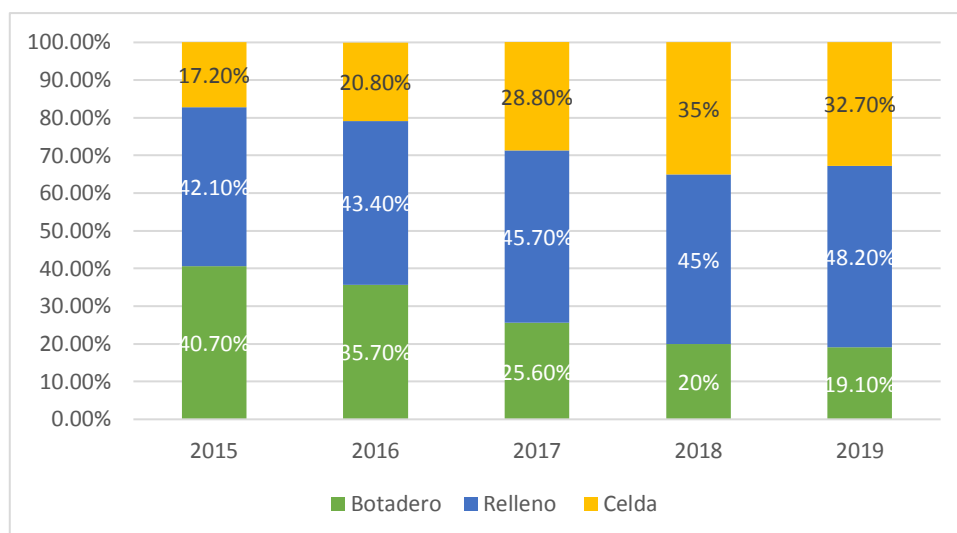


Figura 2.7 Disposición final de los residuos sólidos %, histórico 2015-2019

Fuente: (Argüello et al. 2018)(Cando et al. 2020)(Argüello et al. 2020)

La figura 2.8 muestra que la generación de residuos kg/habitante/día, en el 2019 bajo 0.02 puntos en relación al 2018 y esta a su vez se mantiene constante respecto al año anterior.

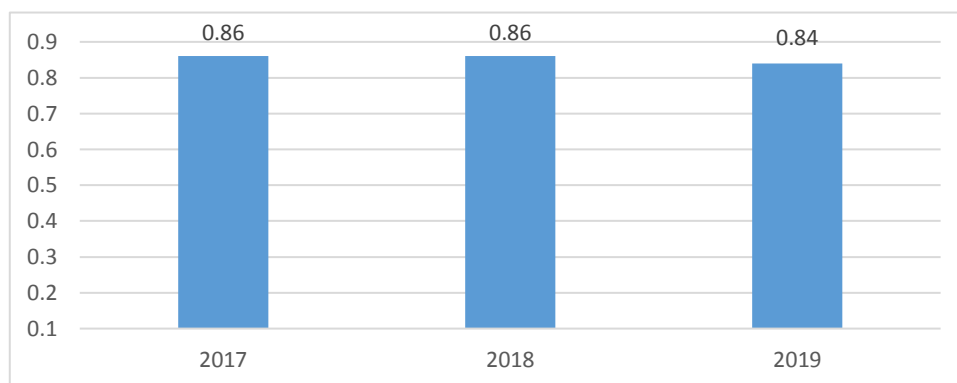


Figura 2.8 Generación per cápita, histórico 2017-2019.

Fuente: (Argüello et al. 2018)(Cando et al. 2020)(Argüello et al. 2020)

Con esta información, el PNGIDS elaboró un documento en el 2019 sobre los avances a la fecha respecto a las metas planteadas en el 2010, este indica que hasta este año se cuenta con los estudios para el cierre de 140 botaderos a cielo, como estaba establecido en el programa del 2010; 186 GAD's de los 188 establecidos en el programa del 2010, ya cuentan con las aprobaciones para realizar cierres de sus botaderos; 94 GAD's de 110 cuentan con un Plan de Gestión Integral y realizan declaraciones anuales de sus residuos (Ministerio del Ambiente 2014).

El programa ha brindado soporte técnico sobre manejo integral de residuos a los GAD's a través de capacitaciones periódicas y se ha planificado que hasta el 2021 se de soporte en proyectos relacionados a la economía circular (Ministerio del ambiente 2014).

El reciclaje de botellas de vidrio se ha incrementado en un 31% y se espera que llegue al 37% para el 2020, estipulado en el Acuerdo Ministerial 121 desarrollado por el PNGIDS (Ministerio del Ambiente 2008).

Los fabricantes de botellas PET han incorporado material reciclado en un 19% en su producción y se espera aumente a un 25%, de acuerdo a la política dispuesta por el PNGIDS junto con el MIPRO dispuesta en el Registro Oficial, Segundo suplemento No 75 (Órgano del gobierno del Ecuador 2017).

Se ha capacitado a 56 instituciones sobre reciclaje inclusivo estipulado en el Acuerdo Ministerial 140, se espera capacitar a 24 más (Ministerio del Ambiente 2015).

El PNGIDS junto con el Ministerio del Ambiente busca cumplir con los objetivos planteados en cooperación con el Gobierno Nacional, GADs y la industria.

2.3 Los rellenos sanitarios

El relleno sanitario es un método controlado para la eliminación de residuos compatible con el medio ambiente y fue introducido por primera vez en 1212 (Britannica 2019).

Durante la fase de operación del relleno se colocan los residuos en tierra formando capas delgadas de uno a tres metros, se compacta lo más posible con maquinaria pesada y al final se cubre con material de cobertura para evitar malos olores.

Un relleno sanitario es una obra ingenieril ya que se prepara mucho antes de la colocación, se estudia el área, el suelo y el clima. En la fase de construcción de un relleno sanitario se coloca una capa de material impermeable y luego una capa de arcilla para evitar infiltraciones de los líquidos a aguas subterráneas. Se colocan canales de agua lluvias y tubería para transporte de gases.

En la fase de cierre, se recubre completamente el relleno con materiales que impidan el paso de líquidos y se coloca una capa de vegetación, estos lugares regresan para uso de la comunidad como parques, complejos deportivos, u otros (Britannica 2019; Terlecky 1980).



Figura 2.9 Relleno Sanitario

(Fuente: Autor)

La puesta en marcha de un relleno sanitario para la disposición final responsable de residuos resulta en varias ventajas como la recuperación de suelos, evita escombros en el aire, baja inversión, bajo costo de operación y mantenimiento y la posibilidad de recuperar el biogás para la generación de energía. A su vez, las desventajas que se pueden presentar es tener malos olores, emisiones de biogás no controladas, problemas de estabilidad con el tiempo, efluentes no controlados, áreas extensas de relleno entre otras (LA GRANJA 2006).

En Ecuador existen 72 rellenos sanitarios, de los cuales solo 42 poseen licencia ambiental (CNC 2019).

Cuando se termina la vida útil de un relleno sanitario, se prepara el lugar para la construcción propuesta al inicio del proyecto. El cierre tiene que estar normado por la legislación nacional (Cal Recycle 2019).

2.3.1 Biogás de relleno sanitario

Los residuos sólidos sepultados comienzan una descomposición aeróbica desgastando el oxígeno que queda entre los espacios, cuando este se termina, la descomposición es anaeróbica, que es la degradación de los residuos sólidos con contenido de carbono biogénico sin la presencia de oxígeno.

La degradación de los residuos sólidos sepultados en un relleno responde a una tasa de decaimiento de primer orden para cada reactivo.

$$[A] = [A]_0 e^{-kt}$$

Donde:

[A]: es la concentración del reactivo en relación al tiempo.

[A]₀: concentración en el tiempo 0

k: constante de decaimiento de primer orden.

La constante k depende de la locación, clima y otras condiciones del lugar donde está ubicado el relleno sanitario.

La degradación de los residuos que responden a la ecuación anterior generan biogás, este gas contiene entre [50-70]% metano CH₄, [40-50]% de dióxido de carbono biogénico CO₂ y trazas de otros compuestos orgánicos e inorgánicos como óxidos de nitrógeno, cloro, flúor, azufre y siliconas (Rettenberger 2018), y otras trazas pueden resultar tóxicas como diclorometano, clorometano, clorofluorocarbonos CFC 11, CFC 12 y CFC 113, entre otros (Ziegler-Rodriguez 2019).

El biogás de relleno genera emisiones de CO₂ biogénico debido a la descomposición de la fracción biodegradable y CO₂ no-biogénico debido a la quema de la fracción no biodegradable de los RSM sepultados (Khandelwal et al. 2019).

El CO₂ biogénico tiene cero impacto y no contribuye al calentamiento global, mientras que el impacto del CH₄ biogénico si es considerable y responde a la reducción del 5% del CH₄ de fuentes no biogénicas (Varshney and Attri 1999).

La producción de metano comienza aproximadamente al primer año de operación del relleno y continúa de 10 a 60 años con diferentes curvas de generación.

El material de cobertura de los rellenos sanitario permite la emisión no controlada de biogás a la atmósfera, siendo estas emisiones fugitivas que pueden estar entre el 30%-70% de todo el biogás generado (Fernando et al. 2005).

2.3.2 Botadero a cielo abierto

Los botaderos a cielo abierto es un área extensa de terreno para disponer de forma no controlada los residuos sólidos de una comunidad (Nathanson 2020)

Esta disposición final genera: malos olores, plagas, roedores, contaminación al agua y al aire, lo que conlleva a enfermedades, deterioro ambiental y baja calidad de vida en las zonas aledañas. No existe control de lixiviados ni gases.

Según el artículo 57 del TULSMA inciso g, los GADs municipales deben eliminar los botaderos a cielo abierto en un plazo establecido (Ministerio del Ambiente 2003).

2.3.3 Celdas emergentes

En una celda diseñada para disponer de los residuos, estos deben ser compactados y recubiertos diariamente. Las celdas tienen canales para el control de lixiviados y aguas

lluvias, cuentan con tuberías para el control de salida del biogás. No hay recuperación de biogás, este sitio es temporal hasta disponer de un lugar de disposición final que cumpla con las condiciones ambientales (CNC 2019).

2.4 Aspectos ambientales de los rellenos sanitarios

El biogás de relleno sanitario se compone de metano CH₄ y el dióxido de carbono CO₂ mayoritariamente, siendo estos gases de efecto invernadero, siendo el metano 21 veces más contaminante que el dióxido de carbono (Badurek 2020).

En el 2019 las emisiones de metano derivado de rellenos sanitarios fue de 114MMT CO₂ Eq., esto representa la tercera fuente más contaminante de emisiones de metano en los Estados Unidos (US EPA 2019).

El lixiviado por su parte, es el resultado de las infiltraciones de agua lluvia al relleno y la biodegradación de los residuos. El contenido de los lixiviados puede variar en torno a la composición de residuo que ingresa y de las condiciones climáticas, de manera general presenta altos valores en DQO, pH, amonio, nitrógeno y metales pesados (Raghab, Abd El Meguid, and Hegazi 2013).

La puesta en marcha de un relleno sanitario implica el uso de un área extensa de terreno, por lo que es prioritario establecer al inicio del proyecto lo que ocurrirá con esta área al cierre del relleno.

2.5 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida ACV es una herramienta sistemática que permite identificar, predecir y evaluar los impactos ambientales asociados a un producto o servicio en todas las etapas de producción del mismo, desde la extracción de los recursos para elaborar la materia prima hasta la disposición final involucrando a todos los flujos de entrada y de salida.

Actualmente el análisis de ciclo de vida representa una herramienta importante en la gestión ambiental para la toma de decisiones y así proteger y asegurar la conservación del medio ambiente, siendo este el objetivo principal de un análisis de ciclo de vida (Ministry of Housing 2020).

Un análisis de ciclo de vida se rige por las normas ISO:14040 (ISO 2006a) y la ISO 14044 (ISO 2006b).

La norma ISO: 14040 “Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Principios marco de referencia” establece la estructura para llevar a cabo un análisis de ciclo de vida. Las fases que establece son las siguientes:

Definición de objetivo y alcance.- Se deberá determinar el objetivo del estudio, la unidad funcional, los límites naturales, geográficos y temporales.

Análisis de inventario AICV.- Se deberá identificar todos los flujos de entrada y salida de cada proceso, cuantificarlos y relacionarlos a la unidad funcional antes elegida.

Evaluación de los impactos ambientales EICV.- Asociar los posibles impactos a una categoría para determinar el lugar de afectación. Ejemplo: Daño ambiental, daño humano, agotamiento de recursos, daño marino, etc.

Interpretación de resultados.- Se relacionan los resultados anteriores para identificar los puntos críticos de la llevada a cabo de un proyecto, se plantean conclusiones y recomendaciones para orientar la toma de decisiones.

2.6 Análisis de ciclo de vida de manejo de desechos

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos científicos de análisis de ciclo de vida de residuos sólidos con énfasis en rellenos sanitarios. Se presenta un resumen de la literatura revisada en la Tabla 1.

Para evaluar los sistemas de gestión ambiental, el análisis de ciclo de vida representa una herramienta valiosa ya que determina el punto crítico de un proceso o la mejor alternativa de varios procesos tomando en cuenta indicadores como daño al ecosistema, salud humana y afectación a los recursos (RIVM Committed to health and sustainability 2018). Debido a esto, los autores han escogido realizar un ACV para sus estudios.

La unidad funcional de los ACV de manejo de residuos sólidos se recomienda este en función de la principal entrada por lo que, los estudios revisados concuerdan con la unidad funcional de una tonelada de residuo sólido, en lo que difiere es en el punto de partida o límite del sistema.

Teniendo en cuenta que las etapas de un manejo responsable de RSM son las de generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final; nuestros autores han definido los límites de su sistema en función al objetivo del estudio.

Los estudios de (Ayodele, Ogunjuyigbe, and Alao 2017; Cherubini, Bargigli, and Ulgiati 2009; Chicaiza et al. 2020; Erses Yay 2015; De Feo et al. 2016; Wang et al. 2020) concuerdan con su límite del sistema desde la colección de los residuos, transporte, tratamiento y disposición final, mientras que (Khandelwal et al. 2019) parte desde el transporte; (Ziegler-Rodriguez et al. 2019)(Zaman 2010) parten desde los residuos dispuestos ya en el relleno sanitario.

Siendo el cambio climático uno de los problemas más importantes de esta época, y la gestión de RSM aporta considerablemente a ello (Wang et al. 2020), la categoría de calentamiento global es la más evaluada seguida por acidificación y eutrofización. Estudios como (Wang et al. 2020)(De Feo et al. 2016) se centran únicamente en la categoría de calentamiento global.

(Chicaiza et al. 2020) en su estudio realiza un ACV de la gestión de RSM de Quito y se enfoca en determinar el proceso de mayor impacto ambiental respecto a los procesos que se llevan a cabo actualmente en el relleno. El estudio concluye que el sistema de captación de biogás es el que menos aporta en impactos ambientales, mientras que el de mayor impacto ambiental es el tratamiento de residuos sólidos.

(Zaman 2010) analiza mediante ACV tres alternativas de tratamiento de un sistema de gestión de RSM. Concluye que la opción con menor impacto ambiental es la de recuperación de energía eléctrica, sin embargo enfatiza que la mejor opción es generar menos residuos.

(De Feo et al. 2016) calculó mediante un ACV el proceso más contaminante de una gestión de RSM de una zona al sur de Italia y la evaluó usando tres métodos diferentes. Concluyó que es prioritario que todas las etapas de un tratamiento se encuentren en el mismo lugar para evitar impactos relacionados al transporte, es su caso para el transporte de los residuos reciclados para un tratamiento externo; Además indicó que obtuvo resultados diferentes por cada método y esto era debido a la información que requieren cada una y al peso que se le otorga a cada proceso en sus algoritmos.

Por su parte, (Wang et al. 2020) realiza una comparación histórica de tres escenarios pasados de un relleno sanitario y de un escenario futuro. Para ello utiliza los factores de conversión dados por (UK GOV 2020). El estudio concluye que Nottingham continua siendo un emisor de GEI respecto al tiempo, el escenario futuro es favorable siempre y cuando se lleve a cabo, este contempla reducción de residuos, separación en la fuente y digestión anaeróbica de los residuos.

(Ayodele et al. 2017; Ziegler-Rodriguez et al. 2019) realizaron ACV de la gestión de RSM de zonas diferentes. Aseguran que los resultados varían en torno a las condiciones climáticas, y composición de residuos de cada lugar.

(Ziegler-Rodriguez et al. 2019) evalúa tres zonas de disposición de residuos en Perú, un botadero a cielo abierto en la zona amazónica, y dos rellenos controlados, uno en la costa y otro en la sierra, uno con tratamiento de biogás y otro no, respectivamente. Concluye que las emisiones de GEI son menores en el relleno controlado con tratamiento de biogás mediante la quema.

Por su parte (Ayodele et al. 2017) evalúa 12 rellenos sanitarios dentro de la zona de Nigeria, pero al igual que (Cherubini et al. 2009; Erses Yay 2015; Khandelwal et al. 2019; Zaman 2010) elaboraron escenario de diferentes tipos de tratamientos, desde el caso base de ningún tratamiento hasta la mezcla de reciclaje, recuperación de biogás para energía, incineración, digestión anaerobia y pirolisis.

(Ayodele et al. 2017) define cuatro escenarios, el primero.- residuos dispuestos en el relleno sin ningún tratamiento; segundo.- reciclaje y recuperación de biogás, se excluye tratamiento de lixiviados; tercero.- un híbrido de digestión anaerobia e incineración donde solo la materia orgánica va a AD y el restante a incineración en ambos casos para la generación de energía eléctrica; cuarto.- los residuos orgánicos se disponen en el relleno y el biogás se recupera para generación, mientras que los residuos restantes se incineran. El estudio concluyó que el peor escenario es el primero y el mejor es el escenario tres debido a la reducción total de residuos.

(Cherubini et al. 2009) definió tres alternativas: S1 no se recupera nada, S2 parte del biogás generado pasa a energía, S3 se recicla y se recupera biogás para energía y S4 se incineran los residuos y se genera energía. Se concluyó que la mejor opción es el S4 y la más contaminante es el S1 seguido de la S2, esto debido a que siempre será mejor generar menos residuos.

(Khandelwal et al. 2019) Mediante un ACV evalúa escenario de un sistema de gestión de RSM. S1 compostaje y relleno sanitario; S2 reciclaje, compostaje y relleno; S3 reciclaje, AD y relleno sanitario; S4 Reciclaje, AD, compostaje y relleno sanitario. El estudio concluye que el escenario 2 es el mejor ya que reduce el número de residuos.

(Erses Yay 2015) compara diferentes alternativas a través de un ACV. A1 relleno sanitario; A2 reciclaje y relleno; A3 reciclaje y compostaje y relleno sanitario; A4 Incineración y relleno; A5 reciclaje, compostaje, incineración y relleno. El estudio

concluyó que los mayores impactos ambientales son de la A1 y A4, y las mejores opciones las A5 seguida de la A3.

En base a la revisión bibliográfica determinamos que: El comportamiento de los residuos y los impactos ligados a su tratamiento puede variar por la composición y las condiciones climáticas del lugar; se debe priorizar la disminución de residuos ya que es la mejor alternativa para la disminución de impactos; el reciclaje, compostaje, incineración con recuperación de energía y AD con recuperación de energía es la mejor opción, ya que después de estos tratamiento disminuye considerablemente el residuo que se dispone en el relleno sanitario para disposición final.

Tabla 1 Revisión bibliográfica de estudios similares respecto a límites del sistema.

Nombre	Objetivo	Unidad funcional	Límites del sistema	Indicador	Método	Conclusión
Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective (Ziegler-Rodriguez et al. 2019).	ACV de tres rellenos sanitarios diferentes ubicados en áreas geográficas distintas de Perú: costa, sierra y selva.	1 tonelada métrica de RSM dispuesta en un relleno sanitario peruano.	Todas las operaciones dentro del relleno, se exceptuó recolección y transporte.	ADP, FEP, MEP, TETP, TAP100, GWP100a, HTP.	Recipe 2008	La migración de botaderos de cielo abierto a relleno sanitario representa un beneficio ambiental y en la salud humana. El tratamiento del biogás es un aspecto crítico en la reducción de GEI.
Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method (Zaman 2010)	Analizar tres diferentes tecnologías de tratamiento de un sistema de gestión de RSM	1 tonelada de residuo dispuesto en el relleno sanitario.	Todas las operaciones dentro del relleno, se exceptuó recolección y transporte.	ADP, TAP100, EP, GWP100a, OD, HTP, FETP, POFT.	CML 2 baseline (2000)	El RS con recuperación de energía representa la opción con menor impacto ambiental, pero verter residuos no es una opción favorable puesto que, la disposición final del mismo siempre representará un problema.
Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran (Rajaeifar et al. 2015).	Evaluar comparativamente diferentes escenarios para elegir así la mejor opción para el municipio de Tehran.	1 tonelada de RSM del municipio de Tehran.	Transporte, clasificación, AD, relleno sanitario, incineración y compostaje.	GWP100a Human Health, Resource	CML, ReCipe 2008, Ecoindicator 99	De manera global el escenario 1 es el peor. La mejor opción es el escenario 4. El escenario 3 se considerara implementar por el momento.

Tabla 2 Revisión bibliográfica de estudios de indicadores similares

Nombre	Objetivo	Unidad funcional	Límites del sistema	Indicador	Método	Conclusión
Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya (Erses Yay 2015).	Comparar diferentes alternativas de manejo de RSM con un enfoque de ciclo de vida.	1 tonelada de residuo sólido municipal generado en Sakarya	Recolección, transporte, alternativa de tratamientos de residuo, relleno sanitario.	ADP, GWP100a ODP, HTP, FETP, METP, TETP, POFP,	CML-IA ReCiPe Midpoint (H) V1.04	Los mayores impactos ambientales se evidenciaron para la A1 y A4. La mejor opción ambientalmente amigable es la A5. La A3 podría ser favorable.
Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India (Khandelwal et al. 2019).	Evaluar y comparar los impactos ambientales de un SG RSM en Nagpur, India para 4 diferentes escenarios.	El manejo de una tonelada métrica de residuo sólido municipal de Nagpur, India.	Transporte, recuperación de materia, compostaje, AD y disposición final en el relleno sanitario.	GWP100a, HTP, FET, POFP, TAP100, ADP.	CML-1A	La combinación de reciclaje, compostaje y relleno sanitario es la mejor opción. S2
Evaluation of municipal solid waste management system of Quito - Ecuador through life cycle assessment approach (Chicaiza et al. 2020)	Evaluar la gestión de RSM de Quito mediante ACV.	1 tonelada de RSM generada	Colección, transporte y disposición final de los residuos.	GWP100a, S-OD, TAP100, FEP, FDP, WDP.	ReCiPe2 016	El proceso de menor impacto ambiental fue la captación de biogás, seguido por la compactación y el transporte; el proceso de mayor impacto está en la planta de lixiviados.
Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria (Ayodele et al. 2017)	Evaluar una serie de escenarios en 12 ubicaciones diferentes en Nigeria.	1 tonelada de RSM generada de diferentes ubicaciones entre 2016-2035.	Colección hasta la disposición final.	GWP100a TAP100, Emisión de dioxinas y furanos.	Eco-indicator 99	El escenario base es el peor contaminante; El escenario de Incineración y AD es la mejor opción seguido de la biogás con generación de energía.

Tabla 3 Revisión bibliográfica respecto a la categoría de Calentamiento Global.

Nombre	Objetivo	Unidad funcional	Límites del sistema	Indicador	Método	Conclusión
Life cycle assessment of municipal solid waste management in Nottingham, England: Past and future perspectives (Wang et al. 2020)	Cuantificar y comparar el GWP de tres estrategias históricas de gestión de RSM en tres etapas de desarrollo de Nottingham,	1 tonelada de RSM generada.	Recolección, transporte, tratamiento y disposición final.	GWP100a	IPCC GWP factores.	El sistema de gestión de RSM de Nottingham sigue siendo un emisor de GEI debido a la baja recuperación de energía y por el transporte de los materiales reciclados.
LCA of the Collection, Transportation, Treatment and Disposal of Source Separated Municipal Waste: A Southern Italy Case Study (De Feo et al. 2016)	Calcular los recursos utilizados y los impactos ambientales producidos para llevar a cabo el servicio de recogida selectiva en acera de MW de la localidad en estudio en un año	1 tonelada de residuos generados con una composición definida.	Colección, transporte, tratamiento y disposición final de los RSM in Baronissi	GWP100a	IPCC 2007, Ecologic al Footprint and ReCiPe 2008	Contar con un sistema de tratamiento de residuos en la misma área disminuye los impactos ambientales derivados del transporte de residuos a tratamiento externo.
LCA: A decision support tool for environmental assessment of MSW management systems (Liamsanguan and Gheewala 2008).	Comparar dos métodos de manejo de RSM en la ciudad de Phuket en Tailandia.	1 tonelada de MSW tratado.	No se incluye la colección ni el transporte.	GWP100a	IPCC	Incineración representa un impacto mejor al de relleno sanitario, sin embargo relleno sanitario con recuperación de energía es una mejor opción.

ACV análisis de ciclo de vida; RSM residuo sólido municipal; AD digestión anaerobia; RS relleno sanitario; GWP100a Calentamiento global; ADP agotamiento abiótico; S-OD Agotamiento de la capa de ozono estratosférico; TAP100 acidificación terrestre; FEP Eutrofización del agua dulce; MEP Eutrofización del agua de mar; LU uso de tierra, FDP agotamiento de los recursos sólidos, WDP Agotamiento del agua; HTP Toxicidad humana; POFT oxidación fotoquímica.; FETP eutrofización del agua dulce. (Fuente: Autor)

CAPÍTULO 3

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Alcance

3.1.1 Descripción del Relleno Sanitario

El relleno sanitario desde el 2011 forma parte de un Complejo de Desarrollo Humano Ambiental administrado por una empresa municipal pública, el complejo comprende el relleno sanitario, tratamiento de residuos infecciosos, centro de acopio y planta de biogás (EMAC 2014).

La empresa administradora por su parte, hasta el 1998 se desarrolló como un departamento de higiene del GAD Municipal, y debido a problemas de índole económico y de infraestructura que involucra la calidad del servicio, en diciembre de 1998 se consolida como empresa municipal en el 2010 y pasa a ser empresa pública con independencia presupuestaria, financiera, económica, administrativa y de gestión, también dirige los servicios de recolección, barrido y limpieza, áreas verdes, escombrera, de la ciudad (EMAC 2014).

Previo a la construcción del relleno sanitario, los residuos de la ciudad se disponían en el botadero controlado el Valle ubicado en la parroquia El Valle, a 12 km de la urbe, operó por 32 años y en un área de 8,5 Ha se ubicaron 1,3 millones de residuos sólidos, cerró en el 2001 dando paso al nuevo relleno.

La empresa administradora convirtió a este botadero controlado en un Eco Parque con el objetivo de educar a jóvenes y adultos sobre la gestión de los residuos sólidos y la importancia de reciclar, a su vez, un lugar de distracción sana y familiar (Revista Cuenca Ilustre 2013).

3.1.1.2 Relleno Sanitario

El relleno sanitario tiene un área total de 130 Ha y recibe diariamente 531 toneladas de residuos sólidos, además debido a convenios con otros municipios recibe de 7 a 8% de otros cantones (PVI 2018).

El relleno se extiende a lo largo de un río y cuenta con puntos de muestreo tanto en el agua subterránea como a aguas río arriba para monitorear el efecto de la operación del relleno en el río.

Cuenta con un clima privilegiado por encontrarse dentro de un valle con temperaturas que oscilan entre los 22°C y 27°C y lluvias entre 47 y 109 mm (GAD Parroquial Santa Ana n.d.).



Figura 3.1 Vista satelital del relleno sanitario

Fuente: (Google Earth n.d.)

La operación del relleno inició el 3 de septiembre del 2001 debido a la clausura del botadero controlado de esta ciudad, obtuvo su licencia ambiental otorgada por el Ministerio de Ambiente el 14 de diciembre del 2002 gracias a su sistema integrado de gestión ambiental que maneja, certificado en normas internacionales ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001 (EMAC 2014).

El relleno sanitario se ha dividido de la siguiente manera:

Norte 1.- Inicio operaciones en 2001 y cerró en 2009, recibió un aproximado de 800000 toneladas de residuos sólidos, 200 a 250 toneladas diarias aproximadamente con lo que se formaron 8 plataformas, las cuales a su cierre se cubrió con un tipo de césped llamado kicuyo (Andrade et al. 2018).

Norte 2.- Inicio operaciones en el 2009 y se prevé su cierre para el 2022, se depositan 531 toneladas diarias y hasta el 2019 se ha colocado 2 millones de toneladas en esta fase (Andrade et al. 2018).

Sur 1.- Se pronostica que empiece operaciones en el año 2022 (Andrade et al. 2018).

La tabla 2 a continuación muestra las características técnicas del relleno:

Tabla 4 Características del relleno sanitario

Cota de arranque del relleno	2619 msnm
Área total	130 Ha
Peso promedio de RSM depositados	531 t/día
Vida útil	30 años
Peso específico de desechos compactados	1 t/m ³
Equipo utilizado	<p>1 Tractor Komatsu D65 de 190 hp 2007</p> <p>1 Excavadora de orugas Caterpillar 320-C de 138 hp 2005</p> <p>1 Rodillo compactador Caterpillar 816F2 de 232 hp 2010</p> <p>2 Tanqueros de 3500 galones para transporte de lixiviados.</p>
Sistema de impermeabilización mixta	Capa de arcilla compactada (S≥90%) con e= 0,20 m y geo membrana de polietileno de alta densidad con e=1 mm
Ducto de gases	Construidos con piedra y tubería de polietileno de alta densidad de 150 mm., y redes primarias de 200mm.
Drenes de lixiviados	Construidos con piedra, tubería perforada de 160 mm y geotextil no tejido de 0,25 mm con permeabilidad de 45×10^{-2} cm/s
Volumen promedio de lixiviados	160 m ³ /día
Volumen de almacenamiento de Lix	9500 m ³ /día
Sistema de operación de relleno	Contrato con terceros

Fuente: (EMAC 2014)

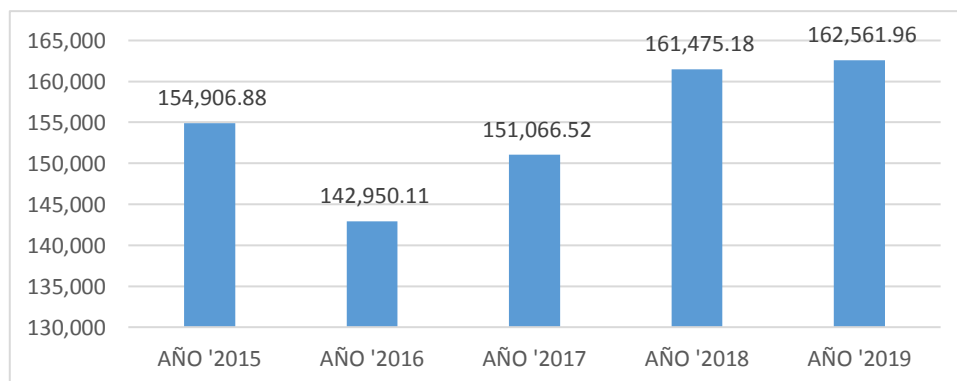
La composición de los residuos dispuestos en el relleno sanitario según un estudio realizado por la Universidad Católica de Cuenca en el 2015 es la siguiente:

Tabla 5 Composición de residuos

Componentes	%
Materia orgánica	64.39
Papel y cartón	6.30
Metales	0.94
Plástico blando	7.07
Plástico rígido	3.39
Caucho	0.16
Materia inerte	0.26
Vidrio	2.23
Madera	0.34
Textiles	1.92
Papel higiénico, toallas y pañales	9.61
Tetra pack	1.94
Otros	1.45

Fuente: (Muñoz and Solano 2018)

La figura 3.2 muestra el historial de pesos recibidos en el relleno sanitario desde el año 2015 hasta el 2019. A partir del año 2016 se muestra una tendencia de subida respecto a los residuos recibidos.

**Figura 3.2** Historial de pesos 2015-2019

Fuente: (EMAC EP n.d.)

La degradación de los residuos forma un líquido negro de apariencia putrefacta de mal olor llamado lixiviado, este líquido junto con las aguas lluvias que se infiltran en el relleno caen por gravedad a través de canales diseñados para que se drenen los líquidos hacia las piscinas que están en la cota de arranque del relleno.

Existen tres piscinas para lixiviados, dos se utilizan de forma continua mientras que la tercera se utiliza cuando hay un exceso de líquido, esto ocurre habitualmente en invierno.

Los lixiviados almacenados en las piscinas del relleno reciben un tratamiento primario previo a ser transportarlos en tanques herméticos hacia la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa que gestiona y trata el agua en dicha ciudad.



Figura 3.3 Piscina de lixiviados

(Fuente: Autor)

Las aguas lluvias son recolectadas mediante canales y son llevadas a las piscinas de tratamiento primario.



Figura 3.4 Canales para aguas lluvias

(Fuente: Autor)

A sus alrededores no existen viviendas que colindan con el relleno, pero si áreas destinadas completamente a la agricultura. Dentro, existen construcciones destinadas para la operación del sitio y cuenta con pozos de monitoreo para el agua subterránea, franja de protección vegetal, cerramiento perimetral, accesos definidos para el sitio y dentro de este, báscula de pesaje, oficinas, guardianía y garajes.

3.1.1.3 Planta de esterilización

La planta de esterilización es parte del Complejo de Desarrollo Humano Ambiental recibe 2000 kg de residuos infecciosos al día. Cuenta con licencia ambiental otorgada por el Ministerio del Ambiente desde el 12 de diciembre del 2013.

Los residuos infecciosos se recolectan de forma independiente, se transportan a la planta, se pesan y se esterilizan para posteriormente disponerlos dentro del relleno sanitario.

La planta posee dos autoclaves para la esterilización de 2000 litros de capacidad y dos calderos, los cuales cuentan con una certificación ambiental ASME (EMAC 2019a)

3.1.1.4 Centro de acopio

El centro de acopio del complejo se encuentra a lado del relleno sanitario y el personal que labora en el son parte de la “Asociación de recicladores del El Chorro”, debido a un convenio firmado entre la empresa administradora y esta asociación en el 2018 y se fijó por 4 años.

La recolección del reciclaje se realiza de manera conjunta con los desechos comunes pero se recibe en fundas celeste, estos residuos comprenden: plásticos rígidos y duros, papel y cartón, chatarra, aluminio y latas. La empresa administradora realiza continuas charlas y socializa por sus canales digitales la forma correcta de realizar la separación en los hogares.

Se recolecta 38.8 toneladas al mes de residuos dispuestos en fundas celestes, pero solo el 25% del mismo es material reciclable, el restante se coloca en el relleno sanitario.

Adicional se cuenta con sitios de acopio y puntos móviles donde se recauda aproximadamente 104 toneladas de residuos al año (EMAC 2019b).



Figura 3.5 Centro de acopio

Fuente: Autor

3.1.1.5 Planta de generación de electricidad a partir de biogás

La planta de generación de biogás es una sociedad de capital mixto entre la empresa administradora y una empresa Holandesa, dicha sociedad con fracción 51% y 49% respectivamente comenzó en el año 2012 después de realizar un estudio de pre factibilidad de generación de energía a partir del biogás generado en el relleno (EBE 2012).



Figura 3.6 Procesador de biogás

(Fuente: Autor)

Para la obtención de biogás se cuenta con 53 pozos ubicados en todo el relleno, para los cuales se realizaron perforaciones tipo almeja con tuberías de polietileno de alta densidad HDPE, para evitar el ataque químico y las altas temperaturas que pueden suscitar en el pozo. Para monitorear la concentración del biogás se toma mediciones semanales en los cabezales de pozo ubicados en la parte alta del relleno (figura 3.7).



Figura 3.7 Cabezales de pozo

(Fuente: Autor)

Se considera un pozo óptimo para extraer biogás cuando la concentración de metano está por encima del 50%, si el pozo monitoreado cumple con la condición se abre la válvula para que mediante tuberías se transporte el biogás a la planta.

El sistema de captación de biogás es a través de redes secundarias de 160mm de diámetro (azules), y redes primarias de 200 mm de diámetro (roja). Las tuberías son de polietileno de alta densidad HDPE

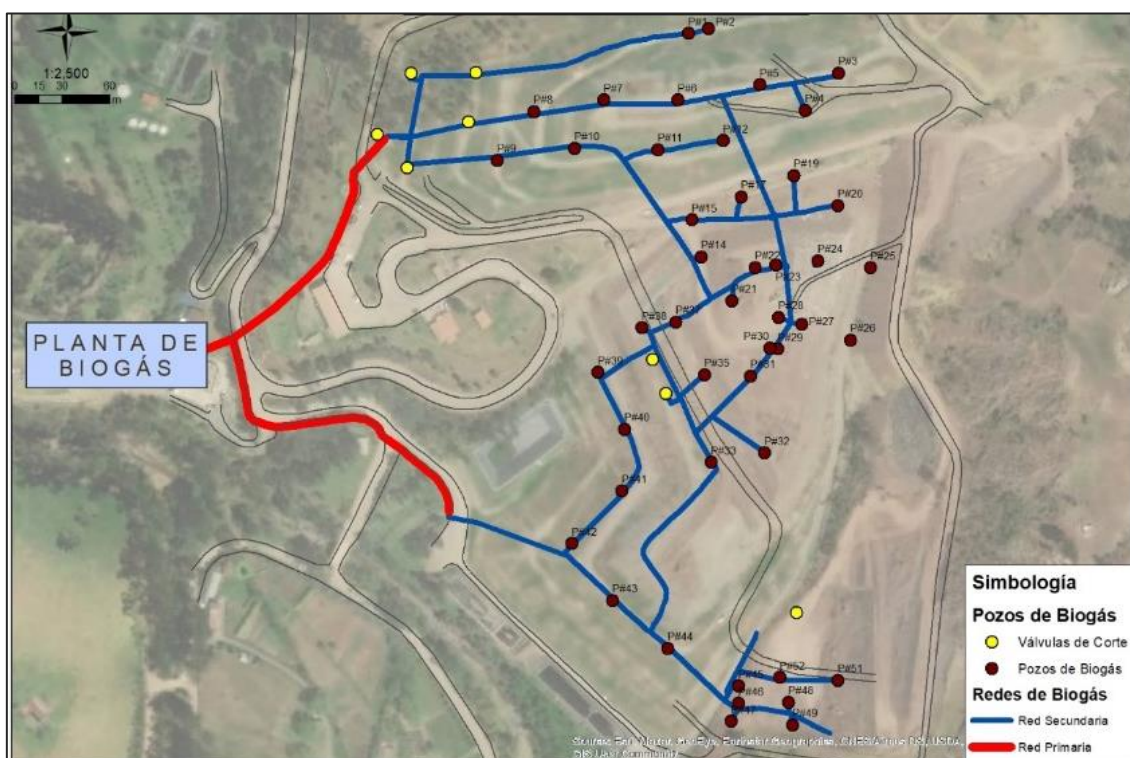


Figura 3.8 Esquema de los pozos y las redes de biogás del relleno sanitario

(Fuente: BGP)

El procesamiento del biogás cuenta con un bioprocesador de tres etapas, en la primera se realiza la extracción del biogás, el segundo es un condensador el cual funciona con un refrigerante para así deshumidificar el biogás y mejorar su calidad, la tercera etapa es un control de calidad.



Figura 3.9 Bioprocesador, procesamiento del biogás, BGP

(Fuente: Autor)

Posterior, el biogás pasa a la casa de máquinas, si presenta calidad óptima para la generación de electricidad, es conducido al motor, caso contrario pasa la chimenea a quemarse.

El motor de combustión interna genera 2MW, y utiliza como combustible el metano contenido en el biogás que se produce en el relleno sanitario (EMAC 2020).



Figura 3.10 Motor de combustión interna, BGP.

(Fuente: Autor)

En este proceso, además de generar electricidad, se reducen los gases de efecto invernadero causado por las emisiones de metano y otros gases a la atmósfera.

3.1.2 Unidad funcional

La unidad funcional se ha definido como “1 tonelada de residuo sólido municipal dispuesto en el relleno sanitario”. Esta unidad funcional es la más utilizada en el manejo de residuos sólidos municipales, de tal manera que se pueda realizar comparativas con estudios similares.

3.1.3 Límites del sistema

3.1.3.1 Límites con respecto al sistema natural

Este estudio se ha delimitado a la fase de operación del relleno sanitario, desde la colocación y recubrimiento del residuo en el relleno, la degradación del mismo, el procesamiento del biogás, generación de energía y quema de biogás, se ha excluido la recolección, el transporte, y el reciclaje previo a la colocación de los residuos en el relleno.

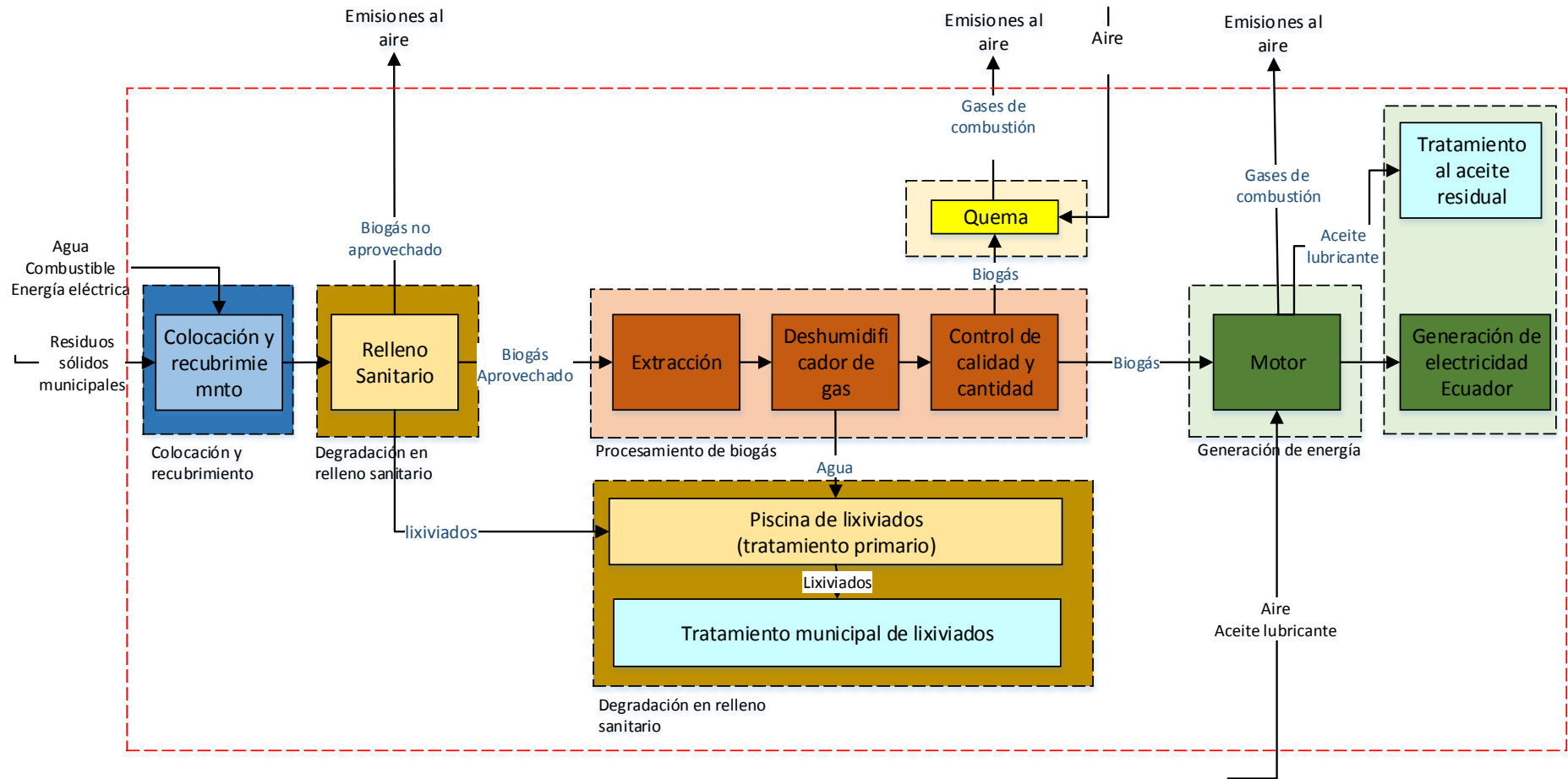


Figura 3.11 Límites del sistema

(Fuente: Autor)

Como parte de este estudio se realizó una comparación de desempeños ambientales de la situación actual de *captación* de nuestro relleno versus dos escenarios de captación.

Tabla 6 Escenarios previstos para el estudio

	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Biogás no aprovechado	60%	30%	0%
Biogás aprovechado	40%	70%	100%

(Fuente: Autor)

3.1.3.1.1 Colocación y recubrimiento

Los residuos sólidos municipales son colocados en relleno, se compactan y recubren con suelo arcilloso.

El combustible es utilizado por la maquinaria pesada para realizar la colocación y recubrimientos de los residuos, mientras que el consumo de agua y energía eléctrica es de los servicios generales del relleno sanitario.

3.1.3.1.2 Relleno sanitario

En este proceso los residuos sólidos municipales están sepultados, las salidas son el biogás y los lixiviados.

Parte del biogás generado se emite a la atmósfera y otra pasa a procesamiento.

3.1.3.1.3 Procesamiento de biogás

El biogás es captado y extraído a la planta de biogás, se deshumifica y pasa por un proceso de control de calidad.

El control de calidad de biogás considera tres condiciones en que el biogás extraído “no” pase al motor y son:

1. Cuando la concentración de metano es menor al 50% y el de oxígeno mayor al 2%,
2. Cuando el flujo de biogás es mayor al permitido por el motor,
3. Mantenimiento del motor de combustión interna.

3.1.3.1.4 Incineración de biogás

Si el biogás cumple con las condiciones descritas anteriormente en el proceso de control de calidad será enviado a quema libre y los gases saldrán por la antorcha.

3.1.3.1.5 Generación de energía

El biogás pasa al motor, se genera energía eléctrica y gases de combustión.

3.1.3.2 Límites geográficos

El límite geográfico establecido son las 130 Ha del Complejo de desarrollo Humano Ambiental, ya que dentro de este se realiza todas las operaciones que hemos designado en los límites naturales.

3.1.3.3 Límite temporal

El límite temporal es la información en un lapso de un año, desde enero a diciembre del 2019.

3.2 Paquete informático

Para el cálculo de inventario y de los resultados de indicador de impacto se utilizó el software OPEN LCA el cual es una herramienta para el análisis de ciclo de vida. Este software profesional es libre con licencia Mozilla Public License, una interfaz amigable y sencilla de manejar, permite importar cualquier base de datos en formato EcoSpold o ILCD, no requiere conexión a internet y funciona con Windows, MacOS y Linux.

Entre las bases de datos a las que se puede acceder están: Ecoinvent, Gabi Database, ESU services, Social hotspots database, BIOENERGY EDAT, entre otras.

Esta herramienta fue desarrollada en 2006 por Green Delta, empresa de consultoría ubicada en Berlín, la cual ha creado redes globales respecto al análisis de ciclo de vida para proporcionar soporte y datos a los usuarios de OPENLCA (Jutta Hildenbrand, Michael Srocka, and Andreas Citroth 2005).

3.3 Análisis de inventario de ciclo de vida

3.3.1 Obtención de datos primarios

Para realizar un correcto ACV es primordial tener información primaria, por esto se solicitó vía correo a la administración de la Empresa administradora la información necesaria respecto a la operación del relleno.

En respuesta a esta solicitud se recibió la siguiente información: consumo de agua, combustible, energía eléctrica, historial de pesos recogidos, composición de los residuos y el flujo y composición de los lixiviados. Respecto a la planta de biogás se solicitó la información a su gerente, además se solicitó una visita para conocer la planta y el relleno sanitario.

Se realizó la visita al relleno sanitario ubicado en una ciudad de la sierra ecuatoriana en diciembre del 2019. Se estudió el proceso y se solicitó la información requerida para un ACV.

Se obtuvo la composición de los gases de salida del relleno, porcentaje de captación, flujo de biogás que ingresa a la planta, relación aire combustible del motor de combustión interna, perfil de gases de salida del motor, energía que se entrega al sistema, consumo de aceite lubricante del motor.

3.3.2 Obtención de datos secundarios

La información obtenida de base de datos se muestra a continuación:

Tabla 7 Información secundaria obtenida de base de datos

Información secundaria	Base de datos Ecoinvent
Tratamiento para los lixiviados	market for wastewater, average wastewater, average APOS, U - RoW
Proveedor de Diésel	market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine APOS, U - GLO
Disposición final de aceites lubricantes.	treatment of waste mineral oil, hazardous waste incineration waste mineral oil APOS, U - RoW

(Fuente: Autor)

Los datos que se obtuvieron de fuentes externas se describen a continuación:

Tabla 8 Información secundaria obtenida de literatura

Información secundaria	Fuente
Densidad del biogás	Greenhouse gas reporting: conversion factors 2019 (Department for Business 2020).
Densidad del combustible	
Densidad del aceite lubricante	
Relación aire combustible quema libre	Air fuel ratio study for mixture of biogas and hydrogen on mild combustion (Noor, Wandel, and Yusaf 2014)
Hoja técnica del motor de combustión interna.	Gas Engines and Gensets (Guascor 2018).
Flujo de salida del motor de combustión interna.	Calculation of Exhaust Gas Flow Rate in an Internal Combustion Engine (Gurjap Singh 2019)
Proveedor de energía eléctrica.	Lights and shadows of the environmental impacts of fossil-based electricity generation technologies: A

Información secundaria	Fuente
	contribution based on the Ecuadorian experience (Ramirez et al. 2019).

(Fuente: Autor)

3.4 Evaluación de impacto de ciclo de vida.

Se utilizó el método ReCiPe para la evaluación de impactos, uno de los métodos más usados y aceptados, este fue desarrollado en conjunto por el Instituto Nacional Holandés de Salud Pública y Medio Ambiente RIVM, la Universidad Radboud, la Universidad Norwegian de Ciencia y Tecnología y Pré Consultants.

Esta metodología traslada las emisiones y las extracciones de recursos a puntuaciones a través de los factores de caracterización, lo calcula mediante 18 indicadores de punto medio y 3 indicadores de punto final.

Los indicadores de punto final representan impactos ambientales de alto nivel, y son la interpretación de la evaluación ambiental de los puntos medios (RIVM Committed to health and sustainability 2018).

Los indicadores de punto medio son categorías de impacto y en este estudio haremos principal énfasis en las siguientes:

Los predecesores de ReCiPe son CML2000 y Eco-indicator 99, representando una mejora (RIVM 2016).

Tabla 9 Categorías de impacto utilizadas en este estudio

Categoría de impacto	Unidad	Abreviatura
Calentamiento global	kg CO ₂ -Eq	GWP100
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC ⁻¹¹ Eq	ODP
Acidificación terrestre	kg SO ₂ Eq	TAP100
Eutrofización de agua dulce	kg P-Eq	FEP
Oxidación fotoquímica	kg NMVOC-Eq	POFP
Agotamiento de los recursos fósiles	kg oil-Eq	FDP
Formación de partículas	kg PM10-Eq	PMFP

(Fuente: Autor)

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de inventario de ciclo de vida

4.1.1 Hojas de proceso desarrolladas para este estudio

En base a la colección de datos especificada en el capítulo anterior se ingresó la información al software OpenLCA para cada fase de nuestro estudio.

Cada inventario se elaboró en relación la entrada principal de cada fase.

4.1.1.1 Colocación y recubrimiento.

En la fase de colocación y recubrimiento la entrada principal es el residuo sólido municipal RSM, ingresa agua potable, energía eléctrica y combustible.

La salida de esta fase es el RSM dispuesto ya en el relleno sanitario, la tabla 8 muestra el inventario de la fase de colocación y recubrimiento.

Tabla 10 Inventario de la fase de colocación y recubrimiento

Entradas		
Flujo de productos	Valor	Unidad
Residuo Sólido Municipal	1	kg
Agua potable	6.95E-3	kg
Energía eléctrica	7.8E-05	kWh
Diésel	7.17E-5	GJ
Salidas		
Flujo de productos	Valor	Unidad
RSM sepultado	1	kg

(Fuente: Autor)

4.1.1.2 Degradación de relleno sanitario

El RSM sepultado se registró como entrada principal al proceso de degradación de relleno sanitario.

Según los escenarios previstos en la tabla 9, respecto a la captación de biogás del relleno sanitario hacia la planta de generación, se calcularon las salidas de esta fase. La cantidad de lixiviados generada no cambia con los escenarios ya que está depende directamente de la cantidad de RSM sepultados. Las emisiones al aire están en relación al biogás no aprovechado.

Tabla 11 Inventario de la fase de degradación de relleno

Entradas				
Flujo de productos	Valor			Unidad
<i>RSM sepultado</i>	1			kg
Salidas				
	Esc. 0	Esc. 1	Esc. 2	
Flujos de producto	Valor	Valor	Valor	Unidad
Lixiviados	2.97E-4			m3
Biogás aprovechado	1.64E-2	2.87E-2	4.1E-2	m3
Flujos naturales	Valor	Valor	Valor	Unidad
Metano CH ₄	9.75E-03	4.88E-03	0	kg
Dióxido de carbono CO ₂	2.19E-02	1.10E-02	0	kg
Ácido sulfhídrico H ₂ S	1.64E-04	8.21E-05	0	kg

(Fuente: Autor)

4.1.1.3 Procesamiento de biogás

En el inventario del procesamiento de biogás la entrada es el biogás aprovechado, las salidas de esta fase está en el proceso de control de calidad que será: el biogás al motor y el biogás a antorcha.

Tabla 12 Inventario de la fase de procesamiento de biogás

Entradas		
Flujo de productos	Valor	Unidad
<i>Biogás</i>	1	m ³
Salidas		

Flujo de productos	Valor	Unidad
Biogás a generación	0.741	m ³
Biogás a incineración	0.259	m ³

(Fuente: Autor)

4.1.1.4 Generación de energía eléctrica

A partir del biogás que ingresa al motor de combustión interna se genera energía eléctrica y gases de combustión. Además se toma en cuenta el aceite lubricante que utiliza el motor para su funcionamiento. La energía eléctrica generada a partir de biogás de relleno sanitario es considerada un producto evitado.

La tabla 11 muestra el inventario de impactos de esta fase, tener en cuenta que las salidas están calculadas respecto a 1m³ de biogás que paso a generación.

Tabla 13 Inventario de la fase de generación de energía eléctrica

Entradas		
Flujo de productos	Valor	Unidad
<i>Biogás a generación</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>
Salidas		
Flujo naturales	Valor	Unidad
Monóxido de carbono CO	3.07E-3	kg
Dióxido de carbono CO ₂	4.93E-1	kg
Óxidos de nitrógeno NO _x	4.58E-3	kg
Dióxido de azufre SO ₂	7.37E-5	kg
Flujos de proceso	Valor	Unidad
Residuo aceite lubricante	8.16E-4	kg
Energía eléctrica (Producto Evitado)	1.908	kWh

(Fuente: Autor)

4.1.1.5 Incineración de biogás

La tabla 12 muestra el inventario de la fase de incineración, tener en cuenta que el perfil de gases que se emite de la quema libre se asumió el mismo que de la salida del motor de combustión interna. Las salidas están calculadas respecto a 1m³ de biogás que paso a incineración.

Tabla 14 Inventario de la incineración del biogás

Entradas		
Flujo de procesos	Valor	Unidad
<i>Biogás a incineración</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>
Salidas		
Flujos naturales	Valor	Unidad
Monóxido de carbono CO	5.97E-4	kg
Dióxido de carbono CO ₂	9.58E-2	kg
Óxidos de nitrógeno NO _x	8.92E-4	kg
Dióxido de azufre SO ₂	1.43E-5	kg

(Fuente: Autor)

4.2 Evaluación de impactos de ciclo de vida

Se realizó el análisis de ciclo de vida mediante la metodología ReCiPe Midpoint (H) V1.13, respecto a siete categorías de impacto: Calentamiento global, agotamiento de recursos fósiles, eutrofización de agua dulce, agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, oxidación fotoquímica y acidificación terrestre.

La tabla 13 muestra los resultados obtenidos para los tres escenarios determinados en base a la unidad funcional: 1 t de RSM dispuestos en el Relleno sanitario.

La figura 4.1 muestra los resultados de este estudio normalizados en base al escenario 0, mientras que la figura 4.2 muestra el análisis de contribución por escenario y por categoría de impacto. Las fases analizadas fueron: colocación y recubrimiento, degradación de relleno sanitario, generación de energía e incineración, no se toma en cuenta la fase de procesamiento ya no hay impactos relacionados a esta fase.

La generación de energía a partir del biogás de relleno provee de créditos por el desplazamiento de generación a la red con mayor emisión de gases de efecto invernadero y se expresa con valores negativos en la figura 4.2, a esto le llamaremos producto evitado.

El consumo de combustible y la generación de lixiviados no varía respecto a los escenarios planteados.

Tabla 15 Resultados del análisis de ciclo de vida por escenarios. FU: 1 ton RSM colocados en el relleno sanitario.

Categoría	Unidad	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2
Calentamiento global	kg CO ₂ -Eq	220.511	109.395	-1.94817
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil-Eq	1.030	0.179	-0.675
Eutrofización del agua dulce	kg P-Eq	1.31E-04	1.08E-04	8.16E-05
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11-Eq	6.22E-07	2.54E-07	-1.18E-07
Formación de partículas	kg PM ₁₀ -Eq	2.92E-02	3.10E-02	3.28E-02
Oxidación fotoquímica	kg NMVOC-Eq	2.29E-01	2.09E-01	1.89E-01
Acidificación	kg SO ₂ -Eq	5.34E-02	5.48E-02	5.61E-02

(Fuente: Autor)

Según la figura 4.1 para la categoría de calentamiento global el escenario 1 representa la mitad de las emisiones de CO₂ Eq. respecto al escenario 0, ya que al aumentar la captación de biogás se reduce la cantidad de metano emitido directamente a la atmósfera en la fase de degradación (figura 4.2).

El escenario 2 capta el 100% del biogás generado por el relleno y por ende no existe emisiones de CH₄ a la atmósfera, y el impacto derivado del consumo de combustible es asumido por el producto evitado relacionado a la generación de energía eléctrica.

El impacto respecto a la emisión de dióxido de carbono CO₂ en las fases de degradación, generación e incineración es cero ya que se trata de CO₂ biogénico.

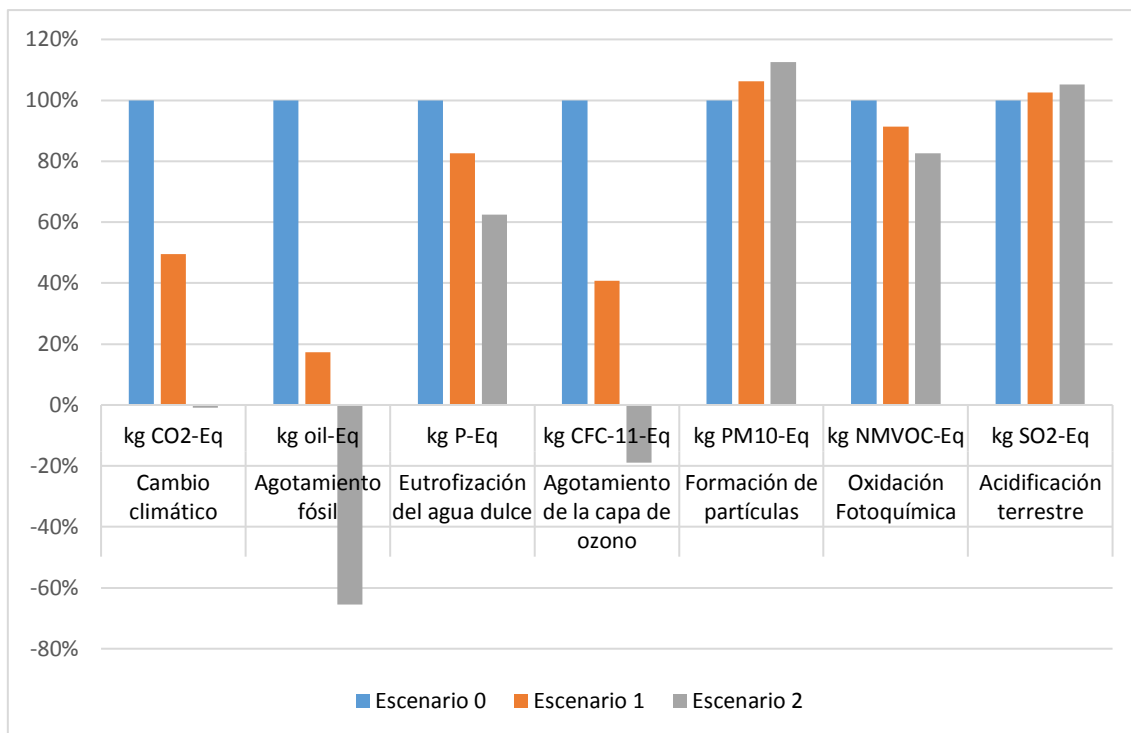


Figura 4.1 Resultados de ACV normalizados en base a Escenario 0.

FU: 1 ton RSM colocados en el relleno sanitario.

La categoría de formación de partículas evidenció un ligero aumento en el valor del impacto en los escenarios 1 y 2, por lo que no representa un cambio notable (figura 4.1), esto debido a que esta categoría está ligada a las emisiones de partículas durante la combustión, en este caso mayoritariamente a la del diésel (86% caso actual) de la fase de colocación, seguido de las emisiones de la fase de generación (figura 4.2).

En términos de acidificación, el escenario 0, al igual que la categoría de formación de partículas no muestra un aumento considerable, esto se debe a que esta categoría se basa en las emisiones de SO₂, identificadas en la fase de colocación ligada al consumo de diésel (94% caso actual) y en la fase de incineración.

Teniendo en cuenta que el consumo del diésel se mantiene constante en los tres escenarios, la diferencia observada en los escenarios 1 y 2 de las categorías de acidificación y formación de partículas responden a la quema o combustión del biogás respectivamente que aumenta en dichos escenarios.

Basados en el análisis de contribución (figura 4.2) para todas las categorías de impacto (excepto calentamiento global), se observa que el mayor impacto ambiental está asociado a la fase de colocación y recubrimiento debido al consumo de diésel para el funcionamiento de maquinaria pesada.

La fase de generación de energía eléctrica aporta de manera notable a la disminución del impacto ambiental relacionada a las categorías de agotamiento fósil, eutrofización de agua dulce y agotamiento de la capa de ozono.

La categoría de calentamiento global se ve afectada ampliamente por la fase de degradación de relleno sanitario, esto debido a la emisión de metano a la atmósfera.

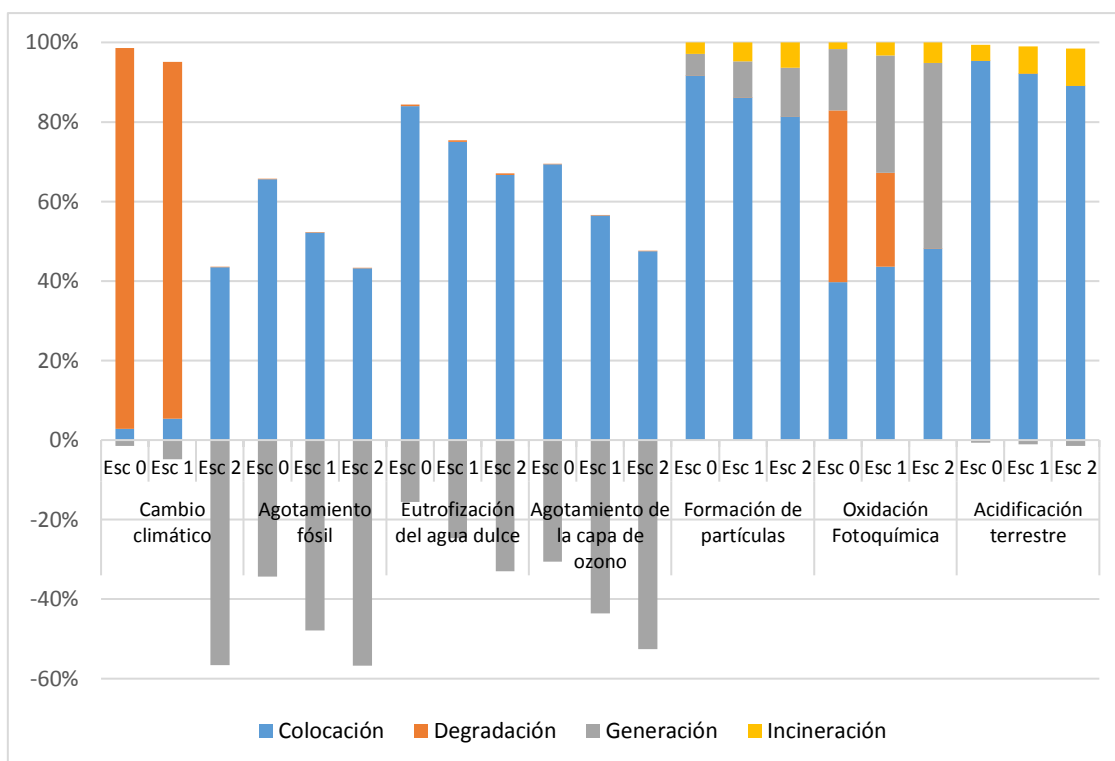


Figura 4.2 Análisis de contribución de cada escenario por categoría de impacto

(Fuente: Autor)

Debido a las emisiones fugitivas en la plataforma del relleno durante toda la vida útil del mismo, es imposible la captación del 100% del biogás generado, por lo que el escenario 2 no representa una situación real, pero es importante su estudio ya que evidencia que a pesar de no tener emisiones libres de metano (siendo el mayor problema ambiental en la gestión de RSM respecto a GWP) se genera impactos ambientales derivados de fases como colocación y recubrimiento, generación e incineración, atribuidos a otras categorías.

Basado en la discusión mostrada en esta sección, y en lo expuesto en el párrafo anterior, el escenario óptimo para replicar es el 1 que representa la captación del 70% del biogás que se genera en el relleno.

4.3 Comparación con estudios similares

Se realizó una comparación de estudios similares respecto a ciertas categorías de impacto de la cual se encontró información precisa en la literatura, estas son: calentamiento global y acidificación. Esto con el fin de tener una visión real de los resultados de este estudio respecto a otros.

Se seleccionó escenarios con caracterización de RSM similar para una mejor comparación.

Tabla 16 Comparación de estudios similares. FU: 1 ton de RSM

Fuente	Escenarios	Calentamiento global kgCo ₂ Eq	Acidificación kg SO ₂ Eq
Este estudio	LFGTE 40% de captación	220.51	5.34E-2
	LFGTE 70% de captación	109	5.48E-2
	LFGTE 100% de captación	-1.95	5.61E-2
(Ziegler-Rodriguez et al. 2019).	RS con tratamiento de gases a través de antorchas. (Lima)	594	4.47E-2
	RS sin tratamiento (Cusco)	1410	5E-2
	Botadero (Nauta)	1380	7.81E-3
(Erses Yay 2015)	A1 RS sin recuperación de energía	512	1.69E-1
	A5 reciclaje, compostaje, incineración y RS	-1.3E-3	-3.27
(Ayodele et al. 2017)	Locación 6 (RS)	812.02	
	Locación 6 (LFGTE)	203.01	
(Mendes, Aramaki, and Hanaki 2004).	LFGTE	900	0.3E-1
	RS sin recuperación de energía	910	0.4E-1
(Zaman 2010).	RS sin recuperación de energía	746.46	2.44E-1
	Incineración y posterior RS	424.40	0.58

(Fuente: Autor)

4.3.1 Calentamiento global

Para estudios que evidenciaron escenarios de rellenos sanitarios sin recuperación de energía, el valor más alto es de 1410 kgCO₂ Eq. por FU (Ziegler-Rodriguez et al. 2019), mientras que el más bajo es de 746.46 kgCO₂ Eq. por FU (Zaman 2010). Se tiene en cuenta que en estos estudios no se realizó ningún tratamiento a los RSM dispuestos en el relleno y que los límites de estos sistemas van desde la colección hasta la disposición final.

Sin embargo, los escenarios con relleno sanitario con tratamientos mixtos de residuos (relleno sanitario, compostaje, reciclaje, incineración, entre otros) tienen valores entre 1259 – 1076 kgCO₂ Eq por FU (Khandelwal et al. 2019; Wang et al. 2020).

Por otro lado, de los rellenos sanitarios con algún tipo de tratamiento para el biogás tenemos el de Lima con 594 kgCO₂ Eq. por FU (Ziegler-Rodriguez et al. 2019), aquí se quema el biogás de relleno sanitario mediante antorchas ubicadas en las plataformas del relleno. Según el autor la existencia de un tratamiento al biogás de relleno reduce en un 58% las emisiones de gases de efecto invernadero.

(Ayodele et al. 2017) en su estudio evalúa diferentes tratamientos (pirolisis, incineración y relleno sanitario con y sin recuperación de energía) para 12 rellenos sanitarios ubicados en Nigeria. Según los autores, el impacto relacionado a relleno sanitario con recuperación de energía se reduce en un 75% al escenario sin recuperación de energía en términos de calentamiento global. En el estudio se recupera energía mediante el uso del biogás como combustible en una turbina, con una eficiencia de captación de 75%, lo que se asemeja al escenario 1 de nuestro estudio.

La locación M6 es la que más se asemeja a nuestro estudio debido a la similitud en la composición de residuos. M6 alcanza los 203.01 kgCO₂ Eq. por FU. En este contexto, hay una diferencia del 50% respecto a nuestro estudio, escenario 1.

Por su parte, el estudio de (Mendes et al. 2004) en Sao Paulo, Brasil, compara 5 escenarios, tres de incineración y dos de relleno sanitario sin recuperación de energía (quema en antorcha) o con recuperación de energía (biogás como combustible en un motor a gas con 30% de eficiencia). Según el autor, la generación de energía a partir de biogás no disminuye considerablemente en la categoría de GWP respecto a la no recuperación, debido a que la electricidad de Brasil se genera principalmente de hidroeléctricas, lo que hace que el impacto evitado no sea significativo. La eficiencia de captación del biogás en ambos casos es del 50%, lo que se asemeja a nuestro escenario 0. Además en ambos estudios se asume que las emisiones son iguales tanto en la quema como en la combustión en el motor.

Respecto al análisis realizado a estudios similares se puede inferir que el motivo de los valores inferiores de este estudio es debido a que no se cuenta con un perfil de gases completo, tanto para el biogás de relleno, como a la salida de la quema o de la combustión.

4.3.2 Acidificación

En cuanto a la categoría de acidificación, la que está asociada a las emisiones de SO₂, al igual que para la categoría de calentamiento global (Mendes et al. 2004) no evidencia una diferencia significativa en los escenarios mostrados en la tabla 14.

(Zaman 2010) por su parte, muestra un aumento del 60% desde su escenario base de relleno sanitario a su escenario de incineración y disposición de cenizas en el relleno sanitario.

Los resultados de este estudio frente a los expuestos en esta comparación respecto a la categoría de acidificación son valores menores, esto puede ser debido a los límites del sistema establecidos, o a que el tratamiento de los lixiviados fue tomado de base de datos. Sin embargo, los resultados de este estudio guardan concordancia con los de (Ziegler-Rodriguez et al. 2019).

4.3.3 Otras categorías de impacto

Respecto a las demás categorías analizadas, los resultados presentados en este estudio difieren en orden de magnitud a los de (Erses Yay 2015; Zaman 2010).

Las diferencias responden a la colección de datos primarios como perfil de gases y tratamiento de lixiviados, los límites de sistema establecidos en cada estudio y zonas climáticas diferentes.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La herramienta de análisis de ciclo de vida representa una estrategia importante en la toma de decisiones respecto a la gestión de residuos sólidos.

Según los resultados de los escenarios de este estudio, mejorar la captación de biogás para generar energía eléctrica reduce el factor de calentamiento global, por lo que, los escenarios 1 y 2 constituyen una mejora en esta categoría.

El escenario 1 ha reducido su valor notablemente respecto a todas las categorías de impacto a excepción de las categorías de formación de partículas y acidificación donde se evidencia un ligero aumento.

Respecto a la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, agotamiento de la capa de ozono y de eutrofización el mayor impacto está relacionado a la fase de colocación y recubrimiento, sin embargo los escenarios 1 y 2 reducen su valor debido a la compensación ambiental que representa la generación de energía.

La categoría de formación de partículas evidenció un ligero aumento en el valor del impacto en los escenarios 1 y 2, por lo que no representa un cambio notable, esto debido a que esta categoría está ligada a las emisiones de partículas durante la combustión, en este caso mayoritariamente a la del diésel (80% de contribución en el caso base).

En términos de acidificación, el escenario 0, al igual que la categoría de formación de partículas no se observa un cambio notable, esto se debe a que esta categoría se basa en las emisiones de SO₂, identificadas mayoritariamente en la fase de colocación (96% caso actual).

Teniendo en cuenta que el consumo del diésel se mantiene constante en los tres escenarios, la diferencia observada en los escenarios 1 y 2 de las categorías de acidificación y formación de partículas responden a la quema y combustión del biogás que aumenta en dichos escenarios.

Por su parte, la categoría de oxidación fotoquímica relacionada a las emisiones de VOC presenta su menor impacto en el escenario cero y el menor en el escenario 2, con una diferencia de 17% lo que representa una ligera mejora.

Basado en la discusión mostrada en la sección de resultados, el escenario óptimo para replicar es el 1 que representa la captación del 70% del biogás que se genera en el relleno.

El escenario 1 ha reducido su valor notablemente respecto a todas las categorías de impacto a excepción de las categorías de formación de partículas y acidificación donde se evidencia un ligero aumento.

Respecto a la comparación de estudios similares, podemos inferir que los escenarios propuestos en este estudio figuran como una mejora a reducir los impactos ambientales relacionados a la categoría de calentamiento global, esto debido a que la energía proveniente de este proceso representa un aporte significativo ya que, en Ecuador la

energía eléctrica proviene tanto de recursos renovables, como no renovables (combustibles fósiles).

La implementación de sistemas de tratamiento previo a la disposición final como compostaje, reciclaje y recuperación de materiales, reducirá la cantidad de residuos que ingresan al relleno, evitando las emisiones derivadas de la formación de biogás. A su vez, la recuperación de materiales figuraría como producto evitado que se evidencia como una compensación ambiental por los impactos generados.

5.2 Recomendación

Se recomienda hacer mediciones periódicas de los gases de la quema libre del biogás y de combustión del motor. Registrar el perfil de gases junto con el flujo medido.

Se recomienda realizar un análisis completo de la composición del biogás de relleno incluyendo todas las trazas de gases.

Realizar el tratamiento de lixiviados dentro de las instalaciones del relleno.

Aumentar la capacidad de la planta de biogás para poder captar la cantidad de biogás planteada en el escenario 1 (captación del 70%).

Se recomienda en futuros estudios ampliar los límites del sistema para que incluya la recolección y el transporte hacia el relleno sanitario.

Además evaluar escenarios con diferentes tipos de tratamiento previo (reciclaje, compostaje) a la disposición final en el relleno sanitario.

Incentivar a la ciudadanía a hacer separación en la fuente, y recuperación de materiales para una segunda vida útil.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, Conto, Oswaldo Andrés, Tipan Lozano, and Darwin Javier. 2018. "Evaluación Del Comportamiento Hidráulico de Los Lixiviados de La Fase Norte I Del Relleno Sanitario de Cuenca." Univesidad del Azuay, Cuenca.
- Argüello, Jenny, Christian Cando, David Salazar, and María Isabel García. 2020. *Boletín Técnico; Gestión de Residuos Sólidos 2019*.
- Argüello, Jenny, David Salazar, and Markus Nabernegg. 2018. *Boletín Técnico; Gestión de Residuos Sólidos 2017*.
- Ayodele, T. R., A. S. O. Ogunjuyigbe, and M. A. Alao. 2017. "Life Cycle Assessment of Waste-to-Energy (WtE) Technologies for Electricity Generation Using Municipal Solid Waste in Nigeria." *Applied Energy* 201:200–218.
- Badurek, Christopher A. 2020. "Biogas." *Encyclopedia Britannica*. Retrieved March 1, 2021 (<https://www.britannica.com/technology/biogas>).
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. 2019. "Sanitary Landfill." *Encyclopedia Britannica*. Retrieved March 1, 2021 (<https://www.britannica.com/technology/sanitary-landfill>).
- Cal Recycle. 2019. "Closure/Postclosure of Disposal Sites." Retrieved March 9, 2021 (<https://www.calrecycle.ca.gov/swfacilities/closure>).
- Cando, Christian, David Salazar, and Sebastián Carbajal. 2020. *Boletín Técnico; Gestión de Residuos Sólidos 2018*.
- Cherubini, Francesco, Silvia Bargigli, and Sergio Ulgiati. 2009. "Life Cycle Assessment (LCA) of Waste Management Strategies: Landfilling, Sorting Plant and Incineration." *Energy* 34(12):2116–23.
- Chicaiza, Cristhian, Vanessa Pamela Navarrete Villa, Christian Camacho, and Angel Chicaiza. 2020. "Evaluation of Municipal Solid Waste Management System of Quito - Ecuador through Life Cycle Assessment Approach." *LALCA- Revista Latino Americana Em Avaliação Do Ciclo de Vida* v. 4 (2020:13).
- CNC. 2019. *INFORME SOBRE MAPEO DE ACTORES GENERADORES DE INFORMACIÓN A NIVEL TERRITORIAL E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE INFORMACIÓN DE LA COMPETENCIA DE DESECHOS SÓLIDOS*.
- Defra. 2011. *Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors*. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- Department for Business, Energy & Industrial Strategy. 2020. *Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2019* - .
- Eastern Research Group and Carbon Trade. 2007. *Estudio de Prefactibilidad Del Potencial Del Biogás : Relleno Las Iguanas Guayaqui, Ecuador*. Cuenca.
- EBE. 2012. "Quienes Somos." Retrieved March 2, 2021 (<http://www.ebe.com.ec/portal/index.php/features>).
- EBE. 2015. "Proyecto de Generación de Electricidad-Relleno Sanitario Pichacay." Retrieved March 8, 2021 (<http://www.ebe.com.ec/portal/index.php>).
- EMAC. 2014. "Relleno Sanitario de Pichacay." Retrieved May 2, 2020 (<https://www.emac.gob.ec/?q=content/relleno-sanitario-de-pichacay>).

- EMAC. 2019a. "Desechos Infecciosos." Retrieved February 18, 2021 (<https://emac.gob.ec/servicios/desechos-infecciosos/>).
- EMAC. 2019b. "Reciclaje." Retrieved March 7, 2021 (<https://emac.gob.ec/servicios/reciclaje/>).
- EMAC. 2020. "Rendicion-de-Cuentas-2019 EMAC." *EMAC EP*. Retrieved March 1, 2021 (https://drive.google.com/file/d/1BFYICcJGpMaRcne_u7NTetqY8-CXybcZ/view).
- EMAC EP. n.d. "EMAC EP."
- Erses Yay, A. Suna. 2015. "Application of Life Cycle Assessment (LCA) for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Sakarya." *Journal of Cleaner Production* 94:284–93.
- De Feo, Giovanni, Carmen Ferrara, Cristina Iuliano, and Alberto Grosso. 2016. "LCA of the Collection, Transportation, Treatment and Disposal of Source Separated Municipal Waste: A Southern Italy Case Study." *Sustainability* 8(11):1084.
- Fernando, Francisco, García Rentería, Rubén Alberto, and Agudelo García. 2005. *Determinación de La Emisión de Sustancias Tóxicas Gaseosas En El Relleno Sanitario Curva de Rodas de La Ciudad de Medellín Determination of the Gaseous Emission of Toxic Substances in the "Curva de Rodas" Sanitary Landfill in Medellín*. Antioquía.
- GAD Parroquial Santa Ana. n.d. "GAD Parroquial Santa Ana."
- GMI. 2004. "Global Methane Initiative." Retrieved October 8, 2020 (<https://globalmethane.org/index.aspx>).
- Google Earth. n.d. "Relleno Sanitario Pichacay, Cuenca, Ecuador." Retrieved March 11, 2021 (<https://earth.google.com/web/search/relleno+pichacay/@-2.96549712,-78.92947694,2630.4467207a,1051.01522169d,35y,-147.86920792h,44.99997494t,0r/data=CnsaURJLCiUweDkxY2QxOWRkZGJlY2Q0OGI6MHhkMzYzZmJiMGMyOGMxY2UwGT41qEdkuQfAleccI8yMu1PAKhByZWxsZW5vIHBPY2hhY2F>).
- LA GRANJA. 2006. "Los Rellenos Sanitarios." *Revista de Ciencias de La Vida* 4:2–17.
- Grau, Javier, Terraza Horacio, Rodriguez Velosa, Diana Milena, Rihm Alfredo, and Sturzenegger Germán. 2015. "Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean." *Inter-American Development Bank*. Retrieved March 8, 2021 (<https://publications.iadb.org/en/solid-waste-management-latin-america-and-caribbean>).
- Guascor. 2018. *Gas Engines and Gensets*. Vol. 560.
- Gurjap Singh. 2019. *Calculation of Exhaust Gas Flow Rate in an Internal Combustion Engine*. Pennsylvania.
- Hidalgo-Crespo, J., Jorge Amaya, Freddy Jarvis, Cesar Moreira, T. Crespo-Vaca, G. Zabala-Ortiz, and S. Coello-Pisco. 2019. "Waste-To-Energy Incineration: Evaluation of Energy Potential for Urban Domestic Waste in Guayaquil." *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação* 392–403.
- Hidalgo, José, Jorge Amaya, Freddy Jarvis, and César Moreira. 2019. "Influence of Socio-Economic Factors on Household Solid Waste (HSW) Generation of the City of Guayaquil, Ecuador." *Proceedings of 17 Th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology* (1):24–26.
- INEC. 2010. "Población y Demografía." *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*.

Retrieved March 1, 2021 (<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>).

INEC. 2020. *Boletín Técnico Residuos 2019*.

ISO. 2006a. "ISO 14040:2006(Es), Gestión Ambiental — Análisis Del Ciclo de Vida — Principios y Marco de Referencia." Retrieved October 8, 2020 (<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>).

ISO. 2006b. "ISO 14044:2006(Es), Gestión Ambiental — Análisis Del Ciclo de Vida — Requisitos y Directrices." Retrieved October 8, 2020 (<https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>).

Jutta Hildenbrand, Michael Srocka, and Andreas Ciroth. 2005. "The Idea." *OpenLca*. Retrieved March 3, 2021 (<https://www.openlca.org/the-idea/>).

Kaza, Silpa, Lisa C. Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Van Woerden. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.

Khandelwal, Harshit, Arun Kumar Thalla, Sunil Kumar, and Rakesh Kumar. 2019. "Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management Options for India." *Bioresource Technology* 288:121515.

Liamsanguan, Chalita and Shabbir H. Gheewala. 2008. "LCA: A Decision Support Tool for Environmental Assessment of MSW Management Systems." *Journal of Environmental Management* 87(1):132–38.

Mendes, Mara Regina, Toshiya Aramaki, and Keisuke Hanaki. 2004. "Comparison of the Environmental Impact of Incineration and Landfilling in São Paulo City as Determined by LCA." *Resources, Conservation and Recycling* 41(1):47–63.

Ministerio del ambiente. 2014. "Hitos En La Gestión Integral de Los Residuos Sólidos En Ecuador – Ministerio Del Ambiente y Agua." *Ministerio Del Ambiente y Agua*. Retrieved March 8, 2021 (<https://www.ambiente.gob.ec/hitos-en-la-gestion-integral-de-los-residuos-solidos-en-ecuador/>).

Ministerio del Ambiente. 2003. *Texto Unificado de Legislación Secundaria De Medio Ambiente*.

Ministerio del Ambiente. 2010. *Programa Nacional Para La Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS)*.

Ministerio del Ambiente. 2014. "Programa 'PNGIDS' Ecuador." *Ministerio Del Ambiente y Agua*. Retrieved October 10, 2020 (<https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>).

Ministerio del Ambiente. 2015. *Acuerdo 140*. Quito.

Ministry of Housing, Communities & Local Government. 2020. "Environmental Impact Assessment." *GOV.UK*. Retrieved March 8, 2021 (<https://www.gov.uk/guidance/environmental-impact-assessment>).

Ministerio del Ambiente. 2008. *Acuerdo No 121*. Quito: Ministerio del Ambiente.

Muñoz, Edison and Luis Solano. 2018. *Caracterización RS Cuenca 2018.Pdf*.

Narváez C., Ricardo A. 2013. "Potential of Waste-to- Energy Implementation in Ecuador." *International Journal of Energy Engineering* 3:279–86.

Nathanson, J. A. 2020. *Solid-Waste Management*.

- Noor, M. M., Andrew P. Wandel, and Talal Yusaf. 2014. "Air Fuel Ratio Study for Mixture of Biogas and Hydrogen on Mild Combustion." *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 10(1):2144–54.
- Órgano del gobierno del Ecuador. 2017. "Registro Oficial No. 75." Retrieved March 9, 2021 (<https://www.registroficial.gob.ec/index.php/registro-oficial-web/publicaciones/registro-oficial/item/9573-registro-oficial-no-75.html>).
- Petroche, D. M., A. D. Ramírez, C. R. Rodríguez, D. A. Salas, A. J. Boero, and J. Duque-Rivera. 2015. "Life Cycle Assessment of Residential Buildings: A Review of Methodologies." Pp. 217–25 in.
- PVI. 2018. "Altos Costos Hacen Una Tarea Compleja Eliminar Botaderos | ." *Diario El Mercurio*. Retrieved March 1, 2021 (<https://ww2.elmercurio.com.ec/2018/06/14/camino-para-dejar-atras-los-botaderos-ven-largo-en-azuay/>).
- Raghab, Safaa M., Ahmed M. Abd El Meguid, and Hala A. Hegazi. 2013. "Treatment of Leachate from Municipal Solid Waste Landfill." *HBRC Journal* 9(2):187–92.
- Rajaeifar, Mohammad Ali, Meisam Tabatabaei, Hossein Ghanavati, Benyamin Khoshnevisan, and Shahin Rafiee. 2015. "Comparative Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Scenarios in Iran." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51:886–98.
- Ramirez, A. D., A. Boero, B. Rivela, A. M. Melendres, S. Espinoza, and D. A. Salas. 2020. "Life Cycle Methods to Analyze the Environmental Sustainability of Electricity Generation in Ecuador: Is Decarbonization the Right Path?" *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 134:110373.
- Ramirez, Angel D., Beatriz Rivela, Andrea Boero, and Ana M. Melendres. 2019. "Lights and Shadows of the Environmental Impacts of Fossil-Based Electricity Generation Technologies: A Contribution Based on the Ecuadorian Experience." *Energy Policy* 125:467–77.
- Rettenberger, Gerhard. 2018. "Quality of Landfill Gas." Pp. 439–47 in *Solid Waste Landfilling*. Elsevier.
- Revista Cuenca Ilustre. 2013. "El Ecoparque El Valle." Retrieved February 18, 2021 (<http://www.revistacuenca.com/noticias-cuenca/EL-ECOPARQUE-EL-VALLE/60>).
- Rick Leblanc. 2020. "An Introduction to Solid Waste Management." *Sustainable Businesses*. Retrieved March 9, 2021 (<https://www.thebalancesmb.com/an-introduction-to-solid-waste-management-2878102>).
- Rinkesh. 2009. "What Is Solid Waste Management? Sources and Methods of Solid Waste Management - Conserve Energy Future." *Conserve Energy Future*.
- RIVM. 2016. *ReCiPe 2016 v1.1 A Harmonized Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level Report I: Characterization*.
- RIVM Committed to health and sustainability. 2018. "LCIA: The ReCiPe Model." RIVM. Retrieved March 3, 2021 (<https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>).
- Salas, Daniel A., Angel D. Ramirez, Nestor Ulloa, Hacı Baykara, and Andrea J. Boero. 2018. "Life Cycle Assessment of Geopolymer Concrete." *Construction and Building Materials* 190:170–77.
- Salas, Daniel Andrés, Angel Diego Ramirez, Carlos Raúl Rodríguez, Daniel Marx Petroche, Andrea Jael Boero, and Jorge Duque-Rivera. 2016. "Environmental

- Impacts, Life Cycle Assessment and Potential Improvement Measures for Cement Production: A Literature Review.” *Journal of Cleaner Production* 113:114–22.
- Surroop, Dinesh and Romeela Mohee. 2011. “POWER GENERATION FROM LANDFILL GAS.” *2011 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications*.
- Terlecky, P. Michael. 1980. “Sanitary Landfill.” Pp. 227–67 in *Solid Waste Processing and Resource Recovery*. Totowa, NJ: Humana Press.
- The World Bank. 2016. “Trends in Solid Waste Management.” Retrieved March 8, 2021 (https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html).
- U.S. Environmental Protection Agency. 2019. “Basic Information about Landfill Gas.” *US Environmental Protection Agency (EPA)* 1–5.
- UK GOV. 2020. “Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2020.” *Department for Environment Food & Rural Affairs* 1–4.
- US EPA, OAR. 2012. *Global Non-CO2 GHG Emissions: 1990-2030*.
- US EPA, OAR. 2017. “Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015.”
- US EPA, OAR. 2019. “Draft Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2019.”
- US EPA, OLEM. 2018. “Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions.”
- Varshney, C. K. and Arun K. Attri. 1999. “Global Warming Potential of Biogenic Methane.” *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology* 51(3):612–15.
- Wang, Dan, Jun He, Yu Ting Tang, David Higgitt, and Darren Robinson. 2020. “Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in Nottingham, England: Past and Future Perspectives.” *Journal of Cleaner Production* 251:119636.
- Zaman, A. U. 2010. “Comparative Study of Municipal Solid Waste Treatment Technologies Using Life Cycle Assessment Method.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 7(2):225–34.
- Ziegler-Rodriguez, Kurt Eduardo. 2019. “Evaluación Ambiental Por Medio Del Análisis de Ciclo de Vida Del Relleno Sanitario Del Distrito de Nauta, En Loreto.” Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ziegler-Rodriguez, Kurt, María Margallo, Rubén Aldaco, Ian Vázquez-Rowe, and Ramzy Kahhat. 2019. “Transitioning from Open Dumpsters to Landfilling in Peru: Environmental Benefits and Challenges from a Life-Cycle Perspective.” *Journal of Cleaner Production* 229:989–1003.