CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

POSGRADO

Análisis de Incertidumbre, en el Ciclo de Vida de la energía generada mediante biogás.

Tesis que como requisito para la obtención del grado de Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental presenta:

Ing. Enrique Alberto Huerta Reynoso

Director de tesis: Dr. Antonino Pérez Hernández

Director externo: Dra. Ma. Guadalupe Gómez Méndez

Lo que el hombre quiere más que conocimiento, es certeza

Bertrand Russell

DEDICATORIA

El éxito en el desarrollo y formación integral de una persona se logra mediante esfuerzo y dedicación. Sin embargo, el componente más esencial para el éxito es el trabajo en comunidad. El presente trabajo está dedicado a todas aquellas personas que formaron parte vital en el desarrollo de éste trabajo:

A mis padres Enrique Huerta Mendoza y María Estela Reynoso Rodríguez. Gracias por apoyarme siempre en cada paso que doy. Su apoyo me conduce a dar grandes pasos y conseguir mayores logros.

A mis hermanos Daniel y Melissa. Gracias por ser mi compañía durante mi estancia en mis estudios. Saben que un logro mío es un logro para nosotros.

A mi novia Angélica Domínguez Aragón. Tu apoyo, paciencia y cariño fueron vitales en mis estudios. Éste logro es nuestro y esto es apenas un comienzo.

A Antonino Pérez Hernández. Desde el comienzo usted creyó en mis capacidades, éste logro es fruto de ésta confianza y gran apoyo intelectual y espiritual.

A mis compañeros de trabajo y grandes amigos: Héctor Alfredo López Aguilar, Jorge Alberto Gómez, Marco Antonio Merino Rodarte, Karen Jocelyn Miranda Barcenas, Edith Solís Gutierrez, Isela Ponce Zúñiga y Pamela Ivonne Burrola Muñoz. Su apoyo en el aporte intelectual de éste trabajo es muy valioso, pero lo es más su amistad.

RESUMEN.

La producción de biogás es considerada una tecnología eficiente y amigable al medio ambiente. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) permite caracterizar las emisiones de un producto/sistema, a través de todas las etapas del proceso (de la cuna a la tumba). Debido a la necesidad de caracterizar múltiples entradas y salidas, es importante considerar la incertidumbre. El objetivo del estudio fue caracterizar los impactos potenciales de la generación de energía mediante biogás de excreta bovina lechera. Para determinar la incertidumbre de las categorías de impacto se utilizó la simulación Monte Carlo. Se tomó la producción de una hora de energía como unidad funcional. Se realizaron mediciones *in situ* de las emisiones al agua mediante diferentes métodos. Las categorías de impacto seleccionadas fueron tomadas de la base de datos ReCiPe midpoint. Los resultados muestran una clara influencia de la infraestructura en todas las categorías de impacto. Las categorías de *Cambio climático* y *Toxicidad humana* tienen un efecto considerable por parte de mediciones. La incertidumbre en *Cambio climático* aumentó al considerar las mediciones de emisiones al aire (la desviación estándar aumenta de 0.603 a 2.538 kg CO_2 eq). La incertidumbre en *Toxicidad humana* tiene también un efecto por parte de las emisiones al agua. La desviación estándar en ésta categoría aumenta de 4.17 a 3.13 kg 1,4 DB eq. Los resultados del estudio concluyen en la importancia y necesidad de utilizar herramientas de incertidumbre en el ciclo de vida. Esto con el propósito de considerar la incertidumbre por las variaciones del proceso y medición. Se encontró que la incertidumbre es mayor en las emisiones al agua que en las emisiones al aire. Esto debido a que el proceso de Digestión anaerobia es un proceso poco controlado, además de la incertidumbre por errores en la medición.

Contenido

FIGURAS vi
TABLAS vii
1 Introducción. 1-1
2 Antecedentes. 2-4
2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV). 2-9
3 Hipótesis 3-16
4 Objetivos 4-17
4.1 Objetivo general. 4-17
4.2 Objetivos específicos. 4-17
5 Metodología. 5-18
5.1 Marco de referencia del ACV 5-18
5.2 Definición de objetivos y alcances. 5-19
5.3 Desarrollo de Inventario del Ciclo de Vida (ICV). 5-20
5.3.1 Descripción de la etapa de producción de biogás. 5-21
5.3.2 Métodos de colección de datos. 5-25
5.3.3 Caracterización del efluente. 5-27
5.3.4 Caracterización de emisiones al aire (gases de combustión). 5-28
5.4 Categorías de impacto para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida 5-31
5.5 Consideraciones para el análisis de incertidumbre. 5-32
5.6 Interpretación. 5-32
6 Resultados. 6-33
6.1 Análisis de emisiones al agua. 6-33
6.2 Análisis de emisiones al aire. 6-35
6.3 Inventario del Ciclo de Vida (ICV). 6-36
6.3.1 Infraestructura de los establos. 6-36
6.3.2 Infraestructura de la planta generadora. 6-38
6.3.3 Recolección de excreta. 6-39
6.3.4 Producción de biogás. 6-40
6.3.5 Generación de energía eléctrica. 6-41
6.4 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida 6-42
6.5 Análisis de Incertidumbre. 6-45

6.5.1 Dispersión de la incertidumbre en emisiones al aire. 6-47
6.5.2 Dispersión de la incertidumbre en emisiones al agua. 6-51
7 Discusión. 7-58
7.1 Identificación de etapas del sistema. 7-58
7.2 Caracterización de emisiones. 7-59
7.2.1 Emisiones al aire. 7-59
7.2.2 Emisiones al agua. 7-60
7.3 Relación ICV, EICV e incertidumbre 7-60
8 Conclusión. 8-66
9 Referencias. 9-69
ANEXO I ..... a
ANEXO II ..... e
ANEXO III ..... j
ANEXO IV ..... k
10 AGRADECIMIENTOS. l

FIGURAS

Figura 1. Etapas en la digestión anaerobia (de Lemos Chernicharo, 2007). 2-6
Figura 2. Selección de puntos aleatorios sobre una superficie delimitada, a fin de calcular el área de la figura. Ejemplo para comprender el método Monte Carlo..... 2-12
Figura 3. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida..... 5-18
Figura 4. Vista satelital del "Establo Los Arados" en Meoqui, Chihuahua, México (Google Earth Engine, 2012)..... 5-19
Figura 5. Límites del sistema en el ICV. 5-21
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de Pre-tratamiento de excreta. 5-22
Figura 7. Diagrama de flujo de la etapa de biodigestión. 5-23
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de separación de sustancias no deseadas en el biogás. 5-24
Figura 9. Turbina Capstone C30, utilizada en el "Establo Los Arados". 5-25
Figura 10. Dispositivo de muestreo de gases de combustión en la turbina. 5-27
Figura 11. Colocación del dispositivo de muestreo en la chimenea..... 5-29
Figura 12. Plano del "Establo Los Arados"..... 6-37
Figura 13. Contribución para cada categoría de impacto. 6-44
Figura 14. Margen de error en porcentaje de las categorías. 6-46
Figura 15. Dispersión de incertidumbre de *Cambio climático* en (a) generación de energía mediante biogás utilizando mediciones *in situ* y (b) generación de energía mediante biogás utilizando parámetros de literatura. 6-48
Figura 16. Dispersión de incertidumbre en la categoría de *Formación de oxidantes fotoquímicos*. 6-49
Figura 17. Dispersión de incertidumbre en la categoría de Formación de partículas. 6-50
Figura 18. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Acidificación terrestre. 6-51
Figura 19. Dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Agotamiento de la capa de ozono*. 6-52
Figura 20. Dispersión de incertidumbre de *Eutrofización del agua*..... 6-53
Figura 21. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Ecotoxicidad del agua..... 6-54
Figura 22. Dispersión de incertidumbre en la categoría de *Ecotoxicidad terrestre*. 6-55
Figura 23. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Agotamiento del agua..... 6-55
Figura 24. Dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Toxicidad humana* (a) considerando parámetros de dispersión obtenidos de mediciones *in situ* y (b) considerando parámetros de dispersión considerando solo parámetros de dispersión obtenidos de literatura. 6-57
Figura 25. Dispersión de incertidumbre de la emisión de CO_2 en la generación de energía mediante incineración de residuos (Sonnemann et al., 2003). 7-63
Figura 26. Dispersión de incertidumbre en la emisión de metales pesados de la generación de energía mediante incineración de residuos (Sonnemann et al., 2003)..... 7-65
Figura 27. Dispersión de incertidumbre en la emisión de arsénico en la generación de energía mediante incineración de residuos(Sonnemann et al., 2003). 7-65

TABLAS

Tabla 5.1. Parámetros considerados en el inventario por proceso Unitario. 5-26

Tabla 5.2. Categorías de impacto utilizadas en el presente estudio. 5-31

Tabla 6.1. Análisis de elementos para el agua utilizada en el digestor anaerobio..... 6-33

Tabla 6.2.Análisis de elementos en el efluente a la salida del digestor..... 6-34

Tabla 6.3. Concentración de gases obtenida mediante cromatografía. 6-35

Tabla 6.4. Emisión de contaminantes en base a los parámetros..... 6-36

Tabla 6.5. Resultados de entradas y salidas de la infraestructura de los establos. 6-38

Tabla 6.6. Resultados de entradas y salidas de la infraestructura de la planta de energía eléctrica mediante biogás. 6-39

Tabla 6.7. Resultados de entradas y salidas de la recolección de excreta. 6-40

Tabla 6.8. Resultados de entradas y salidas de la producción de biogás..... 6-41

Tabla 6.9. Resultados de entradas y salidas de la generación de energía eléctrica. 6-42

Tabla 6.10. EICV de la generación de energía mediante biogás..... 6-43

1 Introducción.

La energía es un componente esencial para el desarrollo y prosperidad. Además es un elemento clave en temas de economía, globalización, e incluso conflictos internacionales. Månsson (2014) menciona la relación entre sector energético de un país y la adaptación a cambios, como la degradación ambiental y el aumento en el precio de alimentos. Esta adaptación no se desenvuelve en forma aislada, sino en un contexto político, económico y social. Como consecuencia, el tema energético ha incrementado su presencia, en relaciones y dependencias internacionales. Como lo afirma Overland (2016), la energía es un factor sensible en la globalización. Por lo cual, la energía es un factor vital en la toma de decisiones.

El desarrollo y el crecimiento social en la actualidad, dependen en gran medida a energías no renovables. Ésta dependencia conlleva varias desventajas. Las energías no renovables, se asocian directamente con *Cambio Climático* (Bansal, et al., 2013). Se sabe que la concentración de CO_2 en la atmósfera ha aumentado de 280 a 380 ppmv[1] del período pre-industrial al año 2005 (Burroughs, 2007). Dicho período se relaciona también con el aumento en la demanda de energía. Otra desventaja es el agotamiento de los recursos. El petróleo, por ejemplo, demanda cada vez mayor inversión por menos producto. Según reportes del gobierno de México, la inversión en extracción y exploración de petróleo, ha aumentado un 140% entre el período 2004-2012; sin embargo, se obtiene un 30% menos de la producción diaria que se percibía inicialmente (Republic, 2013). En general, el cambio climático y el agotamiento de recursos son temas de gran importancia en la actualidad (Hosseini, et al., 2013). Conjuntamente, existe una incertidumbre sobre futuros acontecimientos, como la crisis del petróleo de Medio Oriente en los años sesenta

[1] ppmv: partes por millón volumen.

(Marques, et al., 2016). Este panorama, ofrece incentivos y hace cada vez más atractiva la inversión económica, científica y tecnológica en el uso de energías alternativas y renovables.

Los avances de investigación y la implementación de Energías Renovables (ER), tiene su auge en las últimas décadas. De acuerdo al estudio de Strantzali & Aravossis (2016), el ~70% de los trabajos de investigación en materia de energía del período 2005-2014, se orientan a aprovechar fuentes como biomasa, hidroeléctrica, eólica, solar y geotérmica. En cambio, durante el período 1983-1994, el 60% de los estudios se orientan únicamente a energía solar e hidroeléctrica (con un menor número de estudios). La implementación de ER a gran escala, también presenta un crecimiento a nivel mundial, de acuerdo a reportes de IRENA (2017), para el año 2016, se produjo ~1.0E+6 MW más de fuentes renovables que hace 10 años. Por otra parte, la Unión Europea percibió en el año 2013, una producción de energía primaria de 7.90E+8 toneladas de petróleo equivalente, de la cual el 24.3% corresponde a ER, (Pacesila, Burcea, & Colesca, 2016). Aunque las ER corresponden a menos de la mitad de la energía total, éstas tienen un impacto considerable en las etapas de investigación y desarrollo.

Para el caso de países en vías de desarrollo, es necesaria una mayor inversión en ER. Países latinoamericanos como Barbados, Bahamas, Trinidad Tobago y Belice, tienen pocos avances en materia de ER (IRENA, 2017). En México, la implementación de ER representa un reto con relación a los compromisos internacionales y prospectivos que el país tiene. De acuerdo a la Estrategia Nacional de Energía 2012-2026, se establece como meta una participación de energías limpias del 35% de la generación total (SENER, 2012). Sin embargo, México reporta para el año 2013, una producción de energía primaria del

3.3% proveniente de fuentes renovables (SENER, 2015). Lo cual denota la necesidad de ampliar inversiones en la implementación de energías renovables para el país.

Actualmente se conoce una gran variedad de potenciales fuentes renovables de energía. Su aprovechamiento, depende de su acceso y capacidad de transformación. La energía obtenida a partir de fuentes como la madera, residuos de cultivos, incluso algunos residuos municipales e industriales, se le denomina energía a partir de biomasa (Cleveland & Morris, 2009). La energía a partir de biomasa es ampliamente utilizada para calentamiento y cocción (Field, Campbell, & Lobell, 2008) y es una de las ER más antiguas.

La biomasa puede ser aprovechada de varias formas. Según el tipo de proceso y aplicación, los procesos se pueden clasificar en físicos, termo-químicos y biológicos. Mediante el aprovechamiento de la biomasa, se pueden obtener fuentes de energía como hidrógeno, etanol, metanol y metano, para su transformación en energía mecánica y electricidad. El aprovechamiento de la biomasa es muy amplio, por tanto, se pueden presentar algunas ventajas. Una sobreexplotación de biomasa puede comprometer áreas naturales; ya que puede surgir la creación de monocultivos para fines de energía, a fin de satisfacer la demanda (Peter, et al., 2016). Sin embargo, con una buena administración de recursos, la energía a partir de biomasa puede ser una provechosa fuente de ER.

2 Antecedentes.

El desarrollo de tecnologías orientadas al aprovechamiento de la materia orgánica, toma importancia desde la segunda mitad de siglo XX. En India, a comienzos de los años 60, se impulsó la tecnología de producción de biogás mediante estiércol bovino, con el doble propósito del aprovechamiento energético y la obtención de biofertilizantes. En China desde la década de los 70, se ha fomentado la construcción de digestores mediante programas de ámbito nacional. En otros países, la tecnología de biodigestión ha respondido más a motivaciones medioambientales que puramente energéticas. Los métodos para la generación de energía a partir de la biomasa, también se constituye como un método clásico de estabilización de lodos activos de las plantas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias (Lewandowski, Co-investigator, & Lewandowski, 2015). Por tanto, el aprovechamiento de biomasa no es una actividad estrictamente nueva, pero sí su denominación de energía renovable.

Se han publicado estudios relacionados al uso de la biomasa como sustituta y/o complemento de combustibles fósiles. Cortes-Rodríguez, et al. (2016), realizaron un análisis termodinámico de eficiencia experimental en calderas de bagazo de caña de azúcar. En el concluyeron que la humedad, la generación de agua en él y las pérdidas de calor en los gases de salida, son los factores más influyentes del sistema. De & Panua (2014) realizaron un estudio comparativo del desempeño y emisiones generadas en mezclas de diesel y aceite de jatropha[2]. Los autores reportan que el combustible diesel con una mezcla

[2] La Jatropha es un arbusto tropical y sub-tropical que recientemente ha adquirido especial atención para la potencial producción de biodiesel (McKeon, Hayes, Hildebrand, & Weselake, 2016)

de 30% en volumen de jatropha, puede ser utilizado en motores tipo VCR[3] sin necesidad de modificaciones. Otro estudio comparativo entre combustibles fue el realizado por Marques, et al. (2016), utilizando mezclas de etanol comercial, con 4% de agua, y una mezcla de gasolina-etanol (78 y 22% respectivamente). El estudio concluye: que una mezcla con 22% de etanol tiene un mayor rendimiento en el motor, respecto a mezclas de 96% o más. También Das & Sharma (2016), llevaron a cabo un estudio experimental de caracterización de mezclas de combustible. El estudio consideró el biodiesel de aceite de palma y el aceite de pirolisis de neumáticos, como potenciales combustibles. Éste tipo de investigaciones, permiten desarrollar combustibles de fuentes renovables, que sean competitivos en comparación a fuentes tradicionales.

Uno de los productos derivados de la biomasa más conocido es el biogás. Éste subproducto es obtenido mediante degradación bacteriana (Gomez, 2013), comúnmente denominado Digestión Anaerobia (DA). De éste proceso se pueden obtener dos productos: el biogás que se utiliza como fuente de energía; y el digestato, que es la materia orgánica residual, que puede utilizarse como fertilizante.

La DA, consiste en etapas ligadas, en donde la composición del material inicial es continuamente separada en unidades más pequeñas (Seadi et al., 2008). La DA se divide en dos fases, las cuales se pueden desglosar en varias rutas. La Figura 1 muestra las etapas que se llevan a cabo en la DA, para la transformación de la materia orgánica a biogás (de Lemos Chernicharo, 2007).

A pesar de la complejidad en los mecanismos de reacción, y la diversidad de en el consorcio microbiano, son pocos los parámetros de control. Éste proceso se rige por los

[3] VCR: Variable Compression Ratio. Tecnología que ajusta la relación de compresión a un motor de combustión interna.

siguientes parámetros (Seadi et al., 2008): Carga orgánica, temperatura, pH, ácidos grasos volátiles, amoniaco, macronutrientes, micronutrientes y compuestos tóxicos. La DA usualmente se lleva a cabo en tres rangos de temperatura: (i) condiciones termofílicas (55-60°C), (ii) mesofílicas (35-40°C) y (iii) psicrofílicas (<20°C). Las temperaturas tienen un efecto en la composición del biogás (Murphy & Thansiriroj, 2013).

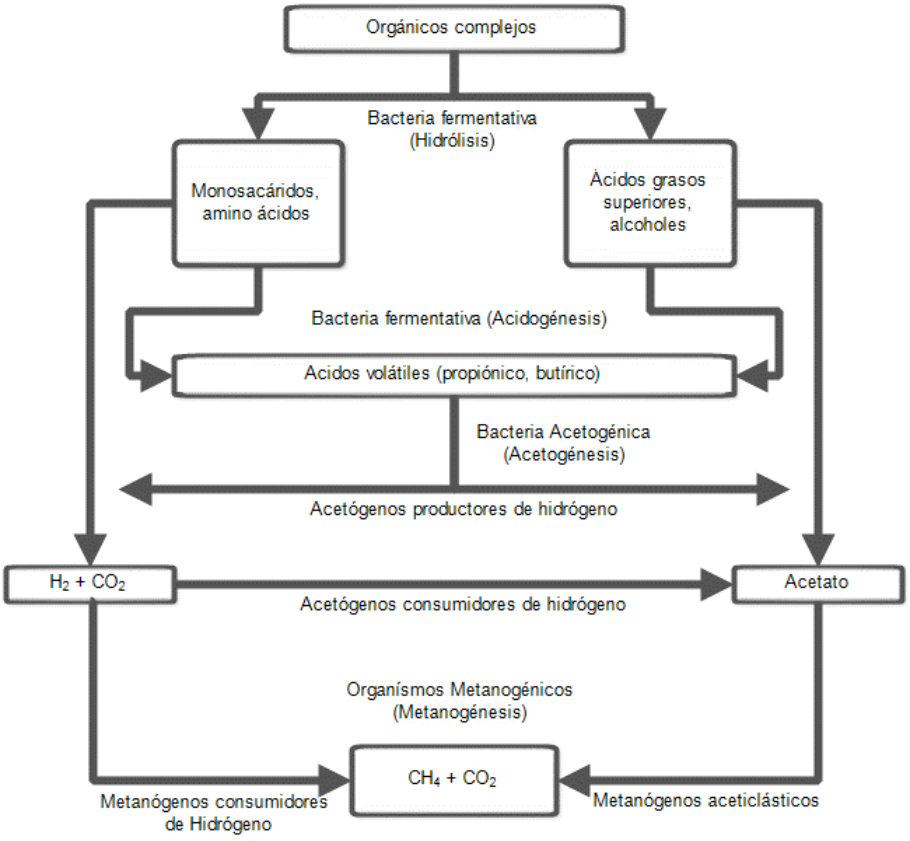

Figura 1. Etapas en la digestión anaerobia (de Lemos Chernicharo, 2007).

El biogás se puede obtener de una gran variedad de sustratos. Las materias primas se pueden clasificar según su origen (RUTZ & JANSSEN, 2013):

- Sector agricultor y ganadero. Se pueden obtener grandes cantidades de sustrato de las actividades agrícolas y pecuarias. El sector ganadero contribuye un 18% a la emisión de

gases de efecto invernadero, producto de 13 billones de toneladas de excreta animal y lodos. Asimismo, los residuos de cultivo pueden ser utilizados para la producción de biogás, usualmente, como complemento en la DA de excreta animal. Otra fuente son los cultivos energéticos, los cuales están especialmente dedicados a la producción de energía.

- Sector industrial. Diversos bienes a gran escala, manejan considerables cantidades de subproductos derivados de biomasa. Algunas de ellas son la industrias alimenticias, como procesamiento de pescado, lácteos, azúcar, o residuos de rastros. Otros sustratos son generados por industrias como la del almidón, farmacéuticos, bioquímicos y cosméticos o papeleras.
- Residuos municipales. La creciente urbanización demanda un adecuado manejo de residuos. La separación de residuos orgánicos es una solución capaz de proveer sustratos de alta calidad para DA. Éstos residuos, son usualmente utilizados como sustratos junto con excretas animales en plantas de DA.

Los estudios de biogás obtenido mediante DA, se han orientado a evaluar la composición de diferentes sustratos. Fantozzi & Buratti (2011), concluyen que la DA es factible en residuos orgánicos municipales, siempre y cuando se inocule el sustrato. Basset, et al. (2012), analiza la aplicación de DA en la industria del vino, utilizando un bioreactor anaerobio de membrana. Sus estudios concluyen que el biogás producido puede cubrir los requerimientos energéticos durante el período de vendimia, cuando la carga de biomasa es alta. Otro estudio enfocado al método de digestión del sustrato es el de Rajagopal, et al. (2017). En él se analiza el potencial de biodegradación de residuos orgánicos alimenticios, con un sistema de DA psicrofílica, en un reactor secuencial por lotes. Los estudios

validaron la robustez de éste sistema, el cual puede utilizarse en lugares fríos, donde es difícil alcanzar las temperaturas mesofílicas comúnmente usadas. El uso de microorganismos anaerobios para degradación, permite aprovechar residuos orgánicos de diferente origen, para la generación de productos de valor.

Diversos estudios consideran el biogás como una opción viable para la generación de energía. Ledda et al. (2016), concluyeron que la digestión anaerobia es una alternativa factible para producir energía eléctrica, así como digestato para uso como fertilizante, en la degradación de residuos orgánicos provenientes de ganado bovino. Aguilar-Virgen et al. (2014), realizaron estudios en un relleno sanitario en Ensenada Baja California México, estimando la generación de biogás y su potencial uso como fuente de energía. El estudio mostró una potencial reducción de la emisión de 1, 168,684 toneladas de CO_2 para el período de 2009-2025 en la operación del relleno sanitario. Por otra parte, León & Martín (2016), realizaron una optimización de la generación de energía en un sistema de ciclo combinado impulsado por biogás. Utilizaron formulación matemática y simulación de parámetros de diferentes parámetros de operación. Estudios como éstos, validan la factibilidad del aprovechamiento de biogás para la generación de energía.

La producción de energía mediante biogás forma parte importante dentro de las proyecciones futuras a nivel mundial. En el año 2013, la generación de biogás representaba el 1.2% de la producción anual de energía, y se espera una tasa de crecimiento del 7.2% hacia el 2015 (Maghanaki, et al., 2013). En México, el potencial de generación de energía mediante biogás, se encuentra entre los 652 y 912 MW, y actualmente está considerado como parte importante dentro de las prospectivas de energías renovables (Republic, 2013). El aprovechamiento de recursos renovables, necesitan ser desarrollado a un ritmo de crecimiento acelerado. Éste desarrollo debe orientarse a satisfacer la demanda energética

global (Hijazi, et al., 2016). Su implementación también debe ser acertada, orientándose hacia una sostenibilidad (Viktoria, 2016). Una metodología aplicable para éste enfoque, es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Actualmente el ACV se ha aplicado a diversos sistemas de energía. Pehnt (2006) realizó un estudio dinámico de ACV para el desempeño ambiental de ER, proyectando el desarrollo futuro en Alemania. Se concluye que para un futuro, el 20% de los impactos ambientales relevantes provendrán de ER. También mencionan que es difícil comparar tecnologías de ER; pues depende de factores como la localización geográfica, la configuración de la energía examinada y el tipo de fuente de energía. Otro estudio similar fue realizado por García-Gusano et al. (2016), quienes integraron el modelo TIMES[4], en sinergia con ACV, a fin de estimar la carga ambiental de la generación de energía eléctrica en Noruega en los próximos años. El estudio concluye que el mayor impacto se encuentra ligado en la instalación de nuevas turbinas eólicas en el período 2014-2035 en ese país. Es por eso que, para el presente estudio se considera el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como una metodología aplicable para conocer los impactos potenciales asociados con la producción y el aprovechamiento de biogás.

2.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

A lo largo del ciclo de vida de un producto, se ven involucradas etapas consecutivas. Éstas se ligan a un sistema que comprende, desde la adquisición y/o generación de materias primas, hasta su disposición final. El ACV es una compilación de

[4] El Sistema Integrado de MARKAL-EFOM (TIMES por sus siglas en ingles), es un generador de modelos económicos para sistemas de energía a nivel local, nacional, multi-regional o global, el cual provee una base tecnológica para representar la dinámica de la energía a diferentes períodos de tiempo (Loulou, 2016).

entradas y salidas del ciclo de vida de un sistema-producto, la cual es caracterizada a impactos potenciales (Flyn, 2009). Esta metodología se orienta a minimizar la generación de emisiones, previniendo su generación o evitando su emisión al medio ambiente (Franchetti, 2009). Un estudio de ACV tiene dos objetivos: (i) Analizar los impactos ambientales a lo largo de la vida de un producto e; (ii) influir a responsables políticos y tomadores de decisiones en el desarrollo de proyectos y mejoras (Rehl, et al., 2012). El ACV se puede aplicar a una gran variedad de sistemas y procesos.

Actualmente la literatura disponible relacionada al ACV es amplia (Blanco, et al., 2015; Guinée et al., 2001; ILCD, 2010; Masoni, 2016; Testa, et al., & Daddi, 2016), y se ha diversificado a una gran variedad de procesos. Amienyo & Azapagic (2016), elaboraron un estudio de emisiones y costos, en la producción y consumo de cerveza. Hossain, et. al (2015) evaluaron la factibilidad ambiental de eco-blocs hechos de hormigón, desde un enfoque ACV. Otro estudio en el sector de la construcción es el de López-Aguilar et al., (2016). El estudio se orientó a ladrillos hechos con material regional, aplicando la metodología de ACV. Otros estudios han complementado la perspectiva del ciclo de vida, orientándose a enfoques más allá del económico y/o tecnológico. Arcese, et. al (2016), presenta una revisión bibliográfica de los estudios de Análisis de Ciclo de Vida Social, llevados a cabo en el período 2006-2014. Balanay & Halog (2016), realizó una revisión de estudios orientada a promover la “Perspectiva del Ciclo de Vida” al sector de la minería en Filipinas.

Actualmente, el ACV se ha aplicado tanto a procesos de DA, como generación de energía mediante biogás. Harder, et al., (2015) realizaron un estudio de lodos de una planta de tratamiento de agua e integraron un análisis de riesgo microbiano cuantitativo en los resultados del ACV. El estudio sugiere diferenciar la exposición de agentes patógenos, con

exposición a sustancias que son consideradas en un ACV. Dressler, et al., (2012) y Van Stappen et al., (2016), realizaron ACV de la producción de biogás. Ambos estudios concluyen en la importancia de realizar inventarios regionales para su aplicación, tanto en la toma de decisiones, como en análisis generales. En China, Xu, et al. (2015), concluyeron que consumo eléctrico y el transporte de las materias primas representan la mayor parte de carga ambiental en la generación de biogás de residuos alimenticios. Por su parte Huttunen, et al. (2014), identificaron que el uso del biogás y el uso final del digestato son los puntos más críticos en la producción de biogás. Hijazi, et al. (2016), analizaron diferentes sistemas de aprovechamiento de biogás en Alemania. Encontraron que desde la perspectiva de ciclo de vida, el tipo de materia prima es un factor determinante en los impactos ambientales. También mencionan que la distribución espacial de la planta y la gestión de los subproductos representan la mayor carga ambiental.

Un factor importante para la mejor aplicación y convergencia con los objetivos del ACV es la incertidumbre (Pfister & Scherer, 2015). Varios autores han tratado la incertidumbre en el ACV. Niero, et al. (2015), propone un enfoque para el manejo de la incertidumbre en producción de cultivos. En base a ésta revisión, sugiere considerar los efectos del cambio climático a través del tiempo, a fin de obtener escenarios más congruentes. Algunos autores han optado por complementar el ACV, utilizando métodos estadísticos y simulación (Laurin et al., 2016; Mendoza Beltran, et al., 2015), un método ya utilizado en éste ámbito es la simulación Monte Carlo.

El método Monte Carlo[5], aparece por primera vez en la publicación hecha por Metropolis & Ulam (1949), Éste trabajo explica cómo se lleva a cabo la metodología, así

[5] El nombre de Monte Carlo, deriva de la ciudad en el principado de Mónaco; la cual es famosa por sus casinos.

como algunas aplicaciones sugeridas en la rama de la física. Monte Carlo es un método numérico para solución de problemas matemáticos mediante variables aleatorias (Sobol, 1994). Para ejemplificar la aplicación de ésta metodología, supongamos que buscamos calcular el área de la Figura 2. La región *S*, corresponde al área de la figura que se desea determinar.

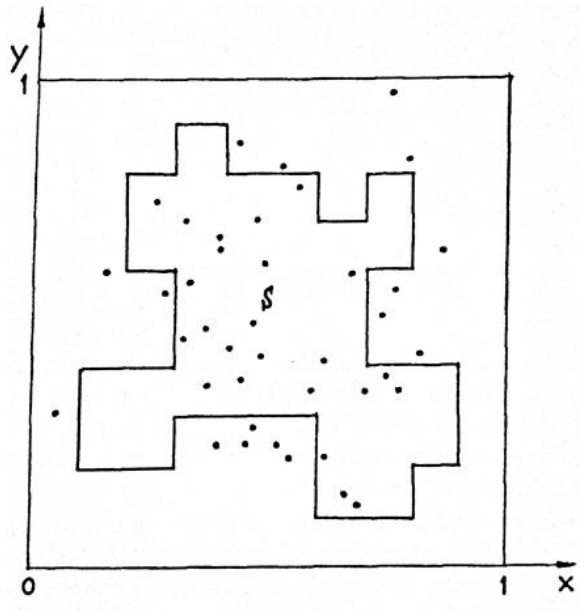

Figura 2. Selección de puntos aleatorios sobre una superficie delimitada, a fin de calcular el área de la figura. Ejemplo para comprender el método Monte Carlo.

Si se eligen aleatoriamente *N* puntos y se designan los puntos *N´* que caen en el área *S*. Es claro que el área es aproximada a la relación *N´/N*. Así mismo, el incremento de puntos aleatorios, aproxima más al área real de la figura. Las aplicaciones de Monte Carlo son más complicadas que el cálculo de un área. Sin embargo, el método de "dar o fallar", permite comprender el esquema general de Monte Carlo (Sobol, 1994).

Supongamos una cantidad desconocida *m* que se desea determinar. Se busca encontrar una variable aleatoria ξ, con una dispersión de probabilidad $M\ \xi=m$. Para encontrar ξ, se consideran *N* variables aleatorias con distribuciones idénticas a ξ. De acuerdo al teorema del límite central, se obtiene la distribución de la siguiente forma:

<u>Ecuación 1</u>

$$\rho_N = \xi_1 + \xi_2 + \cdots + \xi_N = \sum_{j=1}^{N} \xi_j$$

$$a = Nm$$

$$\sigma = b\sqrt{N}$$

Donde a, es la media y σ la desviación estándar de la distribución. El teorema del límite central, establece que la distribución de ρ_N, tiende a ser normal cuando N, tiende a infinito (Dodge, 2008). Es decir, a mayor número de valores aleatorios ξ_N, la distribución tiende a la ser normal.

Al considerar una distribución normal con un número muy grande de N, la probabilidad del 99.7% de los eventos, de ρ_N es acotada. De acuerdo con la regla de los tres sigmas: los eventos se presentan a tres desviaciones estándar arriba y por debajo de su valor medio.

$$P\{a - 3\sigma < \rho_N < a + 3\sigma\} \approx 0.997 \qquad | \quad N \to \infty$$

$$P\left\{Nm - 3b\sqrt{N} < \rho_N < Nm + 3b\sqrt{N}\right\} \approx 0.997$$

Al dividir la inecuación entre N, se obtiene una relación con la misma probabilidad:

$$P\left\{m - \frac{3b}{\sqrt{N}} < \frac{\rho_N}{N} < m + \frac{3b}{\sqrt{N}}\right\} \approx 0.997$$

$$\therefore$$

<u>Ecuación 2</u>

$$P\left\{\left|\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\xi_j - m\right| < \frac{3b}{\sqrt{N}}\right\} \approx 0.997$$

La <u>Ecuación 2</u>, ofrece un método para el cálculo de m, así como la estimación del error (Sobol, 1994). Utilizando la <u>Ecuación 2</u> como esquema general, y el uso de algoritmos para generación variables aleatorias, se constituye el método Monte Carlo. La aplicación de éste método varía desde fenómenos de mecánica cuántica, hasta simulación de escenarios en base a distribuciones de probabilidad.

Existen actualmente estudios en los cuales se incorpora el método Monte Carlo, a los estudios de ACV. Sonnemann, Schuhmacher, & Castells (2003), llevaron a cabo un análisis de incertidumbre en el ACV de la energía producida mediante incineración, utilizando simulación Monte Carlo. Concluyeron que los valores medidos son de mayor importancia en la incertidumbre que los obtenidos de literatura. Clavreul, Guyonnet, & Christensen (2012), desarrollaron un marco de referencia para cuantificar la incertidumbre en el ciclo de vida de sistemas de manejo de residuos. El estudio menciona que la información de un ACV puede ser "rica" cuando existe un número significativo de mediciones, y se proveen datos de distribución de probabilidad; en cambio, puede ser "pobre" cuando se opta por información obtenida de literatura, juicio de expertos o estimaciones.

Debido a que la aplicación del Análisis de Ciclo de Vida en México es relativamente nueva, la disponibilidad de inventarios adecuados para éste país es limitada. Actualmente los inventarios de más fácil acceso, corresponden a países como Finlandia y Suecia, cuyos procesos son muy diferentes a los de Latinoamérica. En consecuencia, se tiene poco registro de la incertidumbre de inventarios y de estudios de ACV en México, por lo que es relevante la colección de información regional actualizada de las actividades más importantes.

La ganadería es una práctica común en el estado de Chihuahua. Ésta actividad, en conjunto con la agricultura, representa el 13.5% del total de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Mathot, et al., 2012). Lo que nos lleva a considerada esta actividad como un importante agente del calentamiento global. Se sabe que un animal rumiante puede producir entre 250 y 500 L de metano al día (Johnson & Johnson, 1995). Ésta cantidad estimaría un máximo de 6.6E+11 kg CO_2 eq al año solo en el estado de

Chihuahua. Una alternativa para mitigar potenciales efectos, es el aprovechamiento de excreta mediante DA. Sin embargo, es necesaria una correcta evaluación desde una perspectiva sostenible. En el presente estudio se aplicará el Análisis de Ciclo de Vida a la producción de energía mediante biogás. Para evaluar la incertidumbre en las categorías, se utilizará el método Monte Carlo, como herramienta de simulación en parámetros de dispersión.

3 Hipótesis

La mayor incertidumbre en el ciclo de vida de la generación de energía mediante biogás, proviene de las emisiones al agua.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general.

Determinar la incertidumbre, mediante herramienta de simulación, en los impactos potenciales del Análisis de Ciclo de Vida en una planta generadora de energía eléctrica mediante biogás de excreta bovina.

4.2 Objetivos específicos.

- Identificación de etapas del sistema: Entradas y salidas.
    - Recolección de excreta empleadas para la generación de biogás.
    - Planta generadora de biogás: pre-tratamiento del sustrato, digestión anaerobia y purificación de biogás.
    - Generación de energía eléctrica.
    - Insumos y emisiones en la planta generadora.
- Caracterización de las emisiones por la combustión del biogás.
- Caracterización de emisiones al agua.
- Desarrollo de Inventarios del Ciclo de Vida, del proceso de generación de energía mediante biogás.
- Análisis de Ciclo de Vida, en base a la norma NMX-SSA-14040-IMNS-2008 (ISO-14040).
- Análisis estadístico aplicando, método Monte Carlo, al caso de estudio.

5 Metodología.

5.1 Marco de referencia del ACV

El ACV se rige internacionalmente por las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006). Actualmente, México cuenta con las normas homólogas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008 (IMNC, 2008). El ACV se compone de cuatro fases (Figura 3):

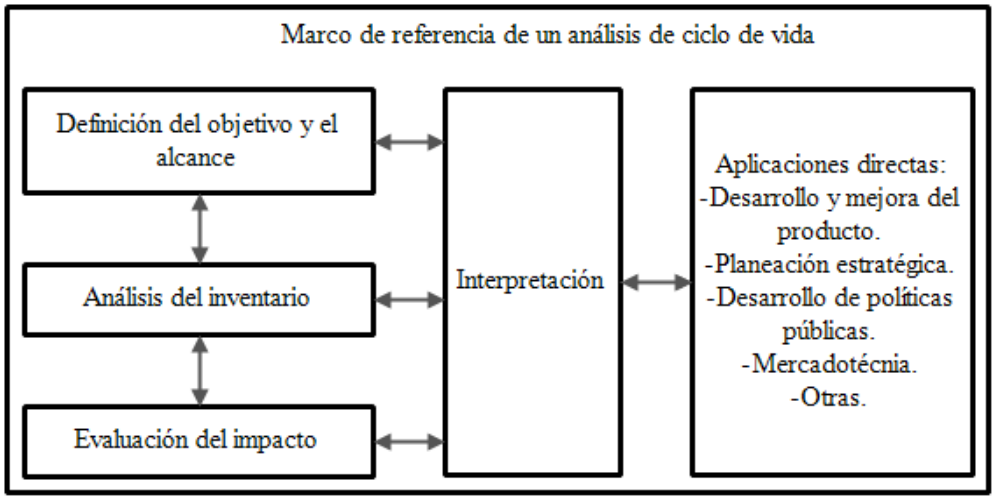

Figura 3. Marco de referencia del Análisis de Ciclo de Vida.

1. **Objetivo y alcances.** Se presenta la aplicación prevista y razón del estudio. Los alcances que delimitan el sistema a estudiar y se define una Unidad Funcional.
2. **Inventario del Ciclo de Vida (ICV)**. Comprende la recopilación de información. En esta etapa se llevan a cabo procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas.
3. **Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**. En ésta etapa se asocia la información colectada en el ICV, con categorías de impacto pertinentes al estudio (*Global Warming Potential*, *Freshwater Acidification*, *Fossil Fuel*, entre otros).

4. **Interpretación.** En esta etapa se generan las conclusiones. Se toman en cuenta las limitaciones y aplicaciones del estudio, como la convergencia de los resultados con el objetivo y alcance definidos.

5.2 Definición de objetivos y alcances.

El objetivo del ACV es caracterizar los impactos potenciales y determinar su incertidumbre, para una planta generadora de energía eléctrica mediante biogás de excreta bovina lechera.

Figura 4. Vista satelital del "Establo Los Arados" en Meoqui, Chihuahua, México (Google Earth Engine, 2012)

El escenario del caso de estudio es una planta generadora pequeña-industrial con capacidad de generación de ~22kW, localizada en el "Establo Los Arados". El establo se localiza en el municipio de Meoqui, Chihuahua, México (coordenadas: 28°14'35" N 105°28'14"W; imagen satelital en la Figura 4. Su principal actividad es la producción de leche.

La unidad funcional para el estudio es la generación de energía eléctrica de 22 kW-h, que es la generación media de la turbina a lo largo de un año. El sistema analizado comprende, desde la recolección de excreta, hasta la generación de energía eléctrica.

5.3 Desarrollo de Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

La recopilación de entradas se separó en etapas, a fin de identificar las partes del sistema de estudio con mayor carga ambiental. El sistema se separa en:

- Recolección de excreta.
- Infraestructura de los establos.
- Generación de biogás.
- Generación de energía eléctrica.
- Infraestructura de la planta generadora de energía.

Las condiciones de operación de estas etapas (generación de energía eléctrica, consumo de agua y/o energía, etc.), fue información proporcionada por los productores. También se colecto información de literatura, principalmente de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013) y de los parámetros de la EPA-AP42 (Environmental Protection Agency, 2009b). Una parte importante son las mediciones hechas *in situ*, las cuales permiten un análisis del caso de estudio y aportan información para el desarrollo de inventarios regionales.

Los procesos Unitarios incluidos y los límites del sistema se encuentran en la Figura 5. El agua utilizada en el proceso (línea azul de la Figura 5) es suministra al establo, para la producción de leche y la planta generadora de energía. La línea verde (Figura 5), indica el suministro de energía eléctrica dentro de la planta. Son dos fuentes de energía eléctrica que se consideran en el proceso, la energía obtenida de la línea de suministro (CFE), y la energía generada mediante el biogás.

El proceso inicia con la recolección de excreta. Debido a que la planta generadora de energía y el establo se encuentran en la misma ubicación, no es necesario recorrer largas distancias para transportar la excreta. El transporte interno considera el recorrido que hace

el tractor colector de excreta, así como el transporte a la zona producción de biogás Figura 5. La línea negra continua, indica el recorrido del sustrato (excreta). El sustrato es transformado en biogás en la etapa de producción. Ésta etapa se separa en tres sub-etapas: i) pre-tratamiento, ii) digestión anaerobia y iii) purificación. De aquí se generan residuos como los sólidos utilizados y el efluente. El biogás es llevado a la etapa de generación de energía eléctrica. De ésta etapa se genera la energía que es incorporada a la línea de suministro y se emiten gases de combustión.

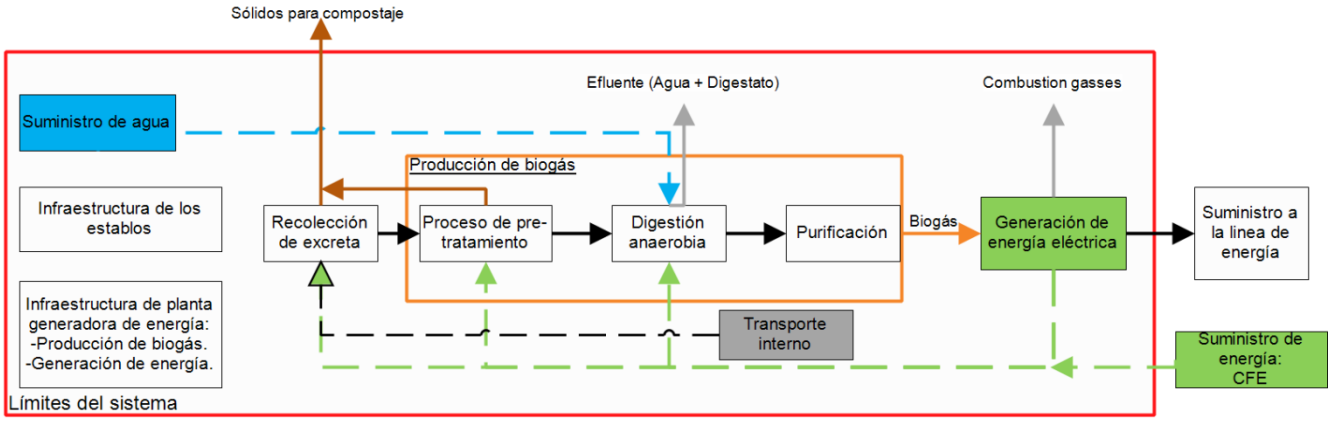

Figura 5. Límites del sistema en el ICV.

5.3.1 Descripción de la etapa de producción de biogás.

5.3.1.1 Etapa de Pre-tratamiento.

La etapa de producción de biogás, es la más compleja de las presentadas en la Figura 5. Pues se divide en sub-etapas, que a su vez se componen en operaciones unitarias. Se explicaran con mayor detalle éstas sub-etapas.

La Figura 6, muestra la sub-etapa de pre-tratamiento. Mediante un tractor, se colecta la excreta de los corrales. El vehículo recorre los establos recogiendo la excreta de los animales. Después, la excreta es transportada e introducida en un tanque de mezclado. El tanque es alimentado con aproximadamente 6 toneladas diarias de excreta, las cuales son

mezcladas con un aproximadamente 32 toneladas de agua. Posteriormente es enviado al separador de sólidos, donde la mezcla es separada en un sólido (con ~84% de humedad) con partículas grandes (diámetro ~ 5 mm). El resto se compone de una mezcla de agua y fracción de excreta disuelta. Esta mezcla es llevada a los clarificadores, donde partículas más finas pequeñas son sedimentadas por gravedad. Tanto los sólidos obtenidos en el separador, como los sedimentados en los clarificadores son enviados a un proceso de compostaje. Éste último proceso no se incluye en éste estudio. Finalmente, la mezcla de agua con materia orgánica (sustrato), es enviada a la sub-etapa de digestión anaerobia (DA). En la Figura 6, se indica un punto de muestreo en color azul. Éste punto fue utilizado para analizar el agua *in situ*, antes de entrar al tanque de mezclado. En capítulos posteriores se hace referencia a éste punto de muestreo.

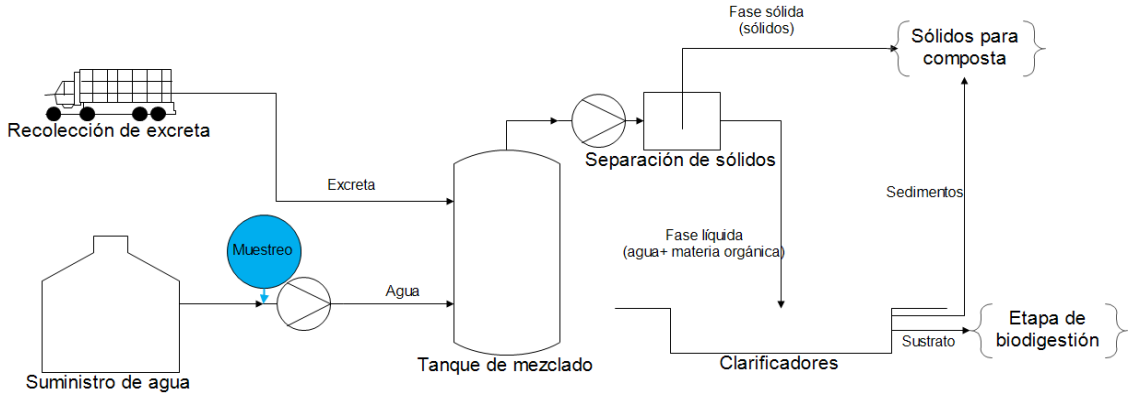

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de Pre-tratamiento de excreta.

5.3.1.2 Etapa de Digestión anaerobia.

Después del proceso de pre-tratamiento, se encuentra sub-etapa de digestión anaerobia (Figura 7). El sustrato es introducido de forma alternada entre los digestores 1 y 2, que a su vez es conducido por acción de la gravedad al digestor 3. Los digestores 1 y 2

cuentan con un sistema de agitación mediante bombeo, el cual recircula una parte del sustrato del digestor 3. Por otra parte, el digestor 3 cuenta con un agitador de flujo axial.

En ésta sub-etapa, el biogás es generado, y el sustrato residual (efluente) se vierte en un canal de riego agrícola. El biogás es colectado del digestor 3 y enviado a la sub-etapa de purificación. En la Figura 7, se indica otro punto de muestreo. Éste en conjunto con el de la Figura 6, se utilizarán para caracterizar las emisiones al agua. En capítulos posteriores se menciona a detalle ésta actividad.

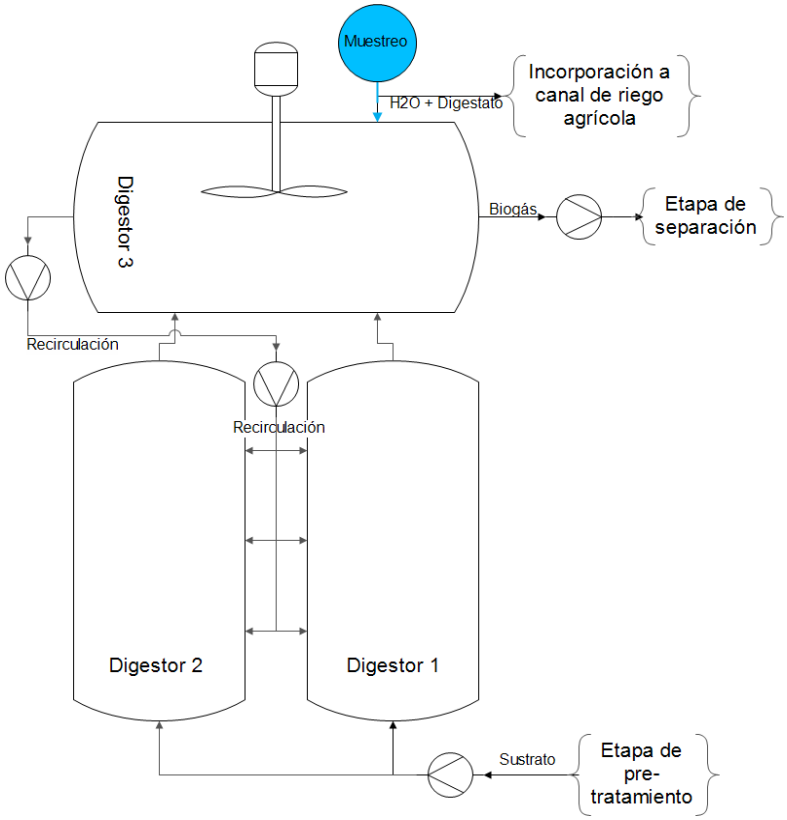

Figura 7. Diagrama de flujo de la etapa de biodigestión.

5.3.1.3 Etapa de Purificación

Químicamente, el biogás es una mezcla de varios gases. De entre las sustancias se encuentra CH_4, CO, H_2S, H_2O, etc. (Kwasny & Balcerzak, 2016). Algunos componentes, como el sulfuro de hidrógeno y el amoniaco, se consideran impurezas. Esto debido a los

potenciales efectos negativos en el aprovechamiento del biogás. Para prevenir éstos efectos, se optan por métodos de separación. Existen varios métodos de purificación de biogás, según el agente que se desea separar. Por ejemplo, para la remoción del sulfuro de hidrógeno; existen métodos, físicos, químicos, e incluso biológicos. La remoción de agua, se puede llevar a cabo mediante cambios en los parámetros de presión y temperatura. Otras impurezas, como el oxígeno y el nitrógeno, pueden ser removidas mediante carbón activado (Petersson, 2013). En la sub-etapa de purificación del caso de estudio, se emplean tres métodos de separación de sulfuro de hidrógeno. Para el presente estudio, se consideran los insumos en el proceso de remoción.

La Figura 8 presenta las operaciones unitarias en la etapa de separación. La concentración del vapor de agua a la salida del digestor, se disminuye mediante condensación. Después, el biogás es conducido a un sistema de remoción de H_2S, utilizando sosa cáustica comercial (NaOH). Posteriormente, el biogás es conducido a torres empacadas de carbón activado. El biogás, después de pasar por otro condensador, es llevado a un compresor. Luego es acondicionado con un intercambiador de calor. Por último, el biogás es tratado mediante una torre empacada (de empaque es desconocido) para eliminación de H_2S. El biogás es llevado a la turbina generadora de energía eléctrica.

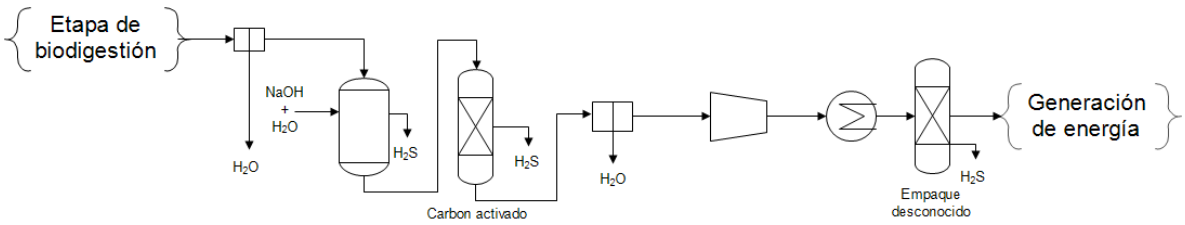

Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de separación de sustancias no deseadas en el biogás.

5.3.1.4 Generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante una micro-turbina Capstone C30 (Figura 9). Éste equipo tiene una capacidad de generar hasta 30 kW, y es resistente a componentes corrosivos como el sulfuro de hidrógeno. Una vez quemado el biogás en la micro-turbina, los gases de combustión son liberados a la atmósfera.

Figura 9. Turbina Capstone C30, utilizada en el "Establo Los Arados".

5.3.2 Métodos de colección de datos.

Los datos, del ICV fueron colectados mediante mediciones directas en situ, literatura e información proporcionada por los productores. En base a la Figura 5 se presenta la Tabla 5.1, En la cual se indica, la fuente de datos consideradas para el inventario de entradas y salidas del proceso a analizar.

Tabla 5.1. Parámetros considerados en el inventario por proceso Unitario.

Etapa	Método de desarrollo de Inventario CV
Recolección de excreta.	• Cantidad recolectada de excreta: Se colecta mediante un tractor que recorre los corrales. • El consumo de combustible durante el recorrido en los corrales se obtuvo mediante información proporcionada por los productores. • Se hace una propuesta de recorrido de recolección de excreta mediante sistema de geo-referenciacion (Google Earth Engine, 2012) que se muestra en el • Infraestructura de los corrales (materiales de construcción).
Pre-tratamiento para digestión (primera sub-etapa de producción de biogás).	• Las operaciones unitarias fueron identificadas durante el trabajo de campo (no se consideran los materiales de los que están hechos los equipos). • La infraestructura (tubería), fue considerada a partir de inventarios complementados por la base de datos Ecoinvent (Weidema, et al., 2013).
Digestión anaerobia (segunda sub-etapa de producción de biogás)	• El consumo de energía eléctrica por el bombeo información colectada en campo. • El consumo de agua fue información proporcionada por los productores. • La infraestructura se obtuvo de información colectada en campo y complementada con la base de datos Ecoinvent (Weidema, et al., 2013). • Las emisiones de efluente (digestato y agua), fueron caracterizadas. Se analizaron elementos mediante ICP-OES. En la sección 5.3.3 se menciona a detalle éste método.
Purificación (tercera sub-etapa de producción de biogás)	• Se considera como insumo el uso de energía eléctrica y el consumo de sosa caustica (NaOH). • Como parte de la infraestructura se considera la tubería utilizada para el transporte de biogás.
Generación de energía eléctrica mediante biogás.	• La generación de energía eléctrica es información obtenida mediante el control en la operación. • La infraestructura de la turbina fue obtenida mediante la base de datos Ecoinvent (Weidema, et al., 2013). • La emisión de gases de combustión: CO_2, H_2O y aire se obtuvieron mediante cromatografía de gases; mientras que CO, NO_x, SO_2, partículas suspendidas, CH_4 y compuestos orgánicos totales, se calcularon mediante parámetros de la EPA-AP42.
Energía eléctrica (CFE)	• Consumo de energía eléctrica. La electricidad obtenida del suministro de energía (CFE), se toma de la base de datos Ecoinvent (Weidema, et al., 2013), como mezcla energética nacional.
Abastecimiento de agua	• Consumo de agua. Es información proporcionada por los productores. • El consumo de agua proviene del pozo agrícola. El agua es bombeada al establo, el consumo eléctrico es considerado.

5.3.3 Caracterización del efluente.

El digestato mezclado con agua (Figura 5), son emitidos a un canal de riego agrícola. Para su correspondiente caracterización, se tomaron cuatro muestras de agua a la entrada del digestor. El punto de muestreo se indica en la Figura 6. Éste punto de muestreo indica la concentración de elementos del agua utilizada (x_{H2O_i}). También se tomaron cuatro muestras a la salida del digestor, en el punto de muestreo de la Figura 7. La concentración del efluente (x_{ef_i}) indica la concentración de elementos que ha sido emitida al canal de riego agrícola.

Los muestreos de agua se realizaron durante el período del 18 de enero al 1 de febrero del año 2017. Para la determinación de elementos, se realizó digestión de muestras. La digestión de muestras de agua (x_{H2O_i}), se hizo en base a la norma SN 3015 de la EPA. Por otra parte, las muestras del efluente (x_{ef_i}), se digirieron tomando ~1.0 g y se calentando en parrilla durante 1h con una mezcla de HCl-HNO3 relación 2:1.

El análisis de elementos de todas las muestras, se llevó a cabo mediante Espectrometría de Emisión por Plasma inductivamente Acoplado (IPC-OES por sus siglas en ingles). El equipo utilizado fue un ICP-OES Modelo iCAP 6500 Series (Thermo Scientific). Los elementos medidos fueron: As, Ba, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb. Se utilizó el estándar QCS-27, para todos los elementos.

También se determinó en las muestras el ión amonio. Se utilizaron tiras reactivas marca Macharey-Nagel con número de parte 91315. Las mediciones se llevaron a cabo *in situ*. Tanto el

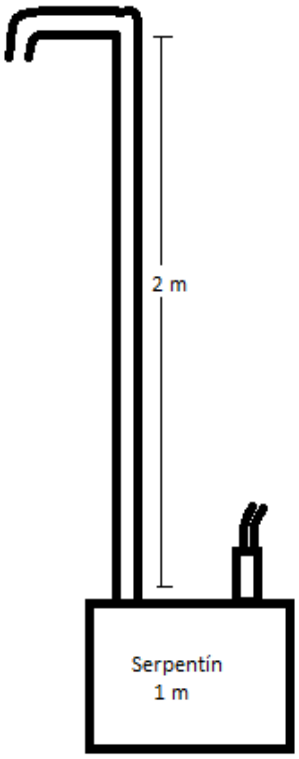

Figura 10. Dispositivo de muestreo de gases de combustión en la turbina.

muestreo para determinación de elementos como la medición del ion amonio, se llevaron a cabo semanalmente, entre el período del 26 de abril al 17 de mayo del año 2017.

Una vez determinada la concentración del ion amonio y todos los elementos, se procedió a calcular la cantidad de componentes emitidos al agua (f_i). El cálculo de emisiones se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 3

$$f_i = \left(x_{ef_i} - x_{H2O_i}\right) * t$$

i= {As, Ba, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb, y NH4}

Donde *t* es el flujo de emisión del efluente, cuya cantidad es proporcionada por los productores.

5.3.4 Caracterización de emisiones al aire (gases de combustión).

Para considerar las emisiones al aire, se analizaron gases de combustión emitidos por la turbina. Se colectaron cuatro muestras de gases de combustión utilizando bolsas Tedlar de la serie 232, con válvulas de polipropileno. Debido a las altas temperaturas de los gases de combustión, se optó por el diseño de un sistema de enfriamiento de gases. Éste sistema consiste en un tubo de acero inoxidable. El extremo superior del tubo contaba con un doblez en “U”, de forma que pudiera colectar los gases de combustión a la salida de la chimenea. Al otro extremo del tubo, se colocó un intercambiador de calor, el cual consistió en un serpentín en un medio de baja temperatura. El dispositivo fue diseñado para tomar la muestra de una forma más segura. La Figura 10, muestra un bosquejo del dispositivo de muestreo.

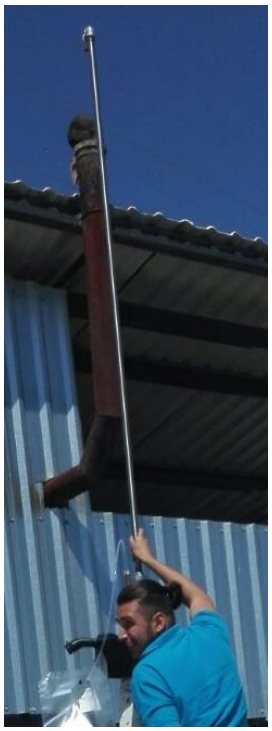

Figura 11. Colocación del dispositivo de muestreo en la chimenea.

En la Figura 11, se muestra como el dispositivo de muestreo se coloca en la parte superior de la chimenea. El dispositivo fue diseñado para reducir la temperatura de los gases de combustión de 800 a 25°C, de forma que no dañe la bolsa Tedlar. Los cálculos realizados para el dispositivo de muestreo y el intercambiador de calor se presentan en el ANEXO I.

Se colectó una muestra semanalmente, entre el 26 de abril y 17 de mayo del año 2017. Las cuatro muestras de gases de combustión se caracterizaron y cuantificaron mediante cromatografía de gases. Se utilizó un equipo Austosystem XL Perkin Elmet II, para determinar la concentración de aire, CO_2 y vapor de agua. El análisis utilizó una columna Porapak Q6FT como fase estacionaria y helio como fase móvil. Se utilizó un detector de conductividad térmica (TCD por sus siglas en ingles). Se inyectó ½ mL de muestra. El caudal del gas de arrastre fue de 20mL/min y el arrastre en la columna fue con una rampa de 1°C por minuto, en un rango de temperatura de 35-120°C.

Otros gases de combustión, fueron calculados mediante parámetros de la EPA-AP42. Los parámetros utilizados fueron para turbinas estacionarias de gas (U. S. Environmental Protection Agency, 1995). Las emisiones calculadas con éstos parámetros fueron: CO, NO_x, SO_2, partículas suspendidas, CH_4 y compuestos orgánicos totales.

Para el cálculo de incertidumbre, se utilizaron los parámetros proporcionados por la EPA, para el cálculo de incertidumbre de los parámetros AP42 (U. S. Environmental Protection Agency, 2009). Para determinar la desviación estándar se desarrolló un algoritmo en el software Scilab. Mediante éste algoritmo se pudo calcular una desviación

estándar para cada parámetro de emisión. El algoritmo se presenta en código Scilab en el ANEXO III.

Una vez obtenida la concentración de los gases, se procedió a calcular la cantidad emitida a la atmósfera. Para determinar la salida de gases de combustión (y_i), se multiplicó el flujo de salida (γ) de la turbina, la cual es proporcionada en las especificaciones del equipo Capstone C30, con la concentración de cada componente. El flujo calculado se explica mediante la siguiente ecuación:

<u>Ecuación 4</u>

$$\rho_j = y_i * \gamma$$

$$y_i = \{CO_2, H_2O, Aire, \mathrm{CO}, \mathrm{NO}_x, \mathrm{SO}_2, \mathrm{CH}_4, \text{partículas suspendidas y compuestos orgánicos totales}\}$$

Tanto las emisiones de agua, como las emisiones al aire, toman un papel vital en la incertidumbre del ciclo de vida en éste caso de estudio. El valor resultante corresponde un valor promedio y su dispersión. Para calcular la desviación estándar (para emisiones al agua y al aire), del flujo de emisión, se utilizó la siguiente ecuación:

<u>Ecuación 5</u>

$$s_f = \sqrt{s_1 + s_2 + \cdots + s_n}$$

$$s_i = \left(\frac{\sigma_i}{N}\right)^2$$

$$n = número\ de\ variables\ involucradas\ en\ la\ función.$$

$$N = numero\ de\ muestras\ en\ la\ población\ en\ cuestión$$

$$i = tipo\ de\ variable\ de\ la\ función\ en\ cuestión$$

Los parámetros de dispersión obtenidos se utilizarán en el método Monte Carlo, en base a ellos se crearán valores aleatorios delimitados por dichos parámetros.

5.4 Categorías de impacto para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) es la caracterización del ICV a categorías de impacto. Las categorías de impacto utilizadas, fueron seleccionadas de la base de datos ReCiPe midpoint (Weidema, B.P., et al., 2013). Las categorías de impacto, se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Categorías de impacto utilizadas en el presente estudio.

Categoría de Impacto	Traducción (se utilizará en el resto del escrito)	Unidad
Climate change	*Cambio climático*	kg CO_2 eq
Ozone depletion	*Agotamiento en la capa de ozono*	kg CFC-11 eq
Human toxicity	*Toxicidad humana*	kg 1,4-DB eq
Photochemical oxidant formation	*Formación de oxidantes fotoquímicos*	kg NMVOC
Particulate matter formation	*Formación de partículas*	kg PM_{10} eq
Ionising radiation	*Radiación ionizante*	kg U^{235} eq
Terrestrial acidification	*Acidificación terrestre*	kg SO_2 eq
Freshwater eutrophication	*Eutrofización de agua*	kg P eq
Terrestrial ecotoxicity	*Ecotoxicidad terrestre*	kg 1,4-DB eq
Freshwater ecotoxicity	*Ecotoxicidad del agua*	kg 1,4-DB eq
Marine ecotoxicity	*Ecotoxicidad marina*	kg 1,4-DB eq
Agricultural land occupation	*Ocupación del suelo agrícola*	m^2a
Urban land occupation	*Ocupación de suelo urbano*	m^2a
Natural land transformation	*Transformación de suelo natural*	m^2
Water depletion	*Agotamiento del agua*	m^3
Metal depletion	*Agotamiento de metales*	kg Fe eq
Fossil depletion	*Agotamiento de combustibles fósiles*	kg oil eq

5.5 Consideraciones para el análisis de incertidumbre.

En el presente trabajo se utilizó la simulación Monte Carlo para determinar la incertidumbre en las categorías de impacto. El análisis Monte Carlo se llevó a cabo mediante el Software especializado SimaPro en la versión académica PhD. La simulación se realizó considerando los parámetros de dispersión en las emisiones al agua (efluente del biodigestor) y al aire (CO2, H2O, aire y pérdidas por calor). También se incluyó la incertidumbre obtenida de literatura, principalmente obtenida de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013) y de los parámetros de la EPA-AP 42.

5.6 Interpretación.

La interpretación de resultados consiste el análisis de los mismos para su correcta aplicación. También en ésta etapa se revisa la convergencia de los resultados, con los objetivos planteados. En la interpretación se buscaron los procesos de mayor carga ambiental. También se buscaron las categorías de impacto con mayor incertidumbre.

Se realizaron dos inventarios para el presente estudio. El primero con parámetros de dispersión obtenidos únicamente de bases de datos y literatura. El otro incluye la dispersión obtenida mediante mediciones. Esto se realizó con el fin de identificar las categorías que tienen relación directa con las emisiones al agua y al aire. También para determinar cuanta incertidumbre aportan a los resultados del EICV. Los resultados del ACV fueron revisados conforme al objetivo planteado.

6 Resultados.

En las secciones 6.1 y 6.2 se presentan los resultados de las mediciones hechas *in situ* para las emisiones al agua y al aire respectivamente. En las secciones 6.3 y 6.4, se presentan los resultados del ACV acorde a la norma NMX-SAA-14040-IMNC-2008. Estas etapas se definen en la sección 5.1 y las metodologías utilizadas para su implementación se presentan en las secciones 5.3-5.6.

6.1 Análisis de emisiones al agua.

La Tabla 6.1, se presenta la concentración media de los elementos analizados en el agua utilizada en el digestor. Estos cálculos fueron obtenidos a partir de las cuatro muestras analizadas mediante ICP-OES. Los resultados obtenidos directamente de la medición en el equipo ICP-OES, así como parámetros como longitudes de onda y desviaciones estándar, se presentan en el ANEXO II.

Tabla 6.1. Análisis de elementos para el agua utilizada en el digestor anaerobio.

Elemento	Unidades	Concentración	Desviación estándar
As	ppb	30.36	11.81
Ba	ppm	44.79	7.22
Co	ppb	4.38	0.6384
Cr	ppb	4.7	0.7384
Mn	ppb	171.65	307.16
Mo	ppb	6.69	3.17
Ni	ppb	3.49	2.31
Pb	ppb	6.17	1.96

La Tabla 6.2, presenta las concentraciones de los mismos elementos, a la salida del digestor. Se puede observar un aumento en la concentración de todos los elementos analizados. Acorde a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (IMNC, 1997), son considerados contaminantes el As, Cr, Ni y Pb. La concentración de estos elementos no supera los límites

máximos permisibles en descarga de aguas para uso agrícola. Es importante considerar que la normativa de un país a otro puede variar, por lo que las categorías de impacto en la etapa de EICV, si consideran a todos los contaminantes analizados.

La desviación estándar presentada en las Tablas Tabla 6.1 y Tabla 6.2, fue calculada en base al número de muestras tomadas; ésta dispersión no considera incertidumbre en el análisis. Los elementos a la salida del digestor (Tabla 6.2) son mayores que en la entrada del digestor de manera significativa (Tabla 6.1). Esto posiblemente como resultado de la actividad microbiana en el digestor.

Tabla 6.2.Análisis de elementos en el efluente a la salida del digestor.

Elemento	Unidades	Concentración	Desviación estándar
As	ppb	77.40	105.49
Ba	ppm	1830.92	59.32
Co	ppb	43.13	2689.39
Cr	ppb	251.60	2742.05
Mn	ppb	371.93	1908.29
Mo	ppb	20.08	4811.82
Ni	ppb	590.16	3785.13
Pb	ppb	202.37	6.41

También se realizó el análisis mediante tiras reactivas del ion amonio (NH_4^+). El aumento de concentración de NH_4^+ variaba entre 500 a 100 mg/L. El promedio de concentración del ión amonio a la salida del digestor fue de 800 mg/L, mientras que a la entrada no se detectó NH_4^+. El ion amonio es un parámetro importante al caracterizar el digestato (Seadi et al., 2008), ya que es una impureza común en la generación de biogás. La formación de ion amonio es resultante de la hidrólisis de proteínas contenidas en el sustrato (Petersson, 2013).

6.2 Análisis de emisiones al aire.

La concentración de aire, CO_2 y vapor de agua a la salida de la turbina fueron analizados mediante cromatografía de gases. La concentración de gases obtenida en la cromatografía se presenta en la Tabla 6.3. Se puede observar una alta concentración de aire en los gases de combustión. Esto se debe al ingreso de aire en la turbina, tanto para una correcta combustión, como para el enfriamiento. A pesar de ser altas concentraciones, la desviación estándar es baja. A diferencia de la digestión anaerobia, la combustión en la turbina es un proceso controlado. El control radica en el equipamiento de la turbina Capstone C30, la cual fue adquirida con dispositivos de monitoreo y control. Sin embargo, la incertidumbre por parte de la cromatografía de gases, no fue considerada en éste estudio.

Tabla 6.3. Concentración de gases obtenida mediante cromatografía.

	Concentración (% m/m)	Desviación estándar
Aire	96.86	0.4408
CO_2	2.11	0.4517
H_2O	0.5367	0.1266

También se determinó la emisión de partículas mediante los parámetros de la EPA-AP-42, calculando también la incertidumbre en función de la información proporcionada por EPA. Los parámetros y el flujo calculado se presentan en la Tabla 6.4. El parámetro de emisión es multiplicado por los 22 kWh de energía de la unidad funcional. Los parámetros de la EPA AP-42 cuentan con información adicional para el cálculo de mediciones de dispersión. Para la determinación de la desviación estándar, fue necesaria la aplicación de un algoritmo. Se creó una población en base a variables aleatorias, las cuales fueron

delimitadas por los parámetros de dispersión proporcionado por la AP-42. Los detalles del algoritmo utilizado se presentan en el ANEXO III.

Tabla 6.4. Emisión de contaminantes en base a los parámetros de la EPA-AP42 (Environmental Protection Agency, 2009a)**.**

	Parámetro de la AP-42 (kg/kWh)	**Desviación estándar del parámetro**	**Flujo de salida (kg/22 kWh)**	**Desviación estándar del flujo**
CO	3.57E-04	1.01E-04	1.09E-02	2.21E-03
NO_X	9.14E-05	3.66E-05	2.79E-03	8.05E-04
SO_2	8.07E-06	3.80E-06	3.52E-04	8.36E-05
PS	1.02E-05	3.60E-06	2.25E-04	7.92E-05
CH_4	1.33E-05	5.50E-06	2.93E-04	1.21E-04
TOC	1.70E-05	4.30E-06	3.75E-04	9.46E-05

PS: Partículas suspendidas

6.3 Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

6.3.1 Infraestructura de los establos.

El "Establo Los Arados" incorpora en un establo lechero, un sistema de biodigestión. El presente estudio se enfoca en el sistema de generación de energía mediante biogás. Por tanto, el procesamiento de la leche es un sistema secundario. Por otra parte, la infraestructura de los establos considera la influencia en el sistema de generación de energía. Esto debido a que la recolección de excreta forma parte de las actividades previas a la digestión anaerobia. La gestión del espacio en los corrales en el establo también influye en la recolección y transporte de la excreta. Por lo que en nuestro estudio se considera la infraestructura de los corrales.

La Figura 12 muestra un plano del “Establo Los Arados”. En él se indica la localización del digestor, el generador y los corrales. El tractor utilizado para la recolección de excreta, realiza el recorrido por cada uno de los corrales, para terminar en el digestor.

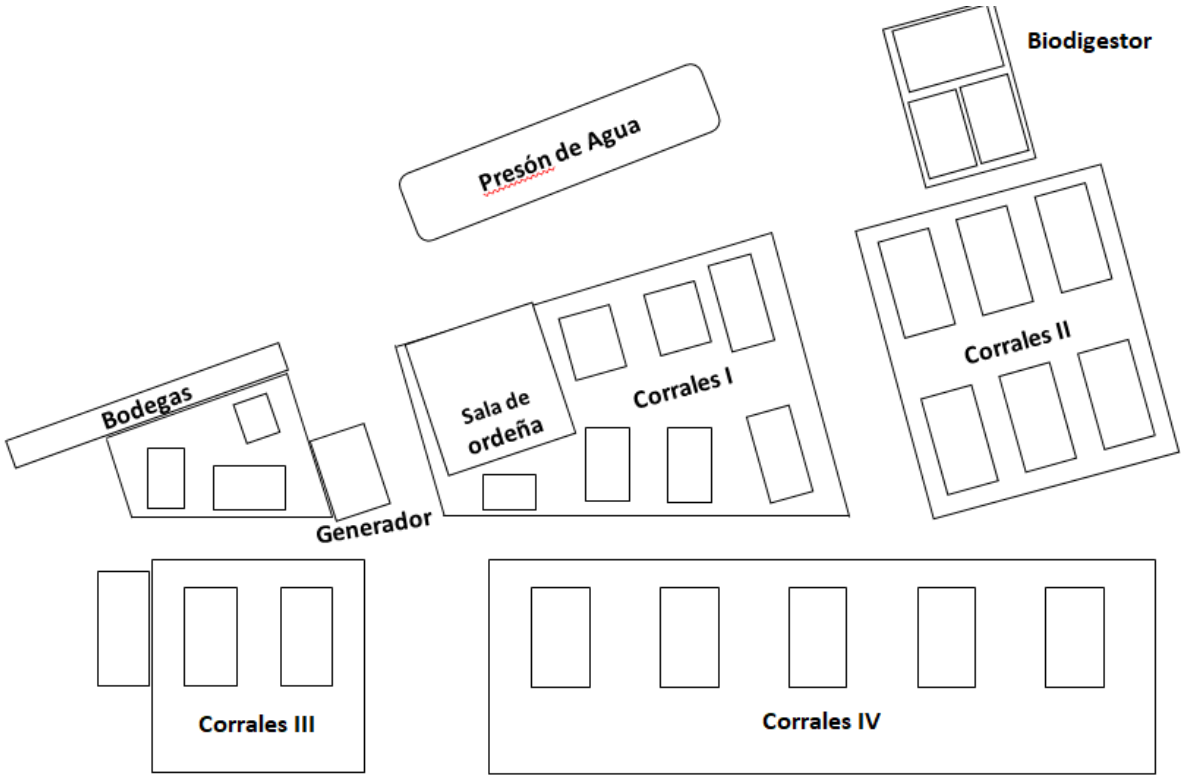

Figura 12. Plano del “Establo Los Arados”.

El inventario de los establos incluye el uso de suelo y los materiales utilizados para la construcción de los corrales. Los materiales utilizados fueron principalmente acero y hierro. También se incluye el acero galvanizado, el cual es utilizado en tejados dentro de cada corral. La Tabla 6.5 presenta el ICV de los establos. Los inventarios de cada uno de los materiales fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013). Es importante tomar en cuenta que el ICV presentado en la Tabla 6.5, corresponde al material necesario para construir una réplica del establo del caso de estudio. Para el ICV de la generación de energía, solo es considerada una fracción de la infraestructura. Ésta fracción está en función de la vida estimada del corral.

Tabla 6.5. Resultados de entradas y salidas de la infraestructura de los establos.

Productos	Cantidad	Unidad	SD	Método de colección de datos (MCD)
Infraestructura del establo	1	p	-	NA
Recursos	**Cantidad**	**Unidad**	**SD**	**MCD**
Uso de suelo	1.70E+05	m^2a	-	Ecoinvent database (Weidema, B.P., et al., 2013)
Materiales	**Cantidad**	**Unidad**	**SD**	**MCD**
Producción de Acero	1528.7	kg	-	Ecoinvent database (Weidema, B.P., et al., 2013)
Producción de Hierro	5.16E+06	kg	-	
Producción de acero galvanizado	2.54E+05	kg	-	

NA: No Aplica

6.3.2 Infraestructura de la planta generadora.

El ICV de la planta generadora de energía eléctrica incluye los procesos mencionados en el capítulo 5.3. Éste inventario considera los materiales necesarios para la construcción del digestor, y el generador de energía eléctrica.

Como se puede observar en la Figura 7, el sistema se compone de tres digestores. Estos digestores son compartimentos recubiertos de una geo membrana. El material utilizado para la geomembrana es polietileno de alta densidad. Mediante el cálculo de la superficie del reactor y la densidad del polietileno, se calculó la cantidad de material necesario en el reactor incluyendo una micro turbina. La tubería necesaria para el transporte del biogás de los digestores al generador también fueron incluidos.

La Tabla 6.6 muestra el ICV de la infraestructura de la planta generadora de energía eléctrica mediante biogás. Los ICV de los materiales son obtenidos de la base de datos Ecoinvent (Weidema, , 2013). El uso de suelo transformado a área industrial fue calculado mediante información satelital (Google Earth Engine, 2012). Se utilizó una micro turbina

de la base de datos Ecoinvent, con una capacidad de 100 kWh, la cual se ajustó a la unidad funcional (22 kWk) multiplicando por la fracción equivalente.

Tabla 6.6. Resultados de entradas y salidas de la infraestructura de la planta de energía eléctrica mediante biogás.

Producto	Cantidad	Unidad	Desviación estándar (DS)	Método de colección de datos (MCD)
Infraestructura de la planta generadora de energía eléctrica	1	p	100	Ecoinvent database (Weidema, B.P., et al., 2013)
Recursos	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Transformación de suelo a área industrial	8,368	m^2	-	Ecoinvent database (Weidema, B.P., et al., 2013)
Materiales	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Micro turbina	0.22	p	-	Ecoinvent database (Weidema, B.P., et al., 2013)
Geo membrana (Polietileno de alta densidad)	20,148	kg	-	
Tubería (Polietileno)	366	m	-	

6.3.3 Recolección de excreta.

La recolección de excreta es una etapa significativa en el proceso. La recolección de excreta se hace mediante un tractor, el cual colecta la excreta de los corrales y la transporta al tanque de mezclado (Figura 6).

Se considera únicamente el combustible utilizado en la recolección de excreta por parte del tractor. Las emisiones al aire son tomas de los parámetros de la EPA-AP42 para motores diesel no controlados (Environmental Protection Agency, 2009a). Para especificaciones del tractor se toma como referencia un vehículo Jonh Deere, modelo 6125D. Éste vehículo tiene una potencia de 110.7 hp y un rendimiento de combustible de 23.36 L/h (Deere and Company, n.d.).

La Tabla 6.7 muestra el ICV de la recolección de excreta. La cantidad promedio de las emisiones calculadas mediante los parámetros de la EPA-AP42 también se muestra en la Tabla 6.7. Se muestra la desviación estándar calculada mediante el algoritmo (ANEXO III) en función de los parámetros de dispersión de la EPA-AP42.

Tabla 6.7. Resultados de entradas y salidas de la recolección de excreta.

Products	Cantidad	Unidad	Descviación estándar (DS)	Método de colección de datos (MCD)
Recolección de excreta alterno	4.23E-01	tkm	-	Proporcionado por productor
Emisiones al aire	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Óxidos de nitrógeno	1.23E-01	kg	8.76E-02	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Monóxido de carbono	2.66E-02	kg	1.95E-02	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Dióxido de azufre	8.17E-03	kg	4.97E-03	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Partículas < 10 µm	8.76E-03	kg	4.37E-03	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Dióxido de carbono	4.58	kg	7.84E-01	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Aldehídos	1.84E-03	kg	1.14E-03	(Environmental Protection Agency, 2009a)

6.3.4 Producción de biogás.

El proceso de digestión anaerobia genera grandes cantidades de emisiones al agua. La Tabla 6.8 muestra las emisiones que se generan al agua durante el proceso de biodigestión. Se incluye el consumo de hidróxido de sodio durante el proceso de tratamiento del biogás.

Debido a la falta de control en el proceso, tanto la cantidad de biogás producido, como el consumido en la turbina es desconocido. Solo se conocen los ingresos de sustrato y las emisiones al agua. Para cuestiones prácticas, solo se señala el consumo de biogás equivalente a la unidad funcional.

En las emisiones al agua de la Tabla 6.8, se incluyen los contaminantes calculados mediante la Ecuación 2. También se mencionan los parámetros de dispersión calculados mediante la Ecuación 5. La entrada y salida del agua en el sistema tiene una dispersión uniforme, es decir, los flujos de entrada y salida varían entre 1.9 y 1.3 L.

Tabla 6.8. Resultados de entradas y salidas de la producción de biogás.

Producto	Cantidad	Unidad	Desviación estándar (DS)	Método de colección de datos (MCD)
Digestión anaerobia	22	kWh-eq	-	Proporcionado por productores
Recursos	**Cantidad**	**Unidad**	**Dispersión uniforme**	**MCD**
Agua de pozo	1.6	L	[1.9, 1.3]	Proporcionado por productores
Insumos	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Hidróxido de sodio	2.31E-03	kg	-	Proporcionado por productores
Emisiones al agua	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Agua	1.6	L	[1.9, 1.3]	(Seadi et al., 2008)
Amonio	8.44E-02	kg	0.4636	Tiras reactivas
Fósforo	4.68E-07	kg	-	(Seadi et al., 2008)
Arsénico	1.36	µg	71.10	ICP-OES
Bario	52.23	mg	1370.93	ICP-OES
Cobalto	1.13	µg	10.00	ICP-OES
Cromo	7.22	µg	100.28	ICP-OES
Manganeso	5.86	µg	322.10	ICP-OES
Molibdeno	3.91E-01	µg	38.41	ICP-OES
Níquel	17.15	µg	219.96	ICP-OES
Plomo	5.74	µg	20.52	ICP-OES

6.3.5 Generación de energía eléctrica.

La generación de la energía eléctrica es la última etapa. Se puede apreciar en la Tabla 6.9 las emisiones al aire generadas en éste proceso. La emisión de CO_2, aire y agua, son flujos obtenidos mediante la Ecuación 4, en base a las concentraciones obtenidas mediante cromatografía de gases. También se calcularon las emisiones de monóxido de

carbono, dióxido de azufre, carbono total orgánico y partículas. Estas emisiones se obtienen de los parámetros de la EPA-AP42 para turbinas de gas no controladas.

Tabla 6.9. Resultados de entradas y salidas de la generación de energía eléctrica.

Producto	Cantidad	Unidad	Desviación estándar (DS)	Método de colección de datos (MCD)
Generación de energía eléctrica mediante biogás	22	kWh	-	-
Emisiones al aire	**Cantidad**	**Unidad**	**DS**	**MCD**
Óxidos de nitrógeno	2.79E-03	kg	8.05E-04	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Monóxido de carbono	1.09E-02	kg	2.21E-03	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Dióxido de azufre	3.52E-04	kg	8.36E-05	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Carbono orgánico total (COT)	3.75E-04	kg	9.46E-05	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Metano	1.93E-06	kg	7.18E-07	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Partículas, > 2.5 um, and < 10um	2.25E-04	kg	7.92E-05	(Environmental Protection Agency, 2009a)
Aire utilizado	1080.93	kg	4.92	Cromatografía de gases
Agua	5.99	kg	1.41	Cromatografía de gases
Dióxido de carbono	23.55	kg	5.04	Cromatografía de gases
Calor residual2	5.00	kWh		Cromatografía de gases

6.4 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

La Tabla 6.10, muestra los impactos potenciales calculados en el EICV de la producción de energía eléctrica mediante biogás, así como las desviaciones estándar calculadas mediante simulación Monte Carlo. Las categorías de impacto con enfoque de punto medio, no expresan un daño potencial. Más bien es un medio de comparación de equivalencia respecto a un punto de referencia. Este tipo de categorías son más precisas, lo

que permite detectar sensibilidad y áreas de oportunidad para la toma de decisiones (ILCD, 2010).

Tabla 6.10. EICV de la generación de energía mediante biogás.

Categoría de impacto	Unidad	Promedio	SD
Ocupación de suelo agrícola	m^2a	1.38E-02	1.10E-02
Cambio climático	kg CO_2 eq	46.60	2.538
Agotamiento de combustibles fósiles	kg oil eq	5.46	4.68E-03
Ecotoxicidad del agua	kg 1,4-DB eq	5.15E-02	9.65E-04
Eutrofización del agua	kg P eq	1.88E-04	5.5101E-05
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	11.16	4.04
Radiación ionizante	kg U^{235} eq	1.93E-02	2.25E-02
Agotamiento de metales	kg Fe eq	8.08E-02	1.42E-02
Transformación de suelo natural	m^2	1.28E-02	7.00E-05
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	4.75E-08	2.00E-09
Formación de partículas	kg PM_{10} eq	3.75E-02	5.81E-03
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	1.24E-01	2.57E-02
Acidificación terrestre	kg SO_2 eq	1.18E-01	1.83E-02
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	1.36E-03	1.01E-04
Ocupación de suelo urbano	m^2a	7.00E-02	1.68E-03
Agotamiento del agua	m^3	3.00E-03	2.16E-04

Las categorías de impacto con el enfoque de punto medio, permiten mostrar la contribución de cada uno de los sistemas con precisión. En la Figura 13, se muestra en porcentaje la contribución de los sistemas a cada categoría de impacto. Se asumió que el tiempo de vida de la planta es de 30 años, al ser un período en que los equipos requerirían mantenimientos menores.

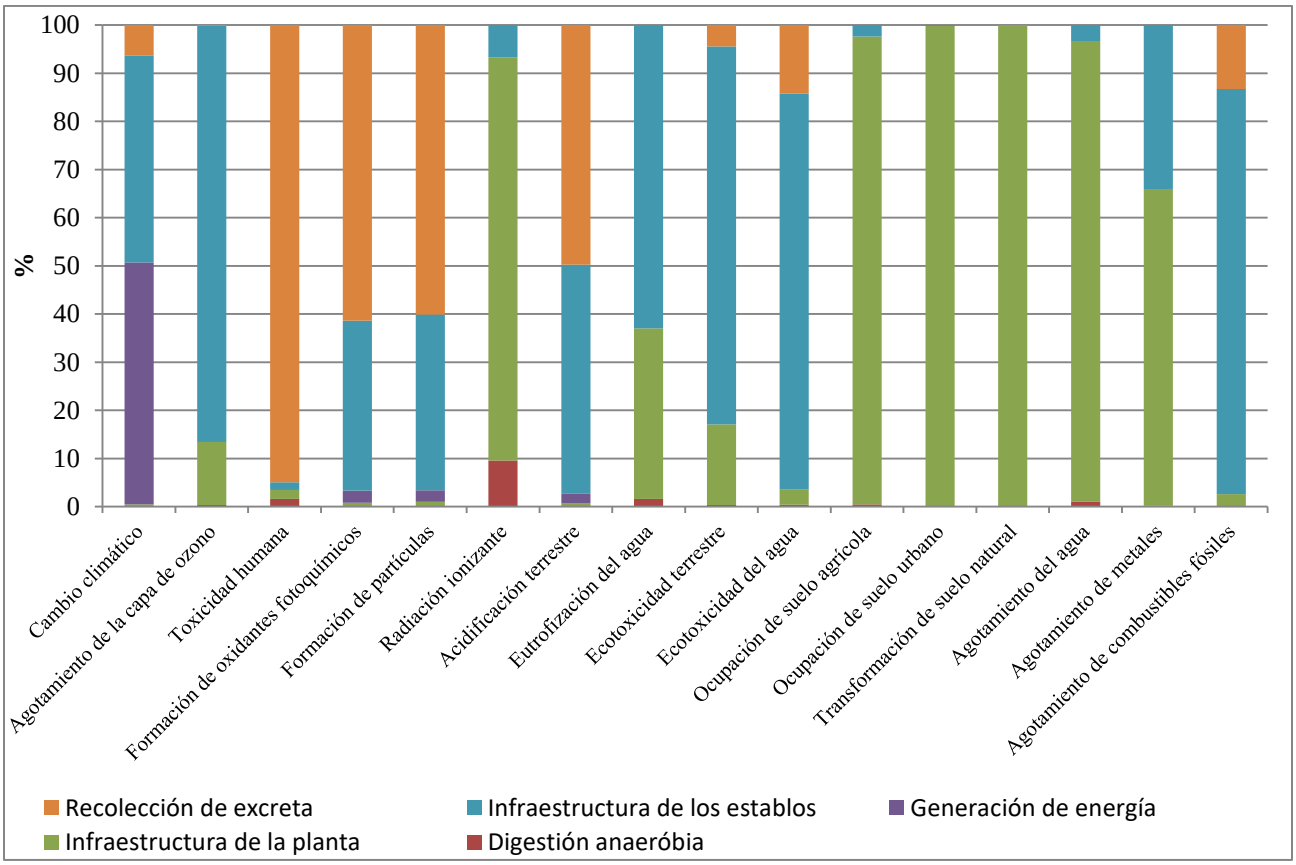

Figura 13. Contribución para cada categoría de impacto.

La Figura 13 señala en porcentaje, la contribución en la carga ambiental de cada uno de los sistemas señalados en el capítulo 5.3. La expresión en porcentaje de contribución por categoría, permite localizar potenciales puntos de mejora en el proceso. También permite localizar los impactos directos de la producción y los impactos indirectos obtenidos del consumo de recursos.

6.5 Análisis de Incertidumbre.

La Figura 14, presenta el margen de error de cada categoría obtenidas mediante la simulación Monte Carlo. Las categorías de *Radiación ionizante* y *Ocupación de suelo agrícola*, presentan márgenes de error superiores al 100% de su valor medio. La incertidumbre en estas categorías no proviene de valores obtenidos por medición *in situ*, sino de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013).

La incertidumbre por parte de las mediciones hechas *in situ*, se ve reflejada principalmente en 11 de las 16 categorías de impacto. Las emisiones al aire obtenidas con medición en cromatografía de gases se reflejan en *Cambio climático*, *Formación de oxidantes fotoquímicos*, *Formación de partículas* y *Acidificación terrestre*. La incertidumbre en estas categorías se debe principalmente a las emisiones de CO_2. Sin embargo, hay incertidumbre presente por parte de los factores de emisión, tanto de la EPA-AP42, como de la base de datos Ecoinvent (Environmental Protection Agency, 2009; Weidema, B.P., et al., 2013).

La incertidumbre en las emisiones al agua por parte de mediciones se ven reflejadas en las siguientes categorías: *Agotamiento de la capa de ozono*, *Toxicidad humana*, *Radiación ionizante*, *Eutrofización del agua*, *Ecotoxicidad terrestre*, *Ecotoxicidad del agua* y *Agotamiento del agua*. En ellas se refleja la incertidumbre de las mediciones al agua mediante ICP-OES. La incertidumbre por parte de las mediciones hechas por ICP-OES se debe a incertidumbre en muestreo, cambios del consorcio microbiano, el método de digestión, errores espectrales, y dificultad en medición de ciertos elementos como el arsénico.

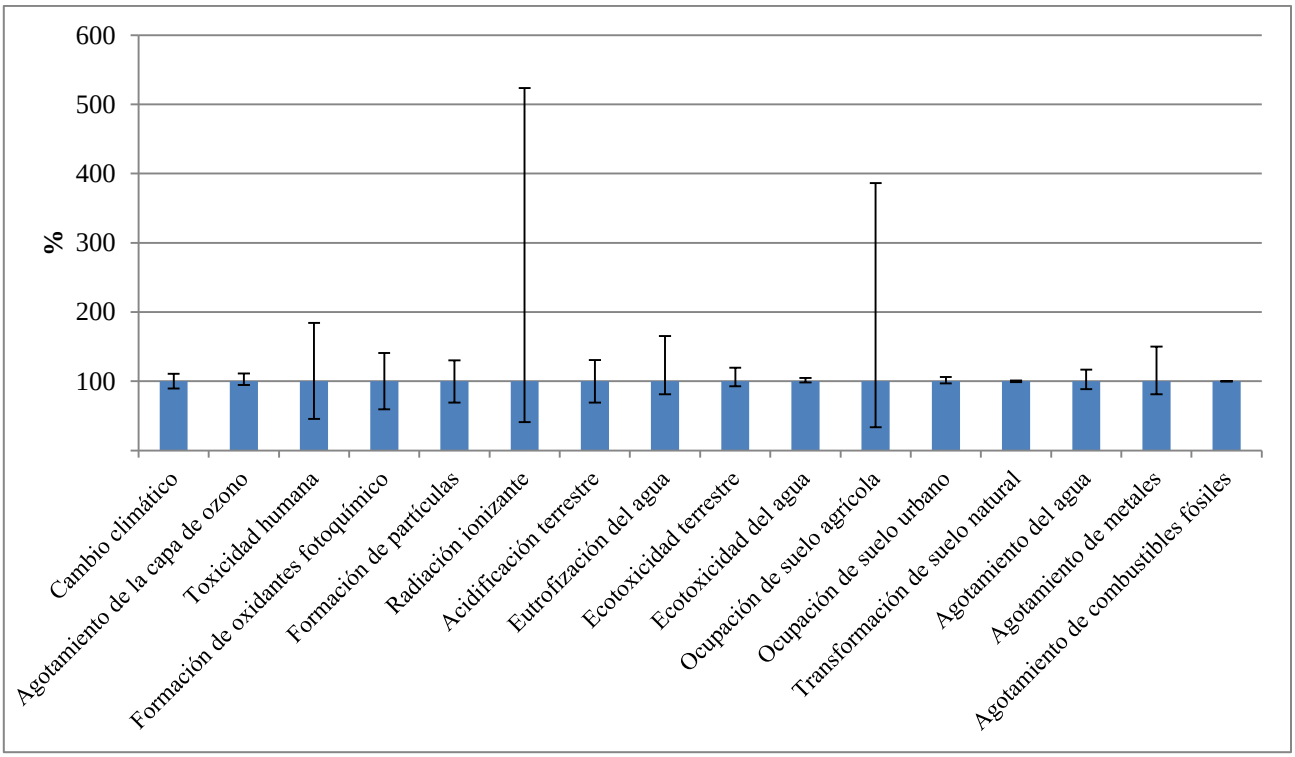

Figura 14. Margen de error en porcentaje de las categorías.

Es importante considerar también la dispersión de la incertidumbre para las categorías de impacto. Especialmente en las categorías de impacto donde son incorporadas mediciones hechas *in situ*. Es difícil determinar que tanto influyen las mediciones hechas *in situ*, debido a que los parámetros de dispersión de la base de datos Ecoinvent son muy variados. El software SimaPro permite ver la dispersión de incertidumbre de cada categoría de impacto. Por lo cual se realizaron dos corridas de análisis de incertidumbre mediante Monte Carlo. La primera corrida fue incluyendo parámetros de dispersión obtenidas por mediciones *in situ*, parámetros de la EPA-AP42 y la base de datos Ecoinvent. En la segunda corrida se omiten los parámetros obtenidos por mediciones *in situ*. Las mediciones de cromatografía de gases son sustituidas por parámetros de la EPA-AP42.

6.5.1 Dispersión de la incertidumbre en emisiones al aire.

La Figura 15, presenta las distribuciones de incertidumbre para la categoría de *Cambio climático*. En la Figura 15(a) se muestra la distribución considerando los parámetros de incertidumbre obtenidos mediante mediciones en el sistema. Ésta dispersión tiene una desviación estándar de 2.538 kg (Tabla 6.10). Por otra parte, la Figura 15(b) muestra la distribución de incertidumbre sin considerar parámetros de incertidumbre, con una desviación estándar es de 0.603 kg. Ambas dispersiones son similares, con la diferencia que la que contiene parámetros de dispersión es mayor. Como se puede apreciar en la Figura 13, la generación de energía eléctrica mediante biogás es la que aporta mayor carga ambiental a la categoría de *Cambio climático*. Así mismo, la incertidumbre de ésta categoría proviene principalmente de éste sistema. La incertidumbre en ésta categoría de impacto proviene principalmente de las emisiones de CO_2.

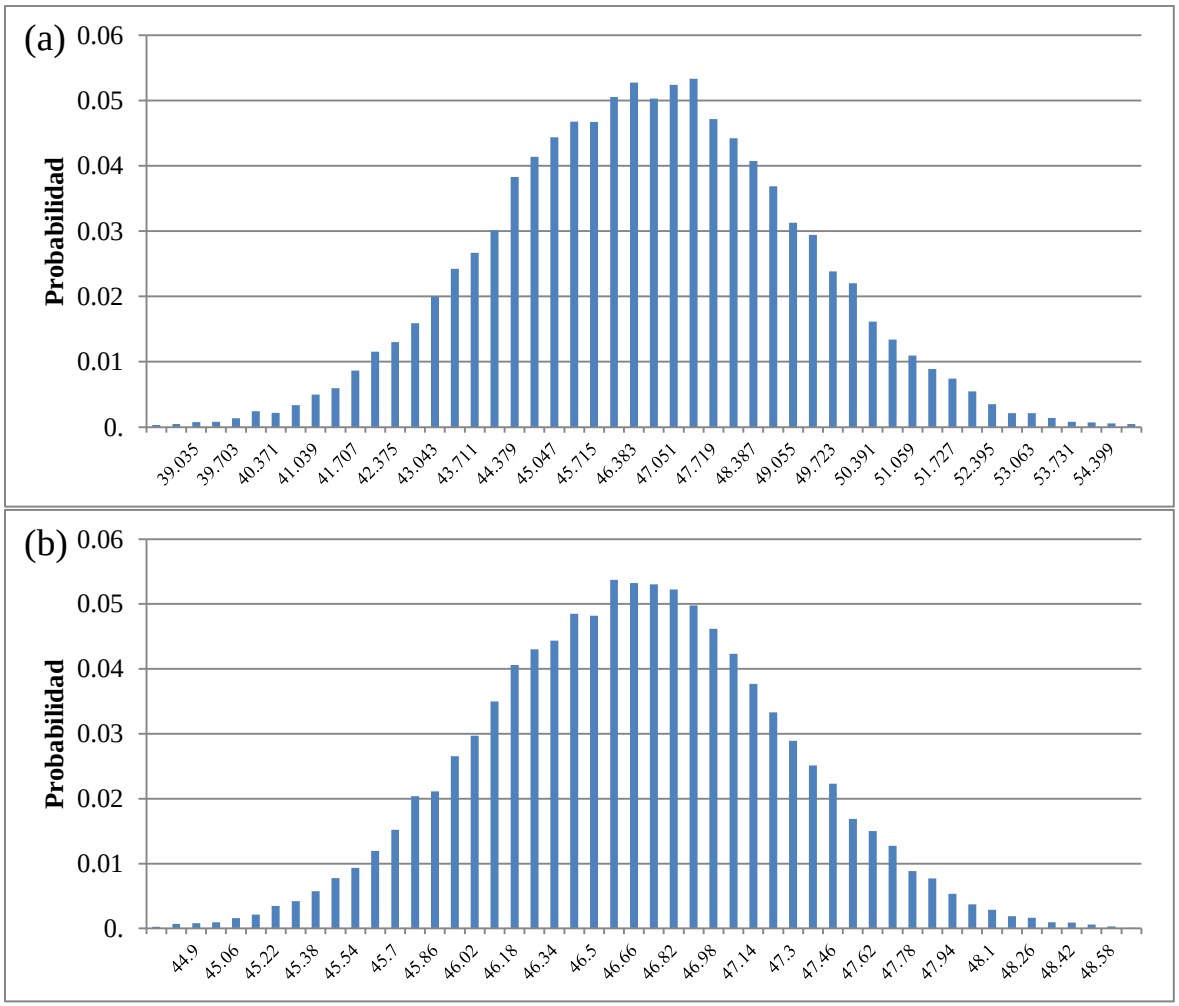

Figura 15. Dispersión de incertidumbre de *Cambio climático* en (a) generación de energía mediante biogás utilizando mediciones *in situ* y (b) generación de energía mediante biogás utilizando parámetros de literatura.

Los oxidantes fotoquímico son productos de reacciones entre óxidos de hidrocarburos iniciados por reacciones activadas por el sol. Estas sustancias no representan un problema a bajas concentraciones. Sin embargo, el ecosistema puede verse deteriorado a un incremento a condiciones de smog (Jain Ravi, 2012). El CO, el SO_2 y los compuestos NO_x son potenciales formadores de oxidantes fotoquímicos. Éstos componentes pueden propiciar la formación de ozono troposférico (McQueen Charlene A., 2010). Este fenómeno es un potencial daño a los seres vivos.

El monóxido de carbono, el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno son componentes emitidos durante la combustión. Por lo que la generación de energía mediante biogás tiene una influencia directa en la incertidumbre de la categoría de *Formación de oxidantes fotoquímicos*.

La incertidumbre en la Formación de oxidantes fotoquímicos se muestra en la Figura 16. Ésta incertidumbre fue calculada con información completamente de literatura. Los flujos de emisión relacionados con la formación de oxidantes fotoquímicos en el inventario fueron calculados utilizando los parámetros de la EPA-AP42.

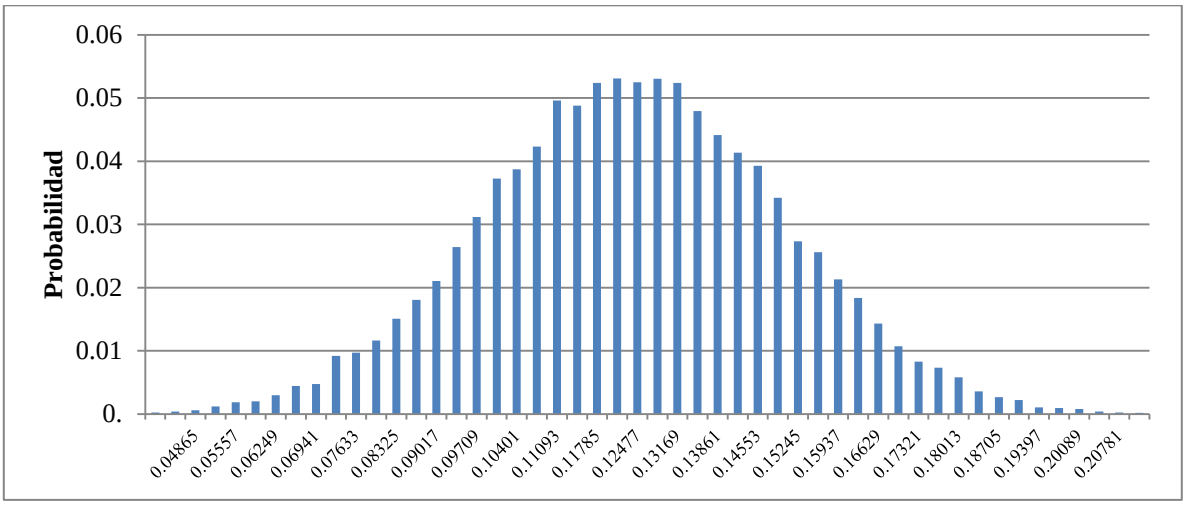

Figura 16. Dispersión de incertidumbre en la categoría de *Formación de oxidantes fotoquímicos*.

La formación de partículas es un fenómeno común en procesos que involucran combustión. En el proceso de generación de energía mediante biogás provoca la emisión de partículas. Principalmente en el rango menor a 2.5 μm, y menores a 10 μm. También las emisiones de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno propician la formación de partículas.

La Figura 17 muestra la dispersión de incertidumbre de la categoría de *Formación de partículas*. La incertidumbre de ésta categoría de impacto proviene principalmente de

información de literatura, específicamente, de los parámetros de la EPA-AP42. Se observa una curva normalizada.

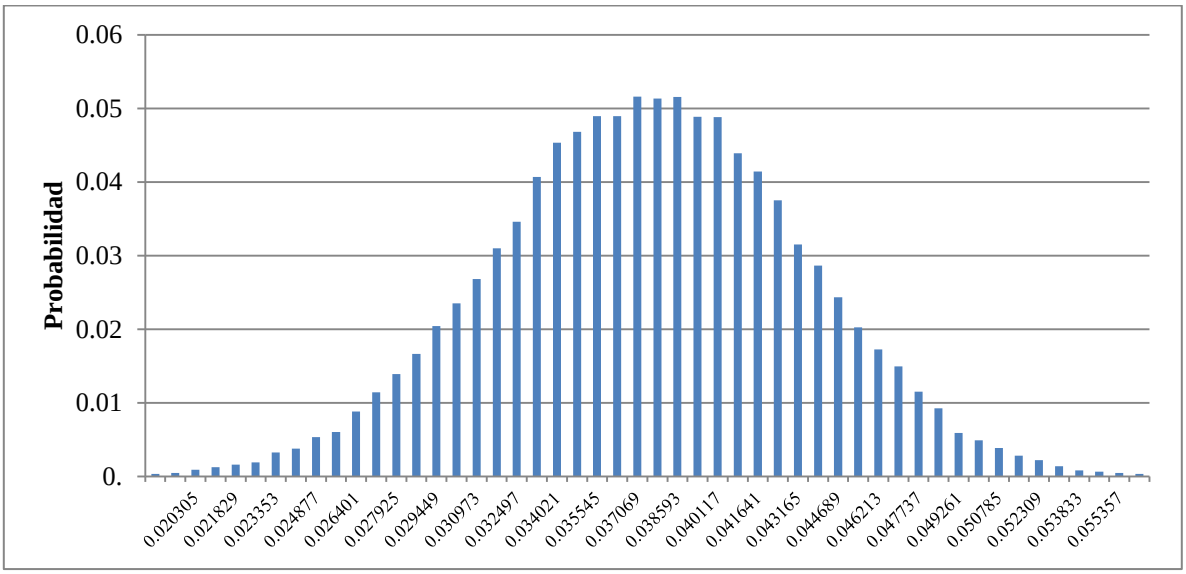

Figura 17. Dispersión de incertidumbre en la categoría de Formación de partículas.

La acidificación de la tierra es ocasionada por la combinación de componentes como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno con agua (Selley Richard C., 2005). Estos componentes suelen ser productos provenientes de la combustión. Es por eso que la generación de energía tiene un impacto directo a ésta categoría. La Figura 18 muestra la dispersión de la incertidumbre de la categoría de acidificación terrestre. Los parámetros de dispersión de las emisiones fueron obtenidos principalmente de la EPA-AP42.

Las categorías de *Cambio climático*, *Formación de oxidantes fotoquímicos*, *Formación de partículas* y *Acidificación terrestre*, son directamente influidas por la generación de energía eléctrica. Esto debido a los gases de combustión generados en la turbina. Se puede apreciar que la mayoría de las emisiones que contribuyen a éstas categorías de impacto provienen de información en literatura.

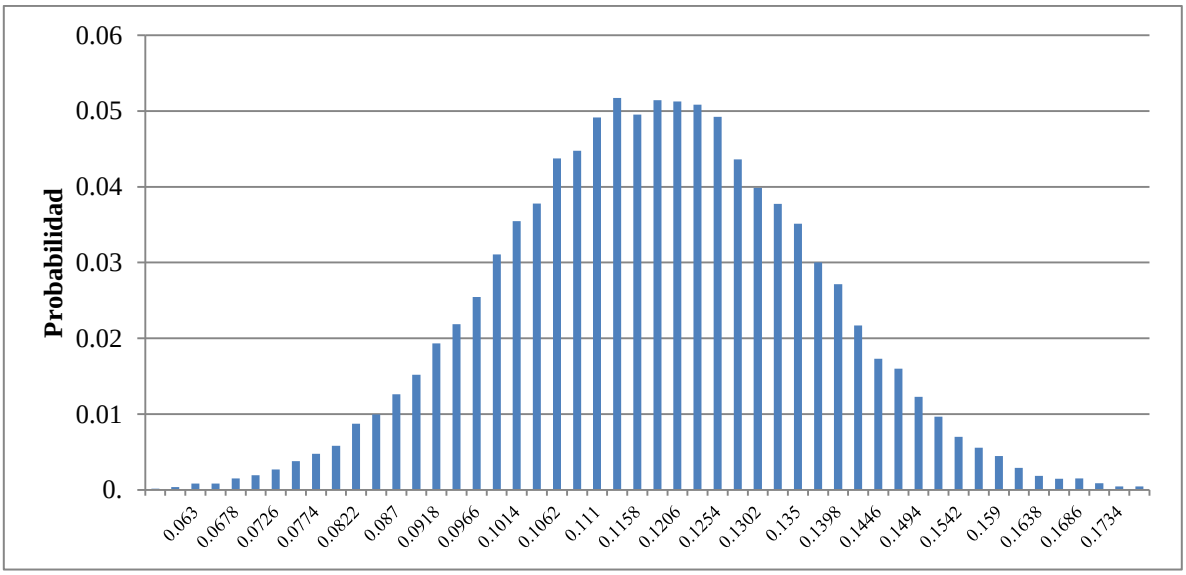

Figura 18. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Acidificación terrestre.

6.5.2 Dispersión de la incertidumbre en emisiones al agua.

Las emisiones al agua se deben principalmente a la Digestión anaerobia. En ella se consumen grandes cantidades de agua, la cual es aprovechada como medio de transporte del sustrato en el biodigestor. Las emisiones al agua son principalmente el fósforo, ion amonio, y una variedad de elementos contaminantes.

La incertidumbre se debe principalmente al rango de emisiones al agua, las variaciones desconocidas del muestreo y la incertidumbre en los métodos de medición. El uso de tiras reactivas para la determinación de NH_4^+, tiene un amplio rango de incertidumbre, aunado a la incertidumbre por variables desconocidas en los muestreos. Por otra parte, en las mediciones por ICP-OES, la incertidumbre proviene no solo de la muestra; también puede provenir de errores en la medición, el muestreo y errores espectrales.

Las categorías de impacto que son influenciadas por las emisiones al agua por parte de la digestión anaerobia son: *Agotamiento de la capa de ozono*, *Toxicidad humana*, *Radiación ionizante*, *Eutrofización del agua*, *Ecotoxicidad terrestre*, *Ecotoxicidad del agua* y *Agotamiento del agua*.

El *Agotamiento de la capa de ozono* no es una consecuencia directa por parte de la digestión anaerobia. En realidad proviene del consumo de hidróxido de sodio, el cual demanda otros procesos indirectos. La incertidumbre en ésta categoría se debe principalmente a las emisiones indirectas reportadas en la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013). La Figura 19 muestra la dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Agotamiento de la capa de ozono*. A diferencia de las dispersiones anteriores, se observa una curva más sesgada hacia la izquierda. No se reportan parámetros de incertidumbre respecto al consumo de hidróxido de sodio, debido a que el consumo diario administrado para el lavado de biogás es muy parecido. La incertidumbre proviene únicamente de información de literatura.

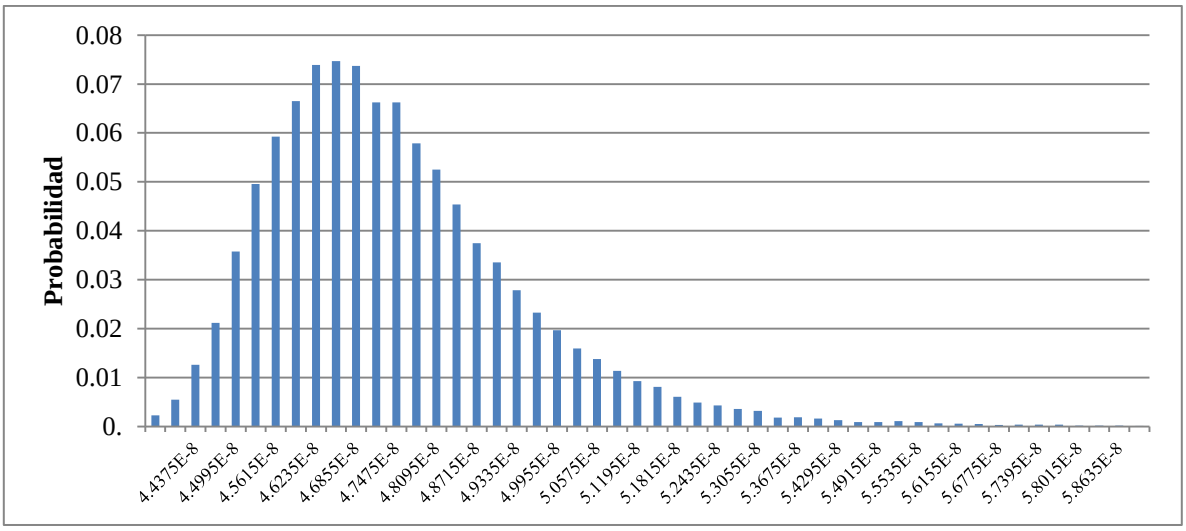

Figura 19. Dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Agotamiento de la capa de ozono*.

La *Eutrofización del agua* generalmente se entiende como una excesiva producción primaria, consecuencia de un alto suministro de nutrientes (Hester R.E. Harrison, 1996). La eutrofización engloba un declive en la productividad de algunas especies y el valor antiestético de un sistema de agua (Eckenfelder W. Wesley, 2004). La Figura 20 muestra la dispersión de la incertidumbre de la categoría de *Eutrofización del agua*. La incertidumbre en ésta categoría se debe principalmente a emisiones indirectas. Un componente importante también en la *Eutrofización del agua* es el fósforo emitido por el digestor. Sin embargo, no fue posible realizar una medición *in situ* sobre éste elemento. Se puede observar una curva más sesgada hacia la izquierda. Los parámetros de incertidumbre provienen de emisiones indirectas obtenidas de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013).

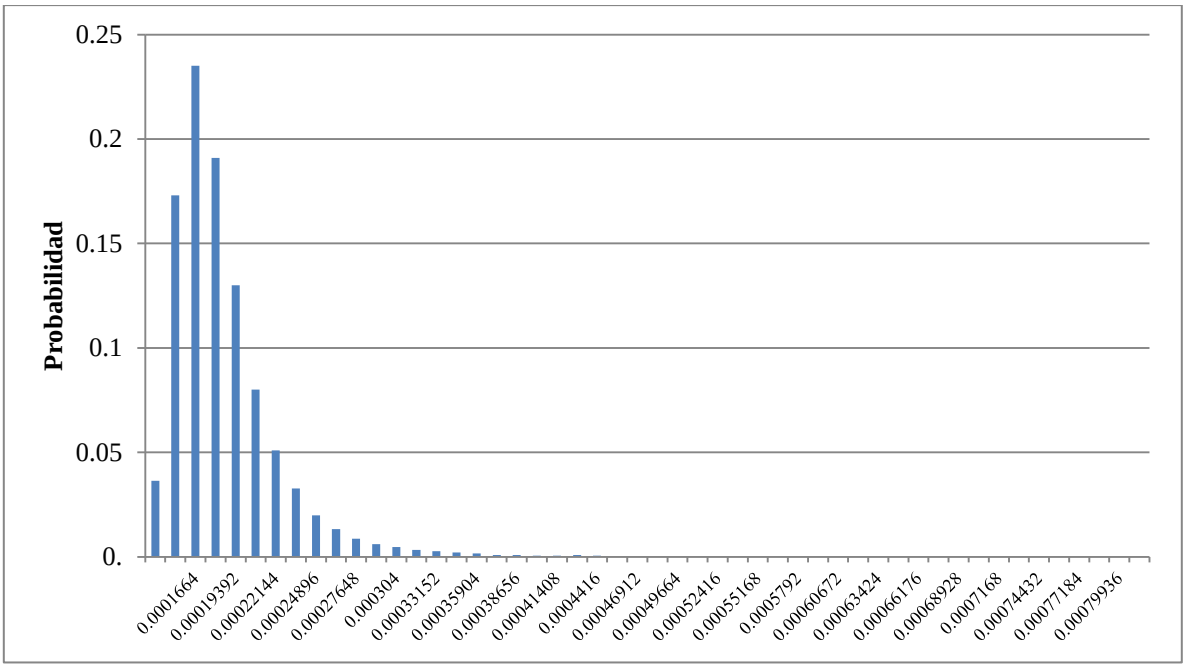

Figura 20. Dispersión de incertidumbre de *Eutrofización del agua*.

En la categoría de *Ecotoxicidad del agua* hay una participación de diferentes elementos analizados. Los elementos como plomo, zinc, níquel y arsénico contribuyen a ésta categoría. La Figura 21 muestra la dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Ecotoxicidad del agua*. Se observa también una curva sesgada hacia la izquierda.

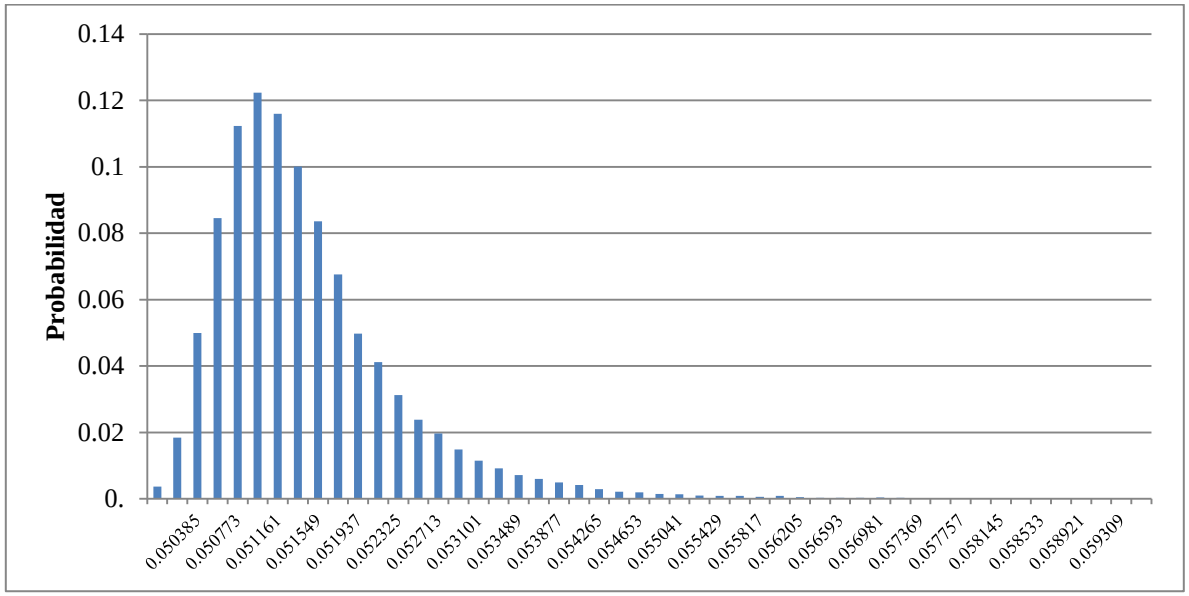

Figura 21. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Ecotoxicidad del agua.

Diversos elementos como el arsénico y el plomo liberados al agua tienen un efecto en la corteza terrestre. La categoría de Ecotoxicidad terrestre de ReCiPe considera esta potencial toxicidad. La Figura 22 muestra la dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Ecotoxcidad terrestre*. Se puede observar, que al igual que las figuras Figura **19**, Figura **20** y Figura **21**, la dispersión se ve sesgada hacia la izquierda.

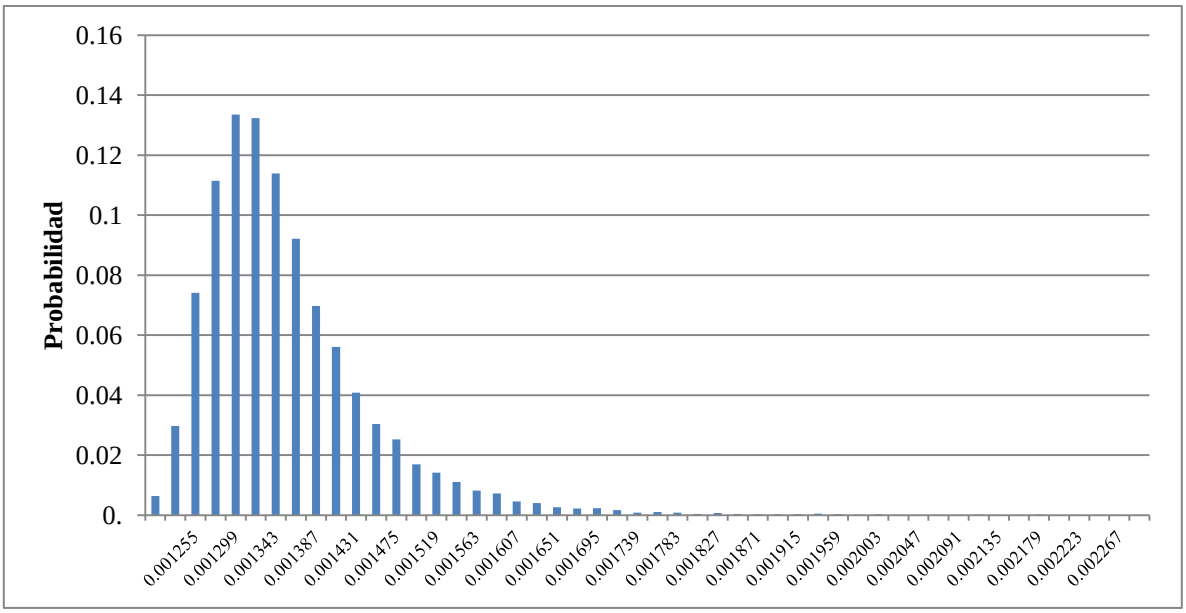

Figura 22. Dispersión de incertidumbre en la categoría de *Ecotoxicidad terrestre*.

El agotamiento del agua en el proceso se debe a su uso en la digestión anaerobia. La Figura 23 muestra la dispersión de incertidumbre en la categoría de *Agotamiento del agua*. Se puede observar una curva menos sesgada que las anteriores.

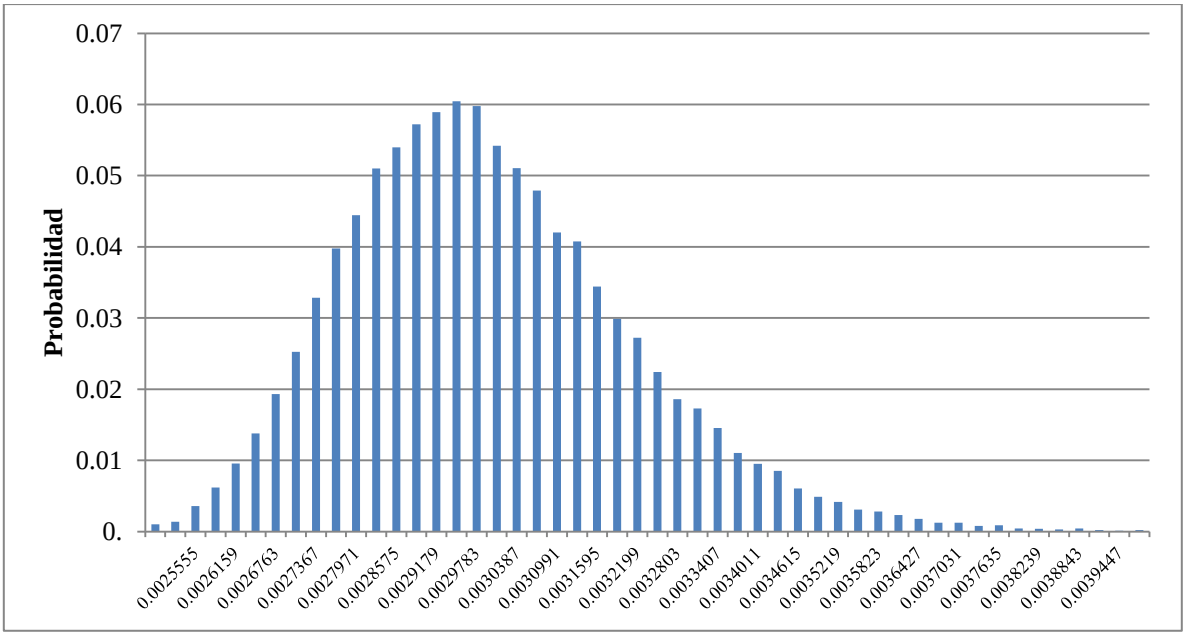

Figura 23. Dispersión de incertidumbre de la categoría de Agotamiento del agua.

Las categorías de impacto anteriores no presentan diferencias significativas al omitir los parámetros de dispersión. En cambio, la categoría de *Toxicidad humana* presenta cambios bastante significativos al incluir los parámetros de dispersión obtenidos por mediciones. La Figura 24 muestra los parámetros de dispersión de la categoría de *Toxicidad humana*. La Figura 24(a) Muestra la dispersión de incertidumbre considerando los parámetros obtenidos de las mediciones *in situ*, mientras que la Figura 24(b) muestra la dispersión solo considerando los parámetros de dispersión obtenidos de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013).

Se puede observar en la Figura 24(a) una dispersión menos sesgada que la de la Figura 24(b). Estas diferencias reflejan que las emisiones al agua, tiene un efecto más significativo en la dispersión de la categoría de *Toxicidad humana*, comparado con las categorías anteriores. Como se observa en la Tabla 6.8, el arsénico es el que tiene mayor incertidumbre de los elementos analizados mediante ICP-OES. También este elemento tiene un efecto significativo en la categoría de *Toxicidad humana*.

La toxicidad del arsénico actualmente ha sido ampliamente estudiada (Bowell Robert J., 2015). Para ReCiPe midpoint, en la categoría de *Toxicidad humana*, el arsénico tiene un equivalente de 1,4-diclorobenceno de 3.56E+5. Por lo que, a pesar de tener bajas concentraciones, un parámetro de incertidumbre alto tiene un efecto significativo en la incertidumbre de ésta categoría de impacto.

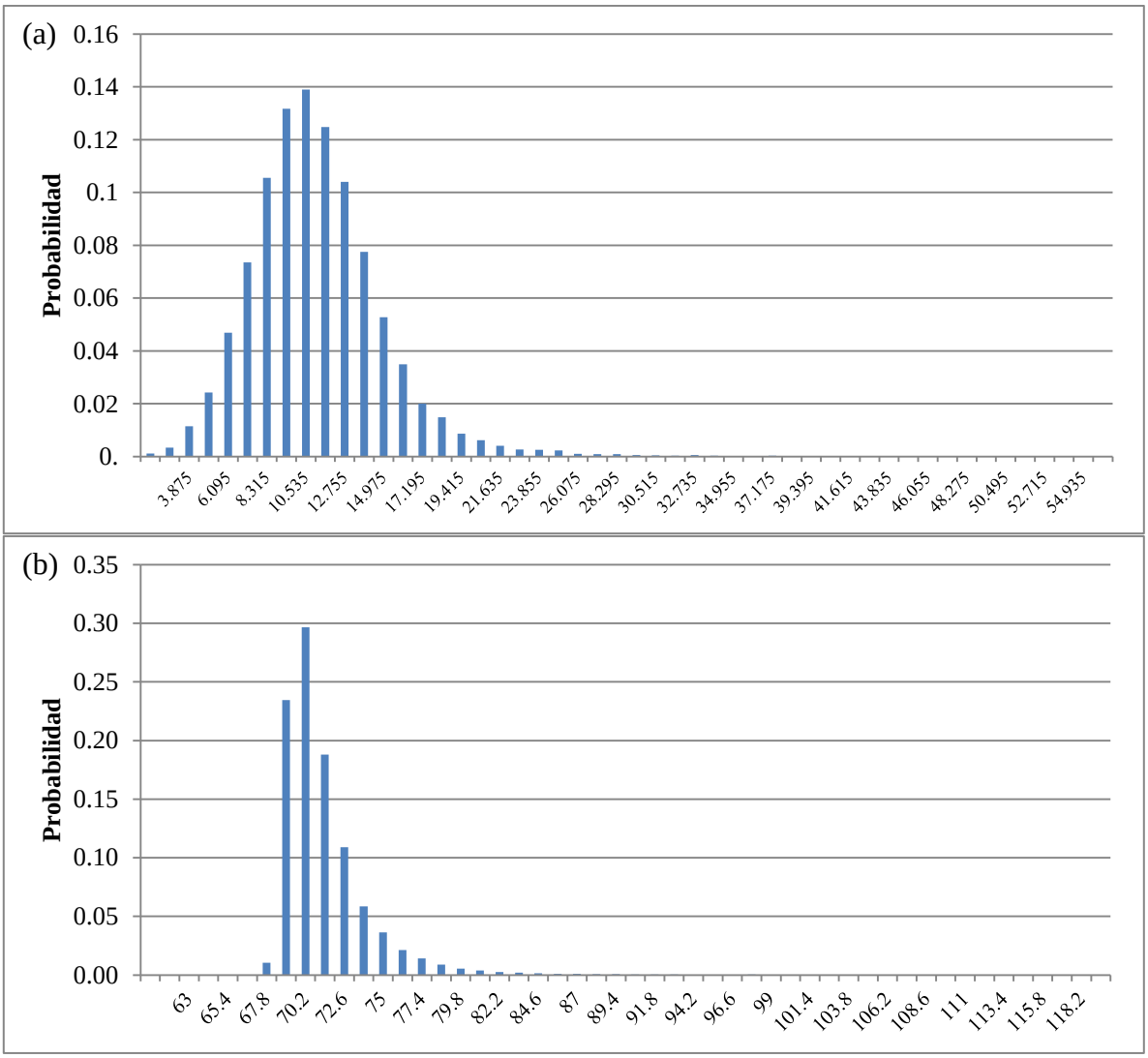

Figura 24. Dispersión de la incertidumbre en la categoría de *Toxicidad humana* (a) considerando parámetros de dispersión obtenidos de mediciones *in situ* y (b) considerando parámetros de dispersión considerando solo parámetros de dispersión obtenidos de literatura.

7 Discusión.

7.1 Identificación de etapas del sistema.

Se identificaron las etapas del sistema con el fin de identificar las áreas de oportunidad en el ACV. El sistema fue separado en: (i) generación de energía eléctrica, (ii) digestión anaerobia, (iii) recolección de excreta, (iv) infraestructura de los establos y (v) infraestructura de la planta generadora de energía eléctrica. Como se comenta en el capítulo 5.3, la digestión anaerobia se separa en i) pre-tratamiento, ii) biodigestión y iii) separación. La etapa de pre-tratamiento (Figura 6) cuenta con dos operaciones de separación. Conforme a las observaciones realizadas en la planta, se encontró que solo se aprovecha una pequeña fracción de materia orgánica. Se utilizan grandes cantidades de agua en el tanque de mezclado. También hay una alta demanda de energía en el separador de sólidos (Figura 6). Este alto consumo de recursos puede verse reducido con ajustes para incrementar la eficiencia. Actualmente existen nuevas tecnologías, las cuales permiten un mejor separado de excreta, permitiendo reducir el consumo de agua al mínimo y la posibilidad de usar digestores más pequeños. Una alternativa de solución es la implementación de un procesador aeróbico de excreta. Su uso reduciría el consumo de agua. El siguiente enlace muestra un equipo procesador de excreta aerobio:

http://www.presstechnology.com/composter-aerobic-manure-processor/ (Press technology and manufacturing, n.d.).

El proceso de biodigestión (Figura 7), genera la cantidad suficiente de biogás para la capacidad de la planta generadora de energía eléctrica. Sin embargo, ésta etapa es poco controlada. Los cambios de temperatura en esa zona dificulta controlar los parámetros de operación. La inclusión de indicadores para un monitoreo constante permitiría facilitar el control del proceso.

El proceso de separación cuenta con diferentes operaciones unitarias para la remoción de H_2S. Sin embargo, la eficiencia de estas operaciones es desconocida. Éste sistema no fue planificado en condiciones óptimas, sino que se ha estado incorporando modificaciones conforme a las necesidades. Los estudios a futuro en el proyecto SENER 243715, se enfocan a implementar mejoras a ésta etapa de separación.

7.2 Caracterización de emisiones.

La caracterización de las emisiones en el sistema general (Figura 5) es una actividad importante dentro de los objetivos del estudio. Se buscó obtener los flujos de emisión mediante mediciones hechas *in situ*. En los capítulos 6.1 y 6.2 se presentan los resultados de las mediciones.

7.2.1 Emisiones al aire.

Se realizó la caracterización de las emisiones por la combustión de biogás mediante cromatografía de gases. También se utilizaron parámetros de la EPA-AP42, considerando sus parámetros de dispersión de incertidumbre.

Se puede observar en la Tabla 6.3, que existe un alto porcentaje de aire en la salida del digestor. Seguido se encuentra un porcentaje notable de CO_2. La desviación estándar de los tres parámetros calculados, muestran cierta precisión en la medición. Sin embargo, ésta desviación estándar es obtenida únicamente por el número de muestras y mediciones. No se consideró la incertidumbre durante la medición en la cromatografía de gases. La medición fue hecha mediante un dispositivo de muestreo construido específicamente para el estudio (ANEXO I). La incertidumbre por parte de la colección de muestra no es contemplada en las desviaciones estándar de las emisiones al aire.

Los cálculos realizados mediante la Ecuación 4, son presentados en el ICV de la Tabla 6.9. Las emisiones de CO_2 y aire, tienen un alto valor en la desviación estándar en comparación con los obtenidos de los parámetros de la AP42. Sin embargo, los resultados tienen una mayor precisión respecto a la media, que las concentraciones en las emisiones al agua (Tabla 6.8).

7.2.2 Emisiones al agua.

Se puede observar en las Tablas Tabla 6.1 y Tabla 6.2 la emisión de elementos en cantidades traza y ultra traza. La acumulación de metales se debe posiblemente a la concentración de éstos en el alimento del ganado, así como el consumo de medicamentos. Sin embargo, son necesarias otras investigaciones enfocadas al respecto para identificar su origen.

Elementos como el arsénico, el bario y el manganeso tienen desviaciones estándar altas en comparación con la media. El Manganeso tiene una desviación estándar ~300% mayor que la media. La incertidumbre en la categoría de impacto de *Toxicidad humana* proviene del arsénico, pues tiene mayor efecto que los demás materiales. Se puede observar en la Figura 13, como la sub-etapa de producción de biogás contribuye en >30% del total. En secciones posteriores se discutirá de la relación entre la incertidumbre y los valores calculados.

7.3 Relación ICV, EICV e incertidumbre

Se observa en la Figura 1 una mayor contribución de la infraestructura en general. La planta generadora de energía eléctrica, tiene un importante efecto en: Ocupación de suelo agrícola, *Radiación ionizante*, *Ocupación de suelo urbano*, *Transformación de suelo*

natural, *Agotamiento de agua* y *Agotamiento de metales*. Las categorías están relacionadas al agotamiento de recursos. Otra categoría asociada al agotamiento de recursos es el *Agotamiento de combustibles fósiles*. La infraestructura de los establos tiene un aporte de más del 80% del total. El origen del alto porcentaje de la infraestructura en éstas categorías fue obtenida de la base de datos Ecoinvent (Weidema, B.P., et al., 2013). Así mismo, la reconstrucción o remodelación de las instalaciones no es relevante para el estudio. Por lo cual, éstas categorías tienen pocas áreas de oportunidad para implementación de mejoras.

Una etapa de importancia en la carga ambiental es la recolección de excreta. El uso de un tractor para la colección y transporte de excreta es una actividad difícil de modificar. Sin embargo, es posible realizar estudios de optimización en el recorrido de los corrales para recolección de excreta. De esta forma se ofrece una solución rápida y de fácil aplicación para reducir el consumo de combustible. Por otra parte, es posible mitigar la carga ambiental considerablemente en las categorías de *Toxicidad humana*, *Formación de oxidantes fotoquímicos*, *Formación de partículas* y *Acidificación terrestre*.

La generación de energía eléctrica es la es la etapa que más contribuye a la categoría de *Cambio climático*. Las categorías de *Formación de oxidantes fotoquímicos*, *Formación de partículas* y *Acidificación terrestre*, también tienen un efecto proveniente de la generación de energía. Sin embargo éste efecto corresponde a menos del 10% del total. Por lo que la generación de energía eléctrica es el punto de oportunidad más relevante en la categoría de *Cambio climático*.

La incertidumbre en *Cambio climático*, presenta cambios al reemplazar la información colectada de literatura, por las obtenidas de mediciones. La Figura 15 muestra como la dispersión de incertidumbre usando parámetros obtenidos de medición (Figura

15(a)) tiene un rango más amplio que el obtenido mediante los parámetros de la EPA-AP42 (Figura 15(b)). Así mismo, la categoría de *Cambio climático* también tiene una desviación estándar mayor que la obtenida mediante parámetros de literatura (sección 6.5.1). La incertidumbre en ésta medición se puede deber a diversas causas. Primero, el método de medición, si bien es funcional a las necesidades que se emplean, no es un método validado, por lo el aporte de la incertidumbre es considerable. La incertidumbre en la cromatografía de gases también es un factor importante. Por último, la turbina Capstone C30 es una tecnología apta para las condiciones del biogás. Sin embargo, los cambios atmosféricos son variables no controladas que también afectan la variación en las mediciones. Se desconocen los métodos de medición utilizados en los parámetros de la EPA-AP42; por lo que no se pueden comparar desde una perspectiva de métodos de muestreo. La Figura 25 muestra la dispersión de incertidumbre en la emisión de CO_2 de la producción de energía mediante incineración de residuos. Se observa un comportamiento similar a los reportados en la dispersión de incertidumbre de la categoría de *Cambio climático* (Figura 15(a)).

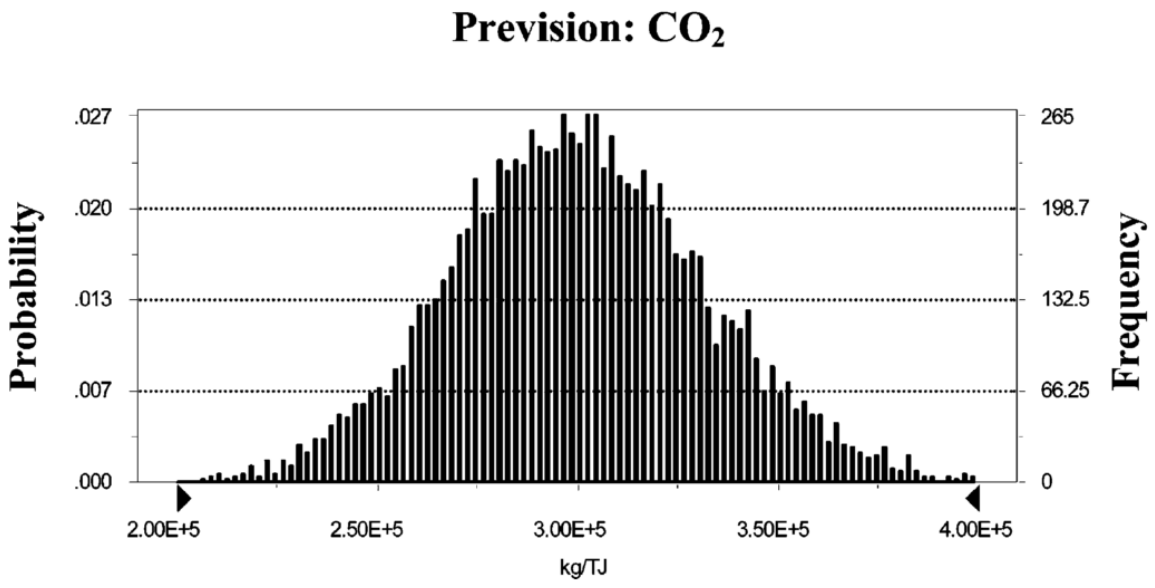

Figura 25. Dispersión de incertidumbre de la emisión de CO_2 en la generación de energía mediante incineración de residuos (Sonnemann et al., 2003).

La producción de biogás tiene su efecto en la carga ambiental debido a las emisiones al agua. Las categorías de *Toxicidad humana*, *Radiación ionizante*, *Eutrofización del agua*, *Ecotoxicidad terrestre*, *Ecotoxicidad del agua*, *Ocupación de suelo agrícola* y *Agotamiento del agua*, tienen un aporte en la carga ambiental por parte de la producción de biogás. Esta contribución es pequeña en comparación con otras etapas del sistema. Es de esperar que la incertidumbre de categorías como *Agotamiento de la capa de ozono*, *Eutrofización del agua*, *Ecotoxicidad del agua*, *Ecotoxicidad terrestre* y *Agotamiento del agua*, no haya una diferencia significativa con la inclusión de parámetros obtenidos de mediciones.

Sin embargo, la categoría de *Toxicidad humana* si muestra cambios significativos. Se puede observar en la Figura 24, las diferencias entre la inclusión de las mediciones hechas *in situ* (Figura 24(a)), y sin parámetros de dispersión. Para los parámetros de dispersión calculados en la medición (Tabla 6.8) se consideraron las repeticiones hechas en

el ICP-OES y las obtenidas en las muestras y sus duplicados. Los datos detallados sobre las mediciones hechas mediante ICP-OES se encuentran en el ANEXO II.

A pesar de haber obtenido cantidades ultra traza en la medición, la incertidumbre en la categoría de *Toxicidad humana* refleja la incertidumbre de las mediciones de las Tablas Tabla 6.1 y Tabla 6.2. Esto se puede observar en la Figura 14. En ella se muestra un margen de error de ~100%. La Figura 24, corrobora que hay un efecto significativo en la incertidumbre por parte de la medición. Sin embargo, la producción de biogás aporta menos del 5% de toda la carga ambiental en ésta categoría. Este efecto por parte de las mediciones se debe al arsénico. Este elemento tiene un valor muy alto de equivalente de 1,4-Diclorobenceno (3.56E+5). Como se observa en las Tablas Tabla 6.1 y Tabla 6.2, hay mucha incertidumbre en la medición del arsénico. Esto es debido a los errores espectrales comunes en la medición de arsénico por éste método. Para la obtención de concentraciones de arsénico más precisas, se sugieren métodos otros métodos, como absorción atómica por generador de hidruros. Sin embargo, como se menciona en la sección 6.1, la concentración de arsénico no supera los límites máximos permisibles de las normas mexicanas. Aunque es importante señalar que debido a su alto potencial de *Toxicidad humana*, deben se requieren estudios más profundos.

La incertidumbre en la emisión de metales como los que contribuyen a la categoría de *Toxicidad humana*, es similar en estudios de ACV. Las Figuras Figura **26** y Figura **27** muestran la dispersión de incertidumbre del estudio de Sonnemann et al. (2003), en el cual se realiza un estudio de ACV utilizando el método Monte Carlo para el cálculo de incertidumbre. Se pueden observar comportamientos similares a los de la Figura 24. La

incertidumbre en *Toxicidad humana* se ve influenciada principalmente por la emisión de arsénico.

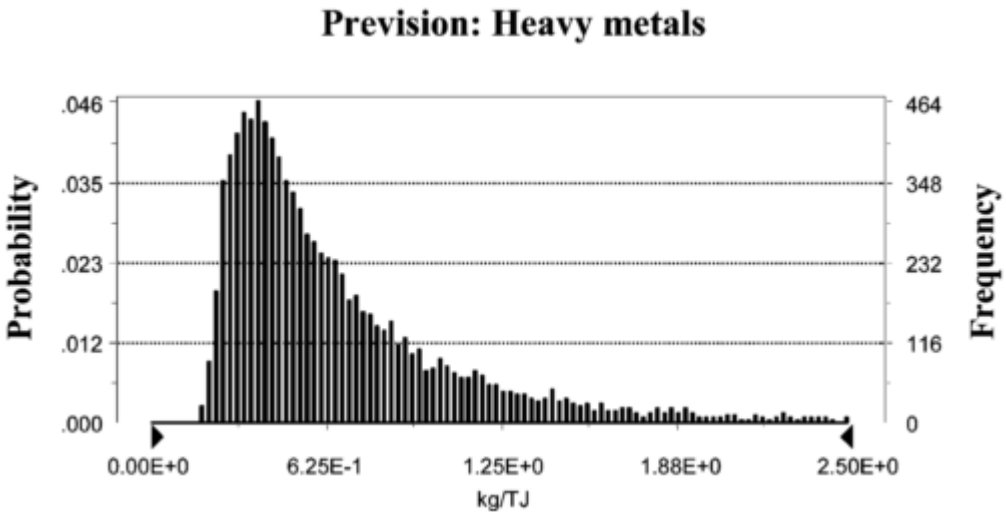

Figura 26. Dispersión de incertidumbre en la emisión de metales pesados de la generación de energía mediante incineración de residuos (Sonnemann et al., 2003).

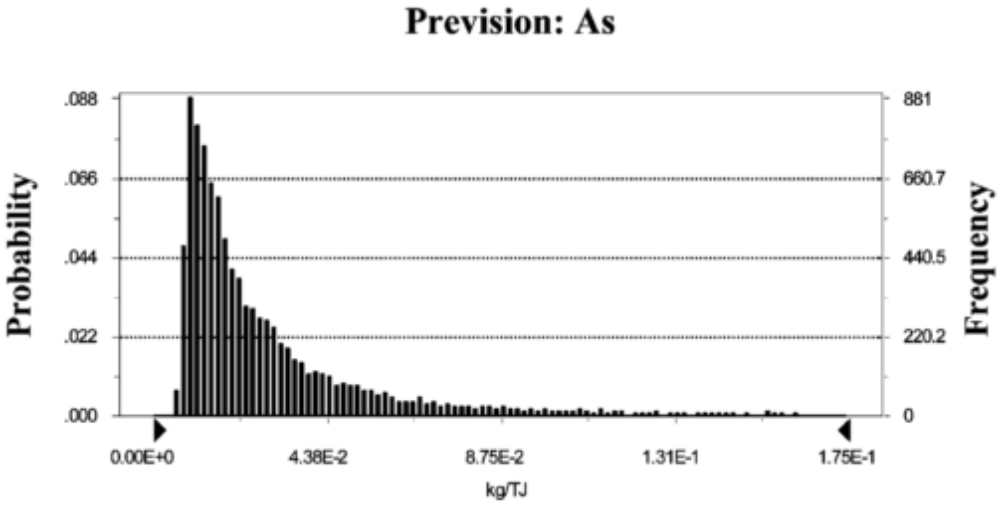

Figura 27. Dispersión de incertidumbre en la emisión de arsénico en la generación de energía mediante incineración de residuos(Sonnemann et al., 2003).

Desde el enfoque de la incertidumbre, las categorías que más importancia tienen al estudio son el *Cambio climático* y la *Toxicidad humana*. Se puede observar en la Figura

15(a), una dispersión de incertidumbre normalizada en *Cambio climático*. En cambio, se observa una curva sesgada hacia la izquierda en la categoría de *Toxicidad humana*. Otra parte importante a señalar es el margen de error en la Figura 14, la cual muestra un margen de error mucho mayor en la categoría de *Toxicidad humana* que en *Cambio climático*. La categoría de *Cambio climático* tiene una relación directa con las emisiones al aire, mientras que la categoría de *Toxicidad humana* la tiene con las emisiones al agua. Con ésta información se corrobora lo planteado en la hipótesis (Sección 3). En ella se señala que las emisiones al agua aportan la mayor incertidumbre al estudio.

La incertidumbre en las emisiones al agua se debe principalmente a la falta de control en la producción de biogás. Un proceso controlado y de mejor aprovechamiento de sustrato permitiría no solo parámetros con menor incertidumbre; también un proceso sostenible y menos emisiones. El digestato puede ser aprovechado como fertilizante. Su uso permitiría reducir las emisiones al agua al mínimo y aprovechar mejor el sustrato.

8 Conclusión.

- Fue posible identificar áreas de oportunidad desde la caracterización de las etapas. Se observó que es posible mejorar la etapa de Pre-tratamiento (Figura 6), implementando tecnologías más eficientes. La etapa de Biodigestión (Figura 7) requiere la implementación de sistemas de monitoreo. Otra etapa con potenciales puntos de mejora es la recolección de excreta, se sugeriría un estudio en el que se proponga un recorrido óptimo para reducir el consumo de combustible. Este último mitigaría las emisiones en muchas de las categorías de impacto. La disposición de

residuos no es la más adecuada. Además, los residuos tienen potenciales aplicaciones como fertilizantes.

- El dispositivo de muestreo de gas en una chimenea fue funcional para el estudio. Sin embargo, es necesario realizar mejoras en el dispositivo para evitar que éste genere incertidumbre para la medición. Las concentraciones obtenidas mediante la cromatografía de gases, si bien tienen una mayor incertidumbre que la reportada en información de literatura, son valores aceptables. Es importante considerar las posibles razones de que el estudio varíe.
- El uso de tiras reactivas para la medición de ion amonio en agua es una herramienta práctica. Sin embargo, aporta una incertidumbre considerable. Se propone utilizar métodos analíticos más precisos para la determinación de ésta sustancia. Por otra parte, se considera al ICP-OES, una herramienta útil y factible para caracterizar emisiones al agua en el ACV. Este método permite obtener una gran variedad de elementos en una sola medición, por lo que cubre la necesidad de ahorrar tiempo en el proceso en ocasiones extenso del desarrollo de inventarios. Sin embargo, el arsénico requiere de métodos más precisos para evitar incertidumbre por parte de la medición.
- Es importante considerar la incertidumbre por parte de las mediciones. Sin embargo, también es importante el uso de métodos prácticos de medición para que un ACV sea factible. El desarrollo de inventarios es un proceso exhaustivo, que demanda tiempo. Una opción viable para el desarrollo de inventarios es la delegación de partes del ICV en proyectos paralelos de diferentes ámbitos. El desarrollo de un inventario que incluya resultados obtenidos de medición, permite

complementar la información la información en inventarios regionales y aplicables a nivel nacional.

- El uso de Monte Carlo en la herramienta SimaPro, permitió encontrar las categorías de impacto con mayor incertidumbre. También se identificaron las categorías de impacto en que las mediciones hechas *in situ*
- tienen un efecto. Se puede observar en las Tablas Tabla 6.1 y Tabla 6.2, una desviación estándar mayor respecto a la media que en la Tabla 6.3. En base a las categorías de *Cambio climático* y *Toxicidad humana*, se puede observar una mayor precisión en la primera. Esto debido a que la medición de elementos como el arsénico tienen un impacto importante en la categoría de *Toxicidad humana*. Debido a la incertidumbre por parte de las mediciones en ICP-OES, el arsénico tiene una incertidumbre considerable, lo cual se ve reflejada en la categoría de *Toxicidad humana*. En cambio, *Cambio climático* presenta una mayor precisión respecto a la media. Por tanto, se concluye que hay una mayor incertidumbre en las emisiones al agua respecto a las emisiones al aire.
- Para estudios posteriores, se sugiere las mediciones *in situ* de las emisiones a lo largo de un año. De manera que se consideren los posibles cambios, principalmente en las condiciones de operación en el digestor.

9 Referencias.

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Ojeda-Benítez, S., & Cruz-Sotelo, S. (2014). Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with *in situ* parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *30*, 412–419. http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.014

Amienyo, D., & Azapagic, A. (2016). Life cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the UK. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(4), 492–509. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1028-6

Arcese, G., Lucchetti, M. C., Massa, I., & Valente, C. (2016). State of the art in S-LCA: integrating literature review and automatic text analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–12. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1082-0

Balanay, R. M., & Halog, A. (2016). Promoting life cycle thinking for sustainability in the mining sector of the Philippines. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–11. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1105-x

Bansal, S. K., Sreekrishnan, T. R., & Singh, R. (2013). Effect of Heat Pretreated Consortia on Fermentative Biohydrogen Production from Vegetable Waste. *National Academy Science Letters*, *36*(2), 125–131. http://doi.org/10.1007/s40009-013-0124-4

Basset, N., Dosta, J., & Mata-Alvarez, J. (2012). Start-up of an AnMBR for winery wastewater treatment. *IWA Congress Anaerobic Digestion*, *86*, 4. http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.003

Blanco, J. M., Finkbeiner, M., & Iniba, A. (2015). *Guidance on Organizational Life Cycle Assessment*. (Thad Mermer, Ed.). United Nations Environment Program.

Bowell Robert J., A. C. N. J. H. E. N. D. K. M. J. (2015). 8.3 Arsenic Toxicity. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Volume 79 - Arsenic - Environmental Geochemistry, Mineralogy, and Microbiology*. De Gruyter. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010RBL1V/reviews-in-mineralogy/arsenic-toxicity

Burroughs, W. J. (2007). *Climate Change, A Multidisciplinary Approach* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press.

Clavreul, J., Guyonnet, D., & Christensen, T. H. (2012). Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Management*, *32*(12), 2482–2495. http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.008

Cleveland, C. J., & Morris, C. (2009). *Dictionary of Energy (Expanded Edition) - Knovel*. Elsevier. Retrieved from https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDEEE0001/viewerType:toc/root_slug:dictionary-energy-expanded/url_slug:bioenergy?b-q=Bioenergy&b-subscription=TRUE&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default&issue_id=kt007STFA9

Cortes-Rodríguez, E. F., Nebra, S. A., & Sosa-Arnao, J. H. (2016). Experimental efficiency analysis of sugarcane bagasse boilers based on the first law of thermodynamics.

Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, *39*(3), 1033–1044. http://doi.org/10.1007/s40430-016-0590-y

Das, R. K., & Sharma, S. K. (2016). Fuel characterization and performance parameters analysis of diesel engine using blends of palm biodiesel and tyre pyrolysis oil. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 1–7. http://doi.org/10.1007/s40430-016-0696-2

De, B., & Panua, R. S. (2014). An experimental study on performance and emission characteristics of vegetable oil blends with diesel in a direct injection variable compression ignition engine. *Procedia Engineering*, *90*, 431–438. http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.873

de Lemos Chernicharo, C. A. (2007). 2. Principles of Anaerobic Digestion. *Anaerobic Reactors, Volume 4*. IWA Publishing. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U9YI43/anaerobic-reactors-volume/principles-anaerobic

Deere and Company. (n.d.). Consumo de combustible. Retrieved August 4, 2017, from https://www.deere.com.mx/es_MX/services_and_support/tips/engines/fuel_effiency/fuel_engines.page

Dodge, Y. (2008). Categorical Data. *The Concise Encyclopedia of Statistics*, 60–145. http://doi.org/10.1007/0-8176-4444-X_6

Dressler, D., Loewen, A., & Nelles, M. (2012). Life cycle assessment of the supply and use of bioenergy: impact of regional factors on biogas production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *17*(9), 1104–1115. http://doi.org/10.1007/s11367-012-0424-9

Eckenfelder W. Wesley, H. W. N. (2004). 2.2.2 Eutrophication. *Understanding Water Quality Management - Technology and Applications*. DEStech Publications. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008C9FK1/understanding-water-quality/eutrophication

Environmental Protection Agency. (2009a). Stationary Internal Combustion Sources. Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories and Emissions Factors.

Environmental Protection Agency. (2009b). Stationary Internal Combustion Sources. Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories and Emissions Factors. Washington D. C.: U. S. Environmental Protection Agency.

Fantozzi, F., & Buratti, C. (2011). Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization. *Bioresource Technology*, *102*(19), 8885–8892. http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.077

Field, C. B., Campbell, J. E., & Lobell, D. B. (2008). Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology and Evolution*, *23*(2), 65–72. http://doi.org/10.1016/j.tree.2007.12.001

Flyn, D. (2009). *Nalco Water Handbook*. (McGraw-Hill, Ed.) (Third Edit).

Franchetti, M. J. (2009). *Solid Waste Analysis and Minimization: A Systems Approach*. (McGraw-Hill, Ed.) (First Edit).

García-Gusano, D., Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., Dufour, J., Espegren, K., & Lind, A. (2016). Integration of life-cycle indicators into energy optimisation models: The case study of power generation in Norway. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2693–2696. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.075

Gomez, C. D. C. (2013). Biogas as an energy option: an overview. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications; Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D., Eds* (pp. 1–16).

Google Earth Engine. (2012). Google Earth Engine: A planetary scale plataform for environmenttal data & analysis. Retrieved from https://earthengine.google.org

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., … Gorrée, M. (2001). Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. *The Netherlands: Ministry of …*, (May), 692. http://doi.org/10.1007/BF02978784

Harder, R., Peters, G. M., Molander, S., Ashbolt, N. J., & Svanström, M. (2015). Including pathogen risk in life cycle assessment: the effect of modelling choices in the context of sewage sludge management. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(1), 60–69. http://doi.org/10.1007/s11367-015-0996-2

Hester R.E. Harrison, R. M. (1996). Eutrophication of Natural Waters and Toxic Algal Blooms. *Agricultural Chemicals and the Environment*. Royal Society of Chemistry. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003BZUX1/agricultural-chemicals/eutrophication-natural

Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., & Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *54*, 1291–1300. http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.013

Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2015). Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(1), 70–84. http://doi.org/10.1007/s11367-015-0988-2

Hosseini, S. E., Wahid, M. A., & Aghili, N. (2013). The scenario of greenhouse gases reduction in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *28*, 400–409. http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.045

Huttunen, S., Manninen, K., & Leskinen, P. (2014). Combining biogas LCA reviews with stakeholder interviews to analyse life cycle impacts at a practical level. *Journal of Cleaner Production*, *80*, 5–16. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.081

ILCD. (2010). ILCD Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. *Constraints*, *15*, 524–525. http://doi.org/10.2788/38479

IMNC. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-1995, QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES, Pub. L. No.

NOM-001-SEMARNAT-1996 (1997). México.

IMNC. NMX-SAA-14040-IMNC-2008 (2008).

IRENA. (2017). *Renewable capacity Statistics 2017*.

ISO. ISO 14044:2006, Test (2006). http://doi.org/10.5594/J09750

Jain Ravi, U. L. B. H. W. D. M. (2012). B.1.7 Photochemical Oxidants. In *Handbook of Environmental Engineering Assessment - Strategy, Planning, and Management*. Elsevier. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BIO255/handbook-environmental/photochemical-oxidants

Johnson, K. A., & Johnson, D. E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, *73*, 2483–2492. http://doi.org/10.2527/1995.7382483x

Kwasny, J., & Balcerzak, W. (2016). Sorbents used for biogas desulfurization in the adsorption process. *Polish Journal of Environmental Studies*, *25*(1), 37–43. http://doi.org/10.15244/pjoes/60259

Laurin, L., Amor, B., Bachmann, T. M., Bare, J., Koffler, C., Genest, S., … Vigon, B. (2016). Life cycle assessment capacity roadmap (section 1): decision-making support using LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(4), 443–447. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1031-y

Ledda, C., Schievano, A., Scaglia, B., Rossoni, M., Acién Fernández, F. G., & Adani, F. (2016). Integration of microalgae production with anaerobic digestion of dairy cattle manure: an overall mass and energy balance of the process. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 103–112. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.151

León, E., & Martín, M. (2016). Optimal production of power in a combined cycle from manure based biogas. *Energy Conversion and Management*, *114*, 89–99. http://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.002

Lewandowski, C. M., Co-investigator, N., & Lewandowski, C. M. (2015). Manual de biogas. *The Effects of Brief Mindfulness Intervention on Acute Pain Experience: An Examination of Individual Difference*, *1*, 1689–1699. http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

López-Aguilar, H. A., Huerta-Reynoso, E. A., Gómez, J. A., Olívarez-Ramirez, J. M., Duarte-Moller, A., & Pérez-Hernandez, A. (2016). Life cycle assessment of regional brick manufacture, *66*(322), 1–9.

Loulou, R. (2016). Documentation for the TIMES Model- PART I.

Maghanaki, M. M., Ghobadian, B., Najafi, G., & Galogah, R. J. (2013). Potential of biogas production in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *28*, 702–714. http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021

Månsson, A. (2014). Energy, conflict and war: Towards a conceptual framework. *Energy Research & Social Science*, *4*, 106–116. http://doi.org/10.1016/j.erss.2014.10.004

Marques, D. O., Trevizan, L. S. F., Oliveira, I. M. F., Seye, O., & Silva, R. E. P. (2016).

Combustion assessment of an ethanol/gasoline flex-fuel engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *39*(4), 1079–1086. http://doi.org/10.1007/s40430-016-0609-4

Masoni, P. (2016). LCA Compendium---The Complete World of Life Cycle Assessment (book series) Series editors: Walter Kl{ö}pffer and Mary Ann Curran. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(4), 595–600. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1041-9

Mathot, M., Decruyenaere, V., Stilmant, D., & Lambert, R. (2012). Effect of cattle diet and manure storage conditions on carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions from tie-stall barns and stored solid manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *148*, 134–144. http://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.012

McKeon, T. A., Hayes, D. G., Hildebrand, D. F., & Weselake, R. J. (2016). Jatropha. In *Industrial Oil Crops* (p. 399). AOCS Press. Retrieved from https://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpIOC00031/cid:kt010YEOZ1/viewerType:pdf/root_slug:industrial-oil-crops?cid=kt010YEOZ1&page=21&b-q=jatropha&sort_on=default&b-group-by=true&b-search-type=tech-reference&b-sort-on=default&scrollto=Jatropha

McQueen Charlene A., B. J. R. K. L. J. G. F. P. L. D. W. M. C. M. S. R. Y. G. S. R. R. A. G. P. H. S. R. J. H. P. K. T. D. G. P. M. R. R. (2010). 8.14 Ozone and Oxygen Toxicity. *Comprehensive Toxicology, Volumes 1-14 (2nd Edition)*. Elsevier. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0084GAAU/comprehensive-toxicology/ozone-oxygen-toxicity

Mendoza Beltran, A., Heijungs, R., Guinée, J., & Tukker, A. (2015). A pseudo-statistical approach to treat choice uncertainty: the example of partitioning allocation methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(2), 252–264. http://doi.org/10.1007/s11367-015-0994-4

Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. *Journal of the American Statistical Association*, *44*(247), 335–341. http://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310

Murphy, J. D., & Thansiriroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In A. Whellinger, J. Murphy, & D. Baxter (Eds.), *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 104–130). Woodhead publishing limited. http://doi.org/10.1533/9780857097415.1.104

Niero, M., Ingvordsen, C. H., Jørgensen, R. B., & Hauschild, M. Z. (2015). How to manage uncertainty in future Life Cycle Assessment (LCA) scenarios addressing the effect of climate change in crop production. *Journal of Cleaner Production*, *107*, 693–706. http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.061

Overland, I. (2016). Energy: The missing link in globalization. *Energy Research & Social Science*, *14*, 122–130. http://doi.org/10.1016/j.erss.2016.01.009

Pacesila, M., Burcea, S. G., & Colesca, S. E. (2016). Analysis of renewable energies in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 156–170.

http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.152

Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, *31*(1), 55–71. http://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.002

Peter, C., Fiore, A., Hagemann, U., Nendel, C., & Xiloyannis, C. (2016). Improving the accounting of field emissions in the carbon footprint of agricultural products: a comparison of default IPCC methods with readily available medium-effort modeling approaches. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–15. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1056-2

Petersson, A. (2013). Biogas cleaning. In *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications* (pp. 329–341). Cambridge: Woodhead publishing limited.

Pfister, S., & Scherer, L. (2015). Uncertainty analysis of the environmental sustainability of biofuels. *Energy, Sustainability and Society*, *5*(1), 1–12. http://doi.org/10.1186/s13705-015-0058-4

Press technology and manufacturing. (n.d.). Manure Pro Composter (Aerobic Manure Processor). Retrieved August 8, 2017, from http://www.presstechnology.com/composter-aerobic-manure-processor/

Rajagopal, R., Bellavance, D., & Rahaman, M. S. (2017). Psychrophilic anaerobic digestion of semi-dry mixed municipal food waste: For North American context. *Process Safety and Environmental Protection*, *105*, 101–108. http://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.014

Rehl, T., Lansche, J., & Müller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(6), 3766–3775. http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.072

Republic, G. of the. (2013). Energy Reform, 1–24.

RUTZ, D., & JANSSEN, R. (2013). Biomass resources for biogas production. *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, 19.

Seadi, T. A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. *Igarss 2014*. http://doi.org/10.1533/9780857097415.1.85

Selley Richard C., C. L. R. M. P. I. R. (2005). Acidification of Terrestrial and Aquatic Environments. *Encyclopedia of Geology, Volumes 1 - 5*. Elsevier. Retrieved from http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004OKX8V/encyclopedia-geology/acidification-terrestrial

SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

SENER. (2015). Sistema de Información Energética. Retrieved January 1, 2017, from http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas

Sobol, I. M. (1994). *A Primer for the Monte Carlo Method*. Florida: CRC Press.

Sonnemann, G. W., Schuhmacher, M., & Castells, F. (2003). Uncertainty assessment by a

Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator. *Journal of Cleaner Production*, *11*(3), 279–292. http://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00028-8

Strantzali, E., & Aravossis, K. (2016). Decision making in renewable energy investments: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 885–898. http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.021

Testa, F., Nucci, B., Tessitore, S., Iraldo, F., & Daddi, T. (2016). Perceptions on LCA implementation: evidence from a survey on adopters and nonadopters in Italy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1–13. http://doi.org/10.1007/s11367-016-1106-9

U. S. Environmental Protection Agency. (1995). 3.1 Stationary gas turbines. In Office of Air Quality Planning and Standards (Ed.), *COMPILATION OF AIR POLLUTANT EMISSION FACTORS* (Fifth Edit, p. 3.1-1-3.1-20). U. S. Environmental Protection Agency. Retrieved from https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/final/c03s01.pdf

U. S. Environmental Protection Agency. (2009). *COMPILATION OF AIR POLLUTANT EMISSION FACTORS*. (Office of Air Quality Planning and Standards, Ed.) (Fifth). U. S. Environmental Protection Agency.

Van Stappen, F., Mathot, M., Decruyenaere, V., Loriers, A., Delcour, A., Planchon, V., … Stilmant, D. (2016). Consequential environmental life cycle assessment of a farm-scale biogas plant. *Journal of Environmental Management*, *175*, 20–32. http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.020

Viktoria, M. (2016). EXAMINATION OF THERMIC TREATMENT AND BIOGAS PROCESSES BY LCA Viktoria MANNHEIM EXAMINATION OF THERMIC TREATMENT AND. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara- International Journal of Engineering*, (June), 225–234.

Weidema, B.P., Bauer, Ch.; Hischier, R.; Mutel, Ch.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. (2013). The ecoinvent database: Overview and methodology, Data quality guideline for tthe ecoinvent database version 3. Retrieved from www.ecoinvent.org

Xu, C., Shi, W., Hong, J., Zhang, F., & Chen, W. (2015). Life cycle assessment of food waste-based biogas generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *49*, 169–177. http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.164

ANEXO I

Cálculos para el diseño del dispositivo de muestreo de gases de combustión.

Debido a las altas temperaturas de los gases de combustión a la salida del generador, se diseñó un dispositivo de muestreo que permitiera tomar las muestras de forma segura. El dispositivo consta de una entrada en forma de "U", la cual colecta la muestra. El gas es transportado hacia un tubo de acero inoxidable (A), que permite reducir la temperatura por acción del ambiente. Posteriormente, es transportado hacia un intercambiador de calor. El intercambiador consta de un serpentín de cobre en el cual la muestra es transportada al interior. El serpentín está sumergido en un depósito de agua con hielo para inducir un gradiente de temperatura. Finalmente, al extremo del serpentín se encuentra una conexión donde la muestra es transportada hacia la bolsa Tedlar.

El dispositivo de muestreo está diseñado para reducir la temperatura de los gases de combustión, de 900°C a 25°C. A continuación se presentan los cálculos realizados para el diseño del dispositivo de muestreo.

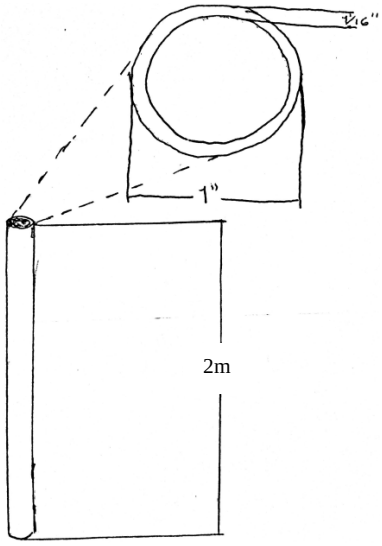

Figura AI- 1. Dimensiones del tubo de acero utilizado para el dispositivo de muestreo.

La Figura AI- 1 presenta las dimensiones del tubo de acero utilizado en el dispositivo. Mediante el diámetro externo de D_{in}=7/8" y la longitud L_{ac}=2m, lo se calculó el área interior del acero:

$$A_{ex-ac} = L_{ac}\left(\frac{D_{in-ac}}{2}\right)\pi$$

$$A_{ex-ac} = 2m\left(\frac{7/8\,''}{2} * \frac{2.54\ cm}{1''} * \frac{1\ m}{100cm}\right)\pi$$

$$A_{ex-ac} = 0.159593m^2 = 0.014827ft^2$$

Mediante el cálculo del área exterior, se calculó la disminución de la temperatura en estos gases, de forma que se conozca la temperatura a la que entrará el gas al intercambiador de calor.

Se busca reducir la temperatura de 900°C (1652°F) a 25°C (77°F). Se llevaron a cabo cálculos de transferencia de calor para determinar la energía necesaria a perder. Consideramos un coeficiente de transferencia de calor $U_s = 100\frac{BTU}{h*ft^2*°F}$.

$$q = U_s A_{ex-ac}(T - t')$$

$$q = \left(100\frac{BTU}{h * ft^2 * °F}\right) * 0.014827ft^2 * (77°F - 1652°F)$$

$$q = -2335.25\frac{BTU}{h}$$

Donde q es la energía que debe ser transferida para el gradiente de temperatura.

Al considerar una T_∞=25°C, se tiene que:

$$T_s = 800°C$$

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} = 387.5°C$$

Se procede a realizar los cálculos para el coeficiente de transferencia de calor h:

$Pr = 0.6971$

$k = 0.022\frac{BTU}{h * ft * R} = 81.94\frac{kWh}{h * m * R}$

$v = 3777E - 4\ \frac{ft^2}{s} = 35.089E - 6\frac{m^2}{s}$

Velocidad del viento $V_{wind} = 8\frac{m}{s}$

$$Re = \frac{V_{wind} * D}{v}$$

$D = diámetro\ de\ contacto = 1" = 2.54cm = 0.0254m$

$$Re = \frac{8\frac{m}{s} * 0.0254m}{35.089E - 6\frac{m^2}{s}} = 2790.91$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/2}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}}\left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/2}\right]^{4/5}$$

$$= 0.3 + \frac{0.62(2970.91)^{1/2}(0.6971)^{1/2}}{[1 + (0.4/(0.6971))^{2/3}]^{1/4}}\left[1 + \left(\frac{(2970.91)}{282000}\right)^{5/2}\right]^{4/5} = 27.33$$

$$h = \frac{k}{D}Nu = \frac{0.07615\frac{kJ}{h * m * R}}{0.0254m} * 27.33 = 81.94\frac{kW}{m^2 * R} = 147.492\frac{kW}{m^2 * K}$$

Ahora se procede a calcular la transferencia de calor por tiempo:

$$\dot{Q} = hA_{ex-ac}(T_s - T_\infty)$$

$$\dot{Q} = \left(147.492\frac{kW}{m^2 * K}\right)(0.159593m^2)(1073K - 298K) = 18{,}242.285kW$$
$$= 18{,}242.485\frac{kJ}{h} = 5.0673\frac{kJ}{h}$$

Con éste último dato, se puede calcular la temperatura final, se considera que el tiempo de residencia del gas es de un segundo. Se utilizó el C_p del CO_2.

$$C_{p,CO_2} = 10.34 + 0.00274T - \frac{195500}{T^2}$$

$$T = T_s = 1073K$$

$$\therefore$$

$$C_{p,CO_2} = 10.34 + 0.00274(1073K) - \frac{195500}{(1073K)^2} = 13.1102\frac{Cal}{mol * K} = 54.8531\frac{kJ}{mol * K}$$

También se calcula la masa contenida en el tubo de acero por medio de la ley de Gases Ideales. Se considera la temperatura T_s y una presión de 1.1 atm.

$$m\text{=9.7E-3 mol}$$

$$Q = mC_{p,CO_2}(T_2 - T_1)$$

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{mC_{p,CO_2}} = 1073K + \frac{5.0673\frac{kJ}{h}}{(9.7\text{E} - 3\text{ mol})\left(54.8531\frac{kJ}{mol * K}\right)} = 1063.48K$$

Ésta es la temperatura a la cual el gas es introducido al intercambiador de calor. El intercambiador de calor, consta de un serpentín sumergido en un tanque de agua fría (0°C). Para hacer el cálculo de la distancia que tiene el serpentín es necesario calcular el área de contacto. El área del serpentín es calculada mediante la siguiente ecuación.

$$A_c = \frac{\dot{q}F}{U_c * (t_h - t_d)}$$

$$\dot{q} = nC_{p,CO_2}(T_2 - T_1)$$

$$n = 0.08179\ mol \quad (obtenida\ mediante\ ley\ de\ Gases\ ideales)$$

$$\dot{q} = (0.08179\, mol)\left(54.8531\frac{kJ}{mol * K}\right)(298K - 1063.48K) = -3434.28kJ$$

$$F = 1\ (factor\ de\ ajuste)$$

$$U_c = 350\frac{BTU}{h * ft^2 * °F} = 5.6783\frac{J}{s * m^2 * K}$$

$$\therefore$$

$$A_c = \frac{(-3434.28kJ)(1)}{\left(5.6783\frac{J}{s * m^2 * K}\right) * (1063.48K - 273K)} = 2.18649m^2 = 21864.9cm^2$$

El dispositivo de muestreo se muestra en la Figura 10.

ANEXO II

Resultados completos obtenidos del equipo ICP-OES.

Se colectaron cuatro muestras del agua utilizada para el digestor. Otras cuatro muestras de efluente fueron colectadas a la salida del digestor.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del ICP-OES de las muestras de agua antes del digestor.

Tabla AII- 1. Resultados en ICP-OES de la muestra de agua colectada el 18 de enero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	8.661	2.875	9.131	11.27	5.58
Ba	455.403 { 74}	ppm	23	0.1862	22.94	23.2	22.84
Co	228.616 {447}	ppb	1.872	0.2733	1.859	2.152	1.605
Cr	283.563 {119}	ppb	2.362	0.2662	2.192	2.226	2.669
Mg	279.553 {121}	ppm	3308	57.79	3374	3282	3267
Mn	257.610 {131}	ppb	2.067	0.0896	2.139	2.097	1.967
Mo	202.030 {467}	ppb	1.719	0.2359	1.957	1.485	1.714
Ni	231.604 {446}	ppb	1.656	0.4669	1.49	2.183	1.294
Pb	220.353 {453}	ppb	2.055	0.5557	1.872	1.614	2.679

Tabla AII- 2. Resultados en ICP-OES de la muestra de agua colectada el 25 de enero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición3
As	189.042 {478}	ppb	20.5	1.058	21.14	19.28	21.08
Ba	455.403 { 74}	ppm	15.57	0.2054	15.64	15.34	15.73
Co	228.616 {447}	ppb	1.97	0.8333	1.163	1.918	2.828
Cr	283.563 {119}	ppb	2.077	0.2074	2.012	2.308	1.909
Mg	279.553 {121}	ppm	8338	1.725	8337	8340	8338
Mn	257.610 {131}	ppb	18.19	0.2053	18.25	17.96	18.36
Mo	202.030 {467}	ppb	4.171	0.0424	4.218	4.161	4.135
Ni	231.604 {446}	ppb	2.916	0.9194	2.017	3.855	2.876
Pb	220.353 {453}	ppb	3.131	1.114	2.001	3.163	4.228

Tabla AII- 3. Resultados en ICP-OES de la muestra de agua colectada el 1 de febrero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	15.12	3.66	18.26	16.01	11.1
Ba	455.403 { 74}	ppm	20.31	0.4101	20.73	19.91	20.29
Co	228.616 {447}	ppb	2.36	0.0567	2.386	2.295	2.399
Cr	283.563 {119}	ppb	1.656	0.3399	1.798	1.902	1.268
Mg	279.553 {121}	ppm	8493	175.1	8294	8561	8625
Mn	257.610 {131}	ppb	284.3	5.552	290	278.9	284.1
Mo	202.030 {467}	ppb	4.32	0.1738	4.15	4.498	4.311
Ni	231.604 {446}	ppb	1.309	0.6175	0.6916	1.309	1.927
Pb	220.353 {453}	ppb	2.076	2.651	-0.4846	1.904	4.809

Tabla AII- 4. Resultados en ICP-OES de la muestra de agua colectada el 1 de febrero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	10.37	0.6277	9.695	10.93	10.48
Ba	455.403 { 74}	ppm	21.74	0.2211	21.7	21.98	21.54
Co	228.616 {447}	ppb	1.677	0.5248	2.061	1.891	1.079
Cr	283.563 {119}	ppb	2.356	0.1511	2.48	2.188	2.401
Mg	279.553 {121}	ppm	3389	15.97	3380	3407	3379
Mn	257.610 {131}	ppb	4.41	0.1373	4.434	4.533	4.262
Mo	202.030 {467}	ppb	1.831	0.125	1.714	1.962	1.817
Ni	231.604 {446}	ppb	0.4004	1.063	0.8573	-0.8145	1.159
Pb	220.353 {453}	ppb	3.873	2.853	3.292	1.355	6.972

Los resultados de obtenidos en el ICP en las cuatro muestras tomadas en el efluente, se muestran en las siguientes tablas.

Tabla AII- 5. Resultados del ICP-OES de la muestra de efluente realizada el 18 de enero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As1890	189.042 {478}	ppb	-0.7519	0.9112	-0.9022	-1.579	0.2252
Ba4554	455.403 { 74}	ppm	5.468	0.1063	5.406	5.406	5.59
Co2286	228.616 {447}	ppb	0.5545	0.1398	0.7084	0.4354	0.5199
Cr2835	283.563 {119}	ppb	3.364	0.0465	3.329	3.346	3.417
Mg2795	279.553 {121}	ppm	1118	7.583	1125	1118	1110
Mn2576	257.610 {131}	ppb	3.907	0.099	3.866	3.836	4.021
Mo2020	202.030 {467}	ppb	0.0216	0.1127	0.1426	0.0026	-0.0803
Ni2316	231.604 {446}	ppb	8.559	0.4953	7.996	8.93	8.75
Pb2203	220.353 {453}	ppb	2.119	0.9982	2.646	2.743	0.9679

Tabla AII- 6. Resultados del ICP-OES de la muestra de efluente realizada el 25 de enero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	1.785	2.326	3.945	2.085	-0.6767
Ba	455.403 { 74}	ppm	9.922	0.2581	9.669	9.912	10.19
Co	228.616 {447}	ppb	0.4765	0.1728	0.3118	0.4614	0.6564
Cr	283.563 {119}	ppb	2.129	0.1913	1.971	2.074	2.342
Mg	279.553 {121}	ppm	1159	3.363	1157	1163	1157
Mn	257.610 {131}	ppb	4.163	0.0871	4.113	4.114	4.264
Mo	202.030 {467}	ppb	0.0977	0.2736	0.3137	0.1893	-0.21
Ni	231.604 {446}	ppb	5.014	0.565	4.367	5.406	5.27
Pb	220.353 {453}	ppb	2.485	0.5674	2.065	2.259	3.131

Tabla AII- 7. Resultados del ICP-OES de la muestra de efluente realizada el 1 de febrero de 2017.

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	1.071	3.967	1.973	-3.27	4.509
Ba	455.403 { 74}	ppm	11.46	0.1591	11.37	11.65	11.37
Co	228.616 {447}	ppb	0.5242	0.4977	1.033	0.5004	0.0388
Cr	283.563 {119}	ppb	1.964	0.2594	1.724	2.239	1.928
Mg	279.553 {121}	ppm	1112	24.39	1084	1128	1122
Mn	257.610 {131}	ppb	3.641	0.0884	3.583	3.743	3.597
Mo	202.030 {467}	ppb	0.4882	0.0962	0.5885	0.3967	0.4796
Ni	231.604 {446}	ppb	2.991	0.6205	2.409	2.921	3.644
Pb	220.353 {453}	ppb	1.678	1.672	2.356	-0.2264	2.905

Elemento	Longitud de onda	Unidad	Promedio	Desviación estándar	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
As	189.042 {478}	ppb	1.277	4.25	5.918	-2.424	0.3379
Ba	455.403 { 74}	ppm	51.49	0.5338	50.9	51.92	51.66
Co	228.616 {447}	ppb	0.2382	0.3381	-0.0067	0.0973	0.6239
Cr	283.563 {119}	ppb	3.042	0.3967	2.773	2.856	3.497
Mg	279.553 {121}	ppm	1146	7.002	1139	1146	1153
Mn	257.610 {131}	ppb	3.878	0.1202	3.808	4.017	3.809
Mo	202.030 {467}	ppb	0.2377	0.3247	-0.1166	0.5211	0.3085
Ni	231.604 {446}	ppb	8.077	0.9865	7.936	7.168	9.126
Pb	220.353 {453}	ppb	2.216	1.367	3.131	2.872	0.6452

Éstos son los resultados obtenidos directamente del ICP-OES. Esta información es procesada para obtener los flujos de salida del inventario de Digestión anaerobia. Los cálculos realizados son obtenidos de las ecuaciones **Ecuación 3** y **Ecuación 5** utilizando los datos de las tablas anteriores.

ANEXO III

Algoritmo en código Scilab, el cálculo de desviación estándar en parámetros de la EPA-AP42.

```
//Datos de entrada
N=25
x=0.1702

//Carga de dispersión por percentil proporcionado por AP42
Per10=x*0.8
Per25=x*0.9
Per50=x*1
Per75=x*1.1
Per90=x*1.2
Per95=x*1.3

//Creación de variables aleatorias para simular un muestreo
n_10=round(N*0.1)
n_25=round(N*0.25)
n_50=round(N*0.5)
n_75=round(N*0.75)
n_90=round(N*0.90)
n_95=round(N*0.95)

for i=1 : n_10
    mta(i)=rand()*Per10
end

for i=n_10+1: n_25
    mta(i)=grand(1,1,'unf',Per10,Per25)
end


for i=n_25+1 : n_50
    mta(i)=grand(1,1,'unf',Per25,Per50)
end

for i=n_50+1 : n_75
    mta(i)=grand(1,1,'unf',Per50,Per75)
end

for i=n_75+1 : n_90
    mta(i)=grand(1,1,'unf',Per75,Per90)
end

for i=n_90+1 : n_95
    mta(i)=grand(1,1,'unf',Per90,Per95)
end


sigma= stdev(mta)

disp(sigma,"desv std:")
```

ANEXO IV

La línea amarilla muestra una propuesta de recorrido para la recolección de excreta de los corrales. El recorrido es de 1.41 km.

10 AGRADECIMIENTOS.

- Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo mediante la beca otorgada durante mis estudios de maestría.
- Al **Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C.**, por su apoyo en formación y equipo utilizado en el proyecto.
- A la **Secretaría de Energía**, que en colaboración con el **Centro de Investigación en Materiales Avanzados**, la **Universidad Autónoma de Chihuahua** y la **Universidad Autónoma de Ciudad Juárez**, contribuyeron al desarrollo de éste trabajo de tesis como parte del proyecto SENER-CONACyT N°243715.
- Al **M. C. Ramón Gómez Vargas** del laboratorio de Calidad del aire en el CIMAV. Por su apoyo técnico y seguimiento al presente trabajo de tesis.
- Al **Dr. Guillermo Gonzales Sánchez**. Por su apoyo en investigación y seguimiento al presente trabajo de tesis.
- A la **M. C. Silvia Violeta Miranda Navarro**. Por su apoyo técnico en el laboratorio de Análisis químicos.
- Al **Ing. Alejandro Benavides Montoya**. Por su apoyo técnico en el laboratorio de Análisis químicos.
- Al **M. C. Luis De la Torre Sáenz**. Por su apoyo técnico en el laboratorio de Catálisis.
- Al **Ing. José Antonio Alonso Villa**. Por su apoyo en el uso de sus instalaciones y aporte de información para el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **Ing. Héctor Francisco Rangel Legarreta**. Por su apoyo y aporte de información para el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **Ing. Nancy Herrada Garibaldi**. Por su apoyo y aporte de información para el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **Dr. Héctor Alfredo López Aguilar**. Por su apoyo, aporte de información y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **Dr. Jorge Alberto Gómez**. Por su apoyo, aporte de información y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **Dr. Eutiquio Barrientos Juárez**. Por su apoyo mediante recurso y aporte de información para el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- Al **M. C. Marco Antonio Merino Rodarte**. Por su apoyo, aporte de información y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- A la **Dra. Bertha Alicia Rivas Lucero** de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Por su apoyo, aporte de información y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo de Tesis.
- A la **Dra. Guadalupe Gómez Méndez**. Por su apoyo la colaboración, aporte de información y dirección del presente trabajo de Tesis.
- Al **Dr. Antonino Pérez Hernández**. Por su apoyo la colaboración, aporte de información y dirección del presente trabajo de Tesis.