

# **Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la implementación del biodigestor en la granja porcina de Zamorano**

**Suany Alexandra Zepeda Zepeda**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO  
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la implementación del biodigestor en la granja porcina de Zamorano**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Suany Alexandra Zepeda Zepeda**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2017

## **Estimación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la implementación del biodigestor en la granja porcina de Zamorano.**

**Suany Alexandra Zepeda Zepeda**

**Resumen.** A nivel mundial, el sector agrícola contribuye en un 21% en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El manejo del estiércol genera alrededor de 230 millones de ton de CO<sub>2</sub>/año, siendo el ganado porcino responsable del 40% de dichas emisiones. Las explotaciones ganaderas de carácter intensivo en Honduras emiten 6 Gg de GEI anualmente, siendo el 59.6% producto de la fermentación entérica y 2.9% por gestión de estiércol. La digestión anaerobia es una alternativa de mitigación que permite el aprovechamiento energético mediante la captura de emisiones por metano. En este estudio se identificaron los beneficios económicos derivados de la implementación de un biodigestor en la Granja Porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. También se cuantificó la reducción en la carga orgánica de los efluentes medida en término de los sólidos volátiles (SV), determinando la capacidad de producción y captura de CH<sub>4</sub>, valor que conduce a la estimación de la reducción en la huella de carbono (HC) de esta unidad productiva. El volumen de estiércol líquido que ingresa diariamente al biodigestor es de 2.23 m<sup>3</sup> capturando 9.04 kg SV mediante la acumulación de 5.06 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>. La reducción de la HC de la granja fue de 34.79 ton de CO<sub>2</sub> eq-año obteniendo el beneficio económico de USD 1,284.51 al año por la integración del biogás a las actividades diarias de la granja.

**Palabras clave:** Biogás, carga orgánica, digestión anaerobia, gestión del estiércol, huella de carbono.

**Abstract.** Globally, the agricultural sector contributes 21% to greenhouse gas (GHG) emissions. Manure management generates around 230 million tons/year CO<sub>2</sub>, pigs accounting for 40% of these emissions. Intensive livestock farms in Honduras represent the largest emissions with 6 Gg of GHG annually, being 59.6% enteric fermentation and 2.9% manure management. Anaerobic digestion is a mitigation alternative that allows energy utilization through emissions capture. The study aims to quantify the amount of waste treated by a continuous flow anaerobic biodigester that contributes to the reduction of the carbon footprint; in addition to identify the economic benefits derived from its implementation at Zamorano University. The reduction of organic load contained in the treated wastes were also quantified, determining CH<sub>4</sub> production and estimating carbon footprint reduction (HC). The volume of liquid manure entering daily is 2.23 m<sup>3</sup> capturing 9.04 kg SV by accumulating 5.06 m<sup>3</sup> of CH<sub>4</sub>. The potential reduction of the carbon footprint was 34.79 tons of CO<sub>2</sub>/year, derived from the integration of biogas, obtaining the economic benefit of USD 1,284.51 annually.

**Key words:** Anaerobic digestion, biogas, carbon footprint, management of manure, organic load.

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>5</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>22</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>23</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>26</b>

## INDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Metodologías de ensayo de laboratorio.....	7
2. Fórmulas para el cálculo de emisiones.....	8
3. Volumen promedio real de agua residual tratada dentro del biodigestor.....	12
4. Caracterización de volumen tratado en el biodigestor, expresados en mg/L. ....	13
5. Emisión por gestión de estiércol de la granja de ganado porcino, sin la implementación del biodigestor de julio 2016 a julio 2017. ....	14
6. Sólidos volátiles removidos durante el proceso de digestión anaerobia. ....	16
7. Requerimientos energéticos diario de la granja porcina utilizando la hoja de estimación de cargas.....	17
8. Beneficios económicos del proyecto. ....	19
9. Percepción de costos por consumo de electricidad y reducción de emisiones....	19

Figuras	Página
1. Ubicación del biodigestor en la granja de ganado porcino, Zamorano. ....	5
2. Diagrama para la delimitación de la toma de muestras.....	6
3. Flujo de proceso para cuantificación de emisiones. ....	7
4. Huella de carbono total por la gestión de cerdos.....	15
5. Huella de carbono con la implementación del biodigestor. ....	18

Anexos	Página
1. Resultados de laboratorio para estimación de parametros de caracterización. ...	26
2. Anexo 2. Resultados de laboratorio para Demanda Química de Oxígeno.. ....	27
3. Cálculo de emisión por fermentación entérica. ....	28
4. Base de datos de consumo energetico, promedio mensual.....	29
5. Informe de resultados emitidos por UNILAB. ....	30
6. Hoja de estimación de cargas de la granja de ganado porcino. ....	31

## 1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al informe anual de gases de efecto invernadero (GEI) el sector agrícola es responsable de emitir el 21% de las emisiones a nivel mundial (Food and Agriculture Organization [FAO], 2016). Las explotaciones ganaderas de carácter intensivo son las mayores emisoras de estos gases debido a la concentración de animales en espacios reducidos (Noya et al., 2016). El manejo del estiércol genera alrededor de 230 millones de ton de CO<sub>2</sub> eq-año, siendo el ganado porcino responsable del 40% de dichas emisiones (United Nations Agency for International Development [USAID], 2009). El metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) son los principales gases emitidos en la producción agropecuaria, sobre todo por la gestión del ganado y su estiércol. El impacto de los gases generados puede ser medido mediante el cálculo de la huella de carbono en kg equivalentes de CO<sub>2</sub>, indicador que puede ser reducido mediante la mejora de las prácticas de manejo del ganado y de los residuos generados (FAO, 2009).

Honduras es el segundo país con mayores emisiones de GEI a nivel de Centroamérica (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2016). El sector ganadero emite anualmente 6 Gg de GEI, correspondiendo el 59.6% a la fermentación entérica y 2.9% a la gestión de estiércol (FAO, 2014). Sistemas productivos intensivos como las granjas y particularmente las porcinas, generan un gran volumen de residuos orgánicos húmedos (estiércol). Del volumen diario del alimento consumido por el cerdo únicamente es retenido dentro de sus tejidos el 33% y el resto es eliminado en sus excretas. El factor de emisión anual de CH<sub>4</sub> por granja porcina con respecto a la fermentación entérica ronda los 1.2 kg de CH<sub>4</sub>/cabeza y la gestión del estiércol un cerdo de 100 kg pueden llegar a emitir hasta 50.33 kg de CH<sub>4</sub> al año (Muñoz, 2006).

Las aguas residuales porcinas con frecuencia son expulsadas a cuerpos de agua cercanos sin pasar por previo tratamiento, liberando metano, óxido nitroso, fósforo, elementos patógenos y gases presentes en el estiércol de los animales. Esto contribuye a la eutrofización de los mantos de agua, acidificación de los suelos por la acumulación de metales pesados y propagación de enfermedades (FAO, 2009). De acuerdo a la legislación hondureña, la ganadería porcina debe contar con mecanismos de tratamiento para los residuos antes de su disposición final que contribuyan a la reducción de la contaminación de agua, aire y suelo (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente [SERNA], 2009).

El tratamiento de estos residuos usando la digestión anaerobia representa una alternativa de mitigación ambiental que permite el beneficio del contenido energético mediante el aprovechamiento potencial de la captura de emisiones, y los nutrientes que pueden ser reincorporados en cultivos (Bustamante, 2009). Los tratamientos anaeróbicos y facultativos son considerados óptimos para reducir la carga de materia orgánica (MO) presente en las

aguas residuales industriales. Una alta eficiencia de remoción contaminante y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero emanados a la atmósfera son los principales beneficios obtenidos de estos tratamientos (Hosseini y Wahid, 2013).

En el caso de la empresa Porcina Americana (PASA) situada en Coris Cartago, Costa Rica, se dio la clausura total de la granja, debido al impacto ambiental que causaban las aguas residuales de más de 25,000 cerdos. A pesar de contar con tres lagunas facultativas para el vertido de sus aguas, la concentración de DQO en los efluentes sobrepasaba los límites normativos. La falta de un tratamiento primario, les costó a los dueños grandes pérdidas económicas y financieras. Como medida de mitigación para restaurar sus actividades, PASA implementó un biodigestor para reducir la carga de orgánica presente en las excretas y como resultado obtuvo beneficios económicos provenientes de la generación de biogás. El proyecto permitió el autoabastecimiento energético de la empresa en un 100% luego de instalar 250 kW de potencia. El generador tiene la capacidad de operar alrededor de 16 horas diarias, consumiendo 150 m<sup>3</sup> de residuos porcinos (Camacho, 2013).

Los beneficios de la integración del biogás en las actividades productivas de las explotaciones porcina son diversos, uno de los más comunes es el reemplazo de gases fósiles (gas natural y propano) por metano (CH<sub>4</sub>). Por medio de la conversión energética se puede aprovechar el metano para suplir las necesidades energéticas como por ejemplo para calentadores de agua en las duchas, lámparas de calentamiento de maternidad o en puntos críticos diarios de consumo eléctrico (Sitio Solar, 2013). En una comunidad de China se llevó a cabo una comparación entre comunidades que poseían biodigestores para autoconsumo energético y aquellas que no. Se llegó a la conclusión que la reducción de consumo energético por fuentes fósiles y carbón, se redujo en un 60% (Xiaohua et al., 2007).

La huella de carbono (HC), es la sumatoria de los gases emanados en las diferentes actividades productivas o bienes y servicios de forma directa o indirecta (Espíndola y Valderrama, 2012). De los gases emitidos por la agricultura, la ganadería aporta la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente. Los gases CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub> son derivados de procesos bacterianos resultantes de la degradación de las excretas de residuos orgánicos. Como emisiones indirectas de la agricultura se considera la generación de CO<sub>2</sub> provenientes de combustiones por actividades antropogénicas para la calefacción de los lechones y generación eléctrica (SERNA, 2009). En el año 2016, la empresa GAIA estimó un inventario de gases de efecto invernadero para todas las unidades de Zamorano aplicando la metodología del IPCC. Del total de las emisiones, la fermentación entérica de ganado porcino representa el 0.43% y el 7.73% está representado por la gestión de estiércol porcino, estimando una huella de carbono para la granja porcina de 426.15 ton de CO<sub>2</sub> eq-año.

El gas metano (CH<sub>4</sub>), presenta un potencial de calentamiento 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub> (DeSutter y Ham, 2005), y el Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) posee un potencial de calentamiento 298 superior (Espíndola y Valderrama, 2012). La producción de CH<sub>4</sub> en granjas porcinas proviene en su mayoría por la gestión de estiércol, generando emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O provenientes de la degradación de la materia orgánica presente en las excretas medida en términos de la concentración de SV (Sommer, Petersen y Møller, 2004).

Las emisiones resultantes dependerán de la relación carbono-nitrógeno, el tiempo de almacenamiento y el tipo de tratamiento al que son sometidas (Jarret, Martinez y Dourmad, 2011). En un estudio en granjas porcinas de Barcelona las emisiones de CH<sub>4</sub> en promedio dieron como resultado 8.34 ton de CO<sub>2</sub> eq/kg de estiércol al año (Muñoz., 2006). Otro estudio demuestra que la emisión procedente de los cerdos llega a 3.48 kg de CO<sub>2</sub> eq/kg de estiércol al año. En donde las excretas de los cerdos de engorde son las que más contribuyen con 319.9 kg de CO<sub>2</sub> eq/unidad animal (Philippe y Nicks, 2014). Existen algoritmos para calcular las emisiones de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub> provenientes de las granjas mediante la reducción de los SV del estiércol con respecto al contenido de proteína y grasas presentes en el sustrato (Sommer, 2004). En Trujillo, Colombia, con el uso de biodigestores se logró reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en un 87% correspondiente a 28.46 ton CO<sub>2</sub> eq-año, utilizando el biogás como combustible para la cocción de alimentos (Rojas, 2014).

La metodología más utilizada para estimar las emisiones de GEI es la establecida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en ingles) en el año 2006, proporcionando las directrices para desarrollo los inventarios de gases de efecto invernadero. Dicha metodología desarrolla los diferentes cálculos por categorías de animales. En un inventario de nivel 1 se debe considerar la fermentación entérica y la gestión del estiércol. Cuando la granja se encuentra dentro de un país que ya posee un inventario de nivel 1, se recomienda realizar un inventario de nivel 2, en donde se realiza cálculos más exactos con factores de emisión específicos (IPCC, 2006). Las directrices del IPCC establecen que los valores deben ser declarados en Gg de CO<sub>2</sub> equivalente para el CH<sub>4</sub> derivado de la gestión del estiércol (IPCC, 2006).

Estudios previos realizados para caracterizar los efluentes de la granja porcina de Zamorano, reportan valores promedio de SV de 7,878.48 mg/L, y DQO de 14,396.87 mg/L. Con el aporte diario de las excretas aproximadamente de 900 cerdos en las diferentes áreas de explotación se estimó una disponibilidad de 10 m<sup>3</sup>/día de agua residual para alimentación del biodigestor en la granja, capaces de generar anualmente un estimado de 70,838.29 kWh/año. La metodología utilizada para el cálculo de HC fue en base a la cantidad de kWh producidos y su precio equivalente en kg de CO<sub>2</sub> reducido (Cevallos e Hidalgo, 2013).

Con el apoyo de diferentes organizaciones, el Departamento de Ambiente y Desarrollo a través del Centro Zamorano de Energía Renovable, desarrolló un proyecto que tiene con el objetivo promover el uso de sistemas de energía renovable para usos productivos en el sector agropecuario de Centroamérica; pero que a la vez contribuyera a la reducción de la huella de carbono producto de las actividades productivas desarrolladas en la planta de ganado porcino de la EAP Zamorano. En el año 2016 se puso en marcha el biodigestor, con una capacidad de 112 m<sup>3</sup>. La carga orgánica de la granja porcina se encuentra diluida por el agua con que es removida de los corrales y es incorporada en la fosa de acopio, sin embargo, para una mayor producción de metano se sugiere mantener el proceso de separación de cerdaza como pretratamiento de los efluentes para la alimentación del biodigestor. Estudios previos determinaron que el mayor contenido orgánico se obtiene al bombear el contenido de la fosa de acopio durante los primeros 15 minutos (Armas, 2016).

Tomando en cuenta las diferentes ventajas que representa la implementación de la digestión anaerobia para la gestión de residuos en granjas porcinas, y el potencial de replicar esta



experiencia en actividades productivas similares para la mitigación de impactos y reducción de la huella de carbono, se plantean los siguientes objetivos para el desarrollo de la presente investigación:

- Cuantificar el volumen de residuos tratado mediante el sistema de digestión anaerobia implementado en la granja de ganado porcino.
- Estimar la huella de carbono derivada de las operaciones de la planta y la reducción de este valor a partir de la implementación del sistema de digestión anaerobia.
- Determinar los beneficios económicos derivados de la implementación del biodigestor en la granja porcina.

## 2. METODOLOGÍA

### Localización del estudio.

La recolección de las muestras se realizó de las aguas residuales en la entrada y salida de del biodigestor de la Granja Porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Ubicada en San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, Honduras (Figura 1). Al momento del estudio la granja contaba con 849 cerdos en promedio, distribuidos según inventarios en: lactantes, destete, engorde, reposición, hembras de reposición y machos de reposición.

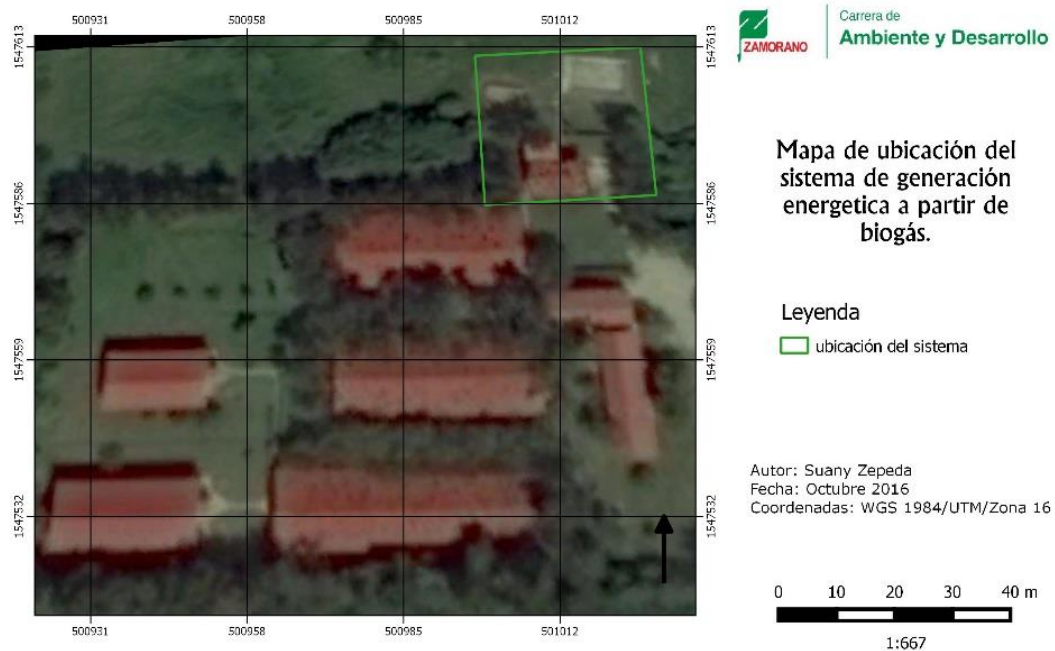


Figura 1. Ubicación del biodigestor en la granja de ganado porcino, Zamorano.

### Cuantificación del volumen de residuos tratados en el digestor.

Previo a la separación de la cerdaza mediante el uso de un filtro rotatorio, las aguas residuales son almacenadas en una fosa de acopio que es alimentada por las distintas secciones de la granja, a excepción de maternidad. Se midieron las dimensiones de ancho, largo y profundidad de la fosa, registrando la altura inicial y final dentro de la fosa luego del periodo de alimentación al digestor (15 minutos diarios) para determinar el volumen de estiércol líquido que ingresa (Figura 2).

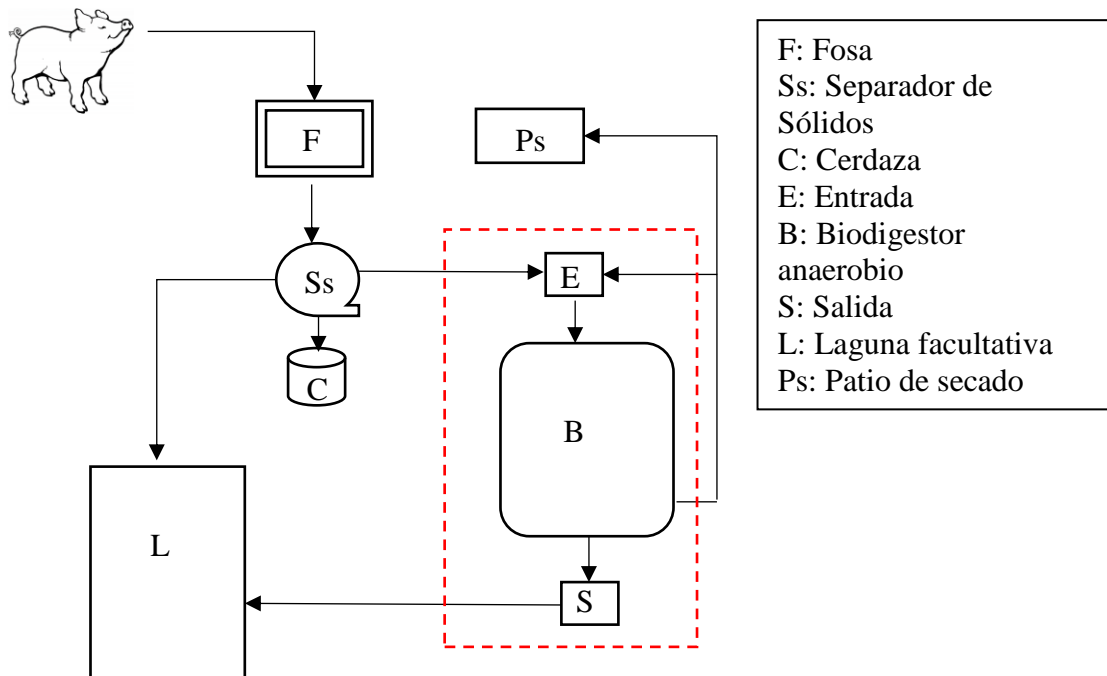


Figura 2. Diagrama para la delimitación de la toma de muestras.

Se analizó el tiempo de retención hidráulico (TRH) actual del biodigestor utilizando la Ecuación 1. Para estimar las implicaciones que tiene el tratamiento del volumen actual de alimentación sobre la reducción de la huella de carbono. Determinando si es favorable o no el volumen que ingresa diariamente, tomando como referencia el volumen de diseño del digestor y la carga volumétrica diaria del estiércol líquido que ingresa.

$$TRH = \frac{\text{Volumen líquido en el digestor (m}^3\text{)}}{\text{Carga volumetrica diaria (} \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{)}} \quad [1]$$

### Caracterización del residuo.

Las muestras se recolectaron en las cajas de registro de entrada y de salida del biodigestor entre el 24-28 de julio de 2017. Se realizó la toma de cuatro muestras compuestas, tomadas durante los primeros 15 minutos de alimentación al biodigestor. Cada una de las muestras fue de 500 mL por sitio, de los cuales 200 mL se destinaron para los análisis de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV). Los 300 mL restantes de cada muestra se preservaron con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado para realizar el análisis de DQO. Se registraron con un código de acuerdo a la fecha de entrada al laboratorio de bioenergía.

Para el análisis de ST y SV, se homogenizó una alícuota de cada muestra durante cinco minutos a 200 rpm aproximadamente. Se hicieron dos repeticiones, colocando 25 mL por muestra en crisoles tarados a 600 °C. Cada réplica se colocó en el horno a 100 °C por 12 horas para determinar la cantidad de sólidos totales. Posteriormente se trasladaron a la mufla

para quemar la materia orgánica a una temperatura de 600 °C durante 2 horas. Determinando así el contenido de materia volátil para cada muestra.

Cuadro 1. Metodologías de ensayo de laboratorio.

Análisis	Método	Referencia
Sólidos Totales (ST)	2540 B. Total solids dried at 103-105 °C	Standard Methods for the Examination of water & wastewater 21st Edition
Sólidos Volátiles (SV)	2540E. Fixed and Volatile Solids Ignite at 550 °C	Standard Methods for the Examination of water & wastewater 21st Edition
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	8000. Método de digestión de reactor	Hach, Manual de Análisis de Agua 2da Edición.

Para el análisis de ST y SV, se homogenizó una alicuota de cada muestra durante cinco minutos a 200 rpm aproximadamente. Se hicieron dos repeticiones, colocando 25 mL por muestra en crisoles tarados a 600 °C. Cada replica se colocó en el horno a 100 °C por 12 horas para determinar la cantidad de sólidos totales. Posteriormente se trasladaron a la mufla para quemar la materia orgánica a una temperatura de 600 °C durante 2 horas. Determinando así el contenido de materia volátil para cada muestra.

Se calculó la carga orgánica (COV) con que está operando el biodigestor actualmente, utilizando la Ecuación 2. Para ello, primero se caracterizó el residuo de acuerdo a la cantidad presente de sólidos volátiles y demanda química de oxígeno. Se realizó para determinar si la capacidad del biodigestor se encuentra sobrecargada o subutilizada de acuerdo a la capacidad del diseño.

$$COV = \frac{\text{kg SV}_{\text{estiércol líquido}}}{V_{\text{biodigestor}} (\text{m}^3)} \quad [2]$$

### Cuantificación de emisiones generadas y estimación de la huella de carbono.

Para establecer una línea base de la huella de carbono de la granja derivada de la gestión de estiércol sin digestor, se utilizó la metodología establecida según las directrices del IPCC, en el volumen 4, capítulo 10: "Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol" (IPCC, 2006). El proceso que establece la metodología para el informe de emisiones se puede observar en la Figura 3.

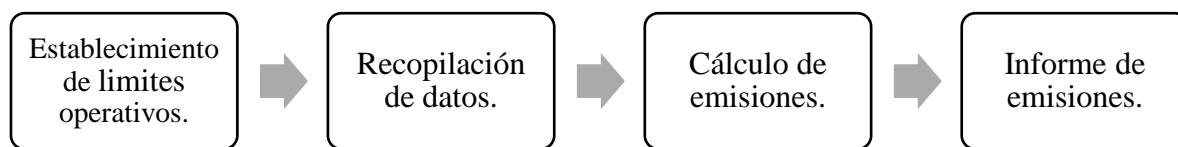


Figura 3. Flujo de proceso para cuantificación de emisiones.

**Establecimiento de límites operativos.** Se utilizó el inventario de animales clasificados en las categorías que maneja la granja anualmente, usando los datos de julio 2016 a julio de 2017. Se consideró como emisión directa la gestión del estiércol y como emisiones indirectas: la fermentación entérica, y el consumo de energía diario de la granja.

**Recopilación de datos.** En base al inventario de animales que maneja anualmente la granja porcina, se calculó la cantidad de unidades animales (U.A) por cada 100 kg de peso vivo, para determinar las emisiones de cada categoría. Así como lo establece la metodología del IPCC, se tomaron en cuenta los kg de estiércol diario de cada una de las categorías establecidas y también la cantidad en kg de SV/día establecidos por Armas (2016).

**Cálculo de emisiones.** Los resultados obtenidos son expresados en Gg CO<sub>2</sub>/año, y en toneladas de CO<sub>2</sub> eq/ año. Las fórmulas para calcular las emisiones por fermentación entérica y gestión de estiércol son descritas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fórmulas para el cálculo de emisiones.

Emisión	Descripción
Fermentación entérica.	La metodología establece que a pesar de que la fermentación entérica de los porcinos no es representativa, por el tipo de sistema digestivo que poseen, deben ser calculadas siguiendo el método nivel 1. El factor de emisión para la fermentación entérica en Honduras corresponde a 1 kg de CH <sub>4</sub> /U.A (IPCC, 2006). Se realizaron los cálculos de emisiones basados en la Ecuación 3.

$$E_{F.e} = \sum_{(T)} EF_{(T)} \times \left( \frac{N_{(T)}}{10^6} \right) \quad [3]$$

$E_{Fe}$  = Emisión por fermentación entérica (Gg CH<sub>4</sub> /año)  
 $EF_{(T)}$  = factor de emisión (kg CH<sub>4</sub> U.A<sup>-1</sup><sub>(categoría)</sub> /año<sup>-1</sup>)  
 $N_{(T)}$  = Unidades animales/categoría

Gestión del estiércol.	La Ecuación 4 se utilizó para calcular la emisión de CH <sub>4</sub> por la gestión de estiércol sin digestor. El factor de emisión que utiliza la fórmula se calculó para cada categoría del inventario.
------------------------	---

$$CH_{4G.E} = \sum_{(T)} \frac{(EF_{(T)} \times N_{(T)})}{10^6} \quad [4]$$

$CH_{4G.E}$  = Emisión por gestión de estiércol (Gg CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>)  
 $EF_{(T)}$  = factor de emisión (kg CH<sub>4</sub> U.A<sup>-1</sup>/año<sup>-1</sup>)  
 $N_{(T)}$  = Unidades animales /categoría

---

Factor de emisión para el CH<sub>4</sub> de la gestión de estiércol. Este factor se utiliza para calcular emisión por categoría de la gestión del estiércol sin biodigestor, en donde se considera la cantidad de SV tomados de Armas (2016).

$$EF_{(T)} = (SV_{(T)} \times 365) \times [B_{o(T)} \times \frac{0.67\text{kg}}{\text{m}^3} \times \sum_{S,k} \frac{MCF_{S,k}}{100} \times MS_{(T,S,k)}] \quad [5]$$

SV<sub>(T)</sub> = sólidos volátiles excretados (kg SV/día<sup>-1</sup>)

Bo<sub>(T)</sub> = máx. producción de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg<sup>-1</sup> SV)

0,67 = factor de conversión de m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> a kilos de CH<sub>4</sub>

MCF<sub>(S,k)</sub> = factor de conversión de metano (establecido IPCC)

MS<sub>(T,S,k)</sub> = kg estiércol/categoría/(establecido IPCC)

---

Consumo de energía eléctrica. Se tomaron en cuenta los datos históricos de consumo eléctrico mensual de la granja, de enero a diciembre del 2016, determinando un consumo energético global por mes. Dichos datos fueron proporcionados por el departamento de planta física de Zamorano. El factor de emisión para Honduras es 0.633 ton de CO<sub>2</sub>/MWh. Para calcular la emisión se utilizó la Ecuación 6.

$$E_{C,E} = EF \times \frac{\text{kWh/año}^{-1}}{1,000} \quad [6]$$

E<sub>C,E</sub> = Emisión por consumo de energía eléctrica (ton de CO<sub>2</sub> eq/año)

EF = Factor de emisión por consumo de electricidad (ton CO<sub>2</sub>/MWh)

---

Fuente: IPCC 2016

**Cálculo de la HC sin biodigestor.** La HC se estimó como la sumatoria de las emisiones por fermentación entérica, gestión de estiércol y consumo de electricidad, utilizando la Ecuación 7.

$$HC_{LB} = \left( \frac{E_{F,e} \times FC}{1000} \right) + \left( \frac{CH_{4G,E} \times FC}{1000} \right) + E_{C,E} \quad [7]$$

HC<sub>LB</sub> = Huella de carbono, línea base (ton CO<sub>2</sub> eq/año)

E<sub>F,e</sub> = Emisión por fermentación entérica (ton CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>)

CH<sub>4G,E</sub> = Emisión por gestión de estiércol (ton CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup>)

E<sub>C,E</sub> = Emisión por consumo de energía eléctrica (ton CO<sub>2</sub> eq/año)

FC = factor de conversión de kg de CH<sub>4</sub> a ton CO<sub>2</sub> eq  $\left( \frac{25 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ kg CH}_4 * 10^3} \right)$

### **Cálculo de la reducción de emisiones por la implementación del biodigestor.**

Se calcularon las emisiones de CH<sub>4</sub> que se reducen con el volumen de estiércol líquido que ingresa y es tratado en el biodigestor. Se realizó una estimación de la emisión de CH<sub>4</sub> acumulado dentro del digestor en base a los kg de SV diarios que son transformados, usando la Ecuación 8.

$$\text{kg } \frac{\text{SV}}{\text{día}} = \left( \text{SV}_{\text{entrada}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) - \text{SV}_{\text{salida}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \right) \times \text{Volumen}_{\text{E.Líquido}} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \quad [8]$$

La producción del CH<sub>4</sub> dentro del biodigestor se deriva de la transformación diaria de los sólidos volátiles. El resultado de la Ecuación 9 se entiende como la reducción de la emisión de CH<sub>4</sub> por la acumulación dentro del biodigestor. Para representarlo como toneladas de CO<sub>2</sub> eq/año, se utiliza su potencial de calentamiento igual a 25 kg CO<sub>2</sub> eq.

$$\text{CH}_4 \text{ acumulado} = \text{IPM} \times \text{kg } \frac{\text{SV}}{\text{día}} \quad [9]$$

IPM= Índice de producción de metano (0.56 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV)

**Reducción de emisiones por aprovechamiento del biogás.** Se realizó una estimación de las cargas eléctricas por zona, siendo estas: administración-bodega (sección 1), engordes (sección 2), gestación-laboratorio (sección 3), maternidad y destete (sección 4). Para ello se utilizó una hoja de estimación de cargas, en la que se incluyó el inventario de equipo que demanda mayor energía y determinar la proporción de consumo energético anual que representa cada sección en la demanda total. De esta manera se obtuvo un mayor conocimiento de aquellos equipos eléctricos que pueden llegar a ser reemplazados por aparatos que consumen biogás. Se eliminaron los aparatos con mayor consumo dentro de la matriz energética, para calcular la reducción de las emisiones en toneladas de CO<sub>2</sub> eq/año por el consumo de electricidad y el porcentaje de aprovechamiento del biogás, para esto se usó la Ecuación 6.

**Reducción de la HC.** La reducción de la HC se calculó restando las emisiones derivadas de la implementación del digestor a la HC de la línea base. Ecuación 10.

$$\text{HC}_T = \text{HC}_{\text{LB}} - \text{HC}_R \quad [10]$$

HC<sub>T</sub>= Huella de carbono total (ton CO<sub>2</sub> eq/año)

HC<sub>LB</sub>= Huella de carbono, línea base (ton CO<sub>2</sub> eq/año)

HC<sub>R</sub>= Reducción de la huella de carbono (ton CO<sub>2</sub> eq/año)

### **Determinación de beneficios económicos derivados de la implementación del biodigestor.**

El valor de la energía, dependerá de los requerimientos energéticos y la capacidad de generación de biogás del digestor (Mehta, 2002). El costo de la energía eléctrica consumida

se calculó utilizando una tarifa de USD 0.14 /kWh, que es la utilizada por planta física en Zamorano. Primero se determinó el costo financiero de la energía generada por ENEE y que es consumida en la granja, comparado con la hoja de estimación de cargas de la granja. Se distribuyó el consumo por secciones al mes y se determinó la sección que representa mayor demanda energética. Se ofreció hacer un uso más eficiente del CH<sub>4</sub> generado por el biodigestor, a través de su aprovechamiento como energía térmica, estimando el consumo energético de los aparatos de mayor porcentaje dentro de la matriz y asumiendo que ya no se utilizará electricidad para dicha actividad, reportándose como una reducción en kWh. Posteriormente se elaboró un análisis de percepción de costos con los resultados del consumo energético, costos por emisión generada y reducida. Los costos-beneficios se categorizaron de acuerdo al grado en que son percibidos por la sociedad.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **Cuantificación del volumen de residuo tratado.**

La fosa de acopio de la granja porcina es alimentada dos veces al día, en la mañana y por la tarde con la limpieza de los corrales. El volumen diario de aguas residuales que son almacenadas en la fosa de acopio en promedio es aproximadamente de 9.41 m<sup>3</sup>, sin embargo, no todo es dirigido al biodigestor. De todas las áreas, la sección de lactantes es la única que no aporta con residuos de estiércol a la fosa, debido a que se recolectan manualmente y posteriormente se descartan en una compostera en la parte trasera de la granja. Sin embargo, estos residuos también son responsables de generar CH<sub>4</sub>, por lo que se consideran para el cálculo de emisión total de CH<sub>4</sub>. Todos los residuos restantes derivados de la limpieza de corrales y excretas son captados en la fosa.

Cuadro 3. Volumen promedio real de agua residual tratada dentro del biodigestor.

Fecha	Altura inicial (m)	Volumen inicial (m <sup>3</sup> )	Altura final (m)	Volumen final (m <sup>3</sup> )	Volumen de descarga (m <sup>3</sup> )	Volumen de cerdaza (m <sup>3</sup> )	Volumen estiércol líquido (m <sup>3</sup> )
24/06/2017	2.48	9.92	1.85	7.40	2.52	0.18	2.34
25/06/2017	2.40	9.60	1.80	7.20	2.40	0.17	2.23
27/06/2017	2.23	8.92	1.65	6.60	2.32	0.16	2.16
28/06/2017	2.30	9.20	1.71	6.84	2.36	0.17	2.19
Promedio	2.35	9.41	1.75	7.01	2.40	0.16	2.23

El consumo promedio diario de agua en la granja porcina para el lavado de los corrales es aproximadamente de 43 m<sup>3</sup> según los registros históricos de planta física. Las aguas residuales que se generan están compuestas por una parte de estiércol líquido y una parte sólida que es la cerdaza representando el 7% del volumen total de las aguas residuales. Las dimensiones de la fosa son: 2 x 2 x 2.50 siendo largo, ancho y alto, respectivamente. En total la fosa puede albergar hasta 10 m<sup>3</sup> debido a que contiene un sistema de desbordamiento de seguridad que dirige el rebalse de aguas residuales hacia la laguna, captando únicamente el 23% de las aguas residuales generadas.

Después de pasar el volumen de aguas residuales albergado en la fosa por el separador de sólidos, se obtuvo el volumen del estiércol líquido. El volumen calculado por diferencia de alturas de estiércol líquido que ingresa al biodigestor durante los primeros 15 minutos de alimentación es en promedio 2.23 m<sup>3</sup>/día (Cuadro 3).

El volumen total del digestor es 112 m<sup>3</sup>, sin embargo, solo tres cuartas partes de este volumen son ocupadas por la fracción líquida de estiércol, siendo disponible 84 m<sup>3</sup> para operar el sistema. Con el volumen actual de estiércol líquido que ingresa al biodigestor (2.23 m<sup>3</sup>) se obtiene un TRH de 38 días (Ecuación 1), lo que resulta ser mucho tiempo al comparar con el TRH de 20 días recomendado por Cevallos e Hidalgo (2013), TRH de 24 días mencionado por Armas (2016) y el rango entre 15 a 25 días establecido por Zuñiga (2016). Lo que implica este resultado es sobretodo un desaprovechamiento de la capacidad de carga que posee el biodigestor. Derivado del poco volumen de estiércol líquido que está ingresando durante los 15 min de alimentación. Para tener un TRH de 21 días, dentro del rango establecido por Zuñiga (2016) se deberá alimentar por lo menos 25 minutos diarios, siendo aproximadamente de 4 m<sup>3</sup> de estiércol líquido.

### Caracterización del residuo.

Por medio de la caracterización de las muestras se logró estimar la producción de metano en base al promedio de sólidos volátiles que son transformados dentro del biodigestor y la demanda química de oxígeno necesaria para disminuir la carga orgánica presente (Cuadro 4). Los sólidos volátiles son de importancia ya que de ellos se deriva la producción del metano que es capturado durante el tratamiento de los residuos.

Cuadro 4. Caracterización de volumen tratado en el biodigestor.

Análisis estadístico	Sólidos totales (ST, mg/L)		Sólidos volátiles (SV, mg/L)		Demanda Química de Oxígeno (DQO, mg/L)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Promedio	7655.50	2826.50	5494.50	1442.50	6268.75	1607.00
Mediana	7034.00	2484.00	5442.00	1273.00	6392.50	1257.50
Desviación estándar	2524.08	840.22	1452.06	455.13	1978.00	893.42

Con el promedio de SV y la carga volumétrica diaria dividida entre la capacidad de volumen líquido del digestor (Ecuación 2) se obtuvo una COV de 0.15 kg SV/m<sup>3</sup>. Dicho resultado es mucho menor a la carga máxima (1 kg SV/m<sup>3</sup>) que recomendó Armas (2016) para el funcionamiento óptimo del biodigestor. Se hace notar que la carga orgánica para el primer día de la semana suele ser mayor ya que para entonces contiene 3 días acumulados, debido a que durante estos días no se realiza la separación de sólidos en la granja. Sin embargo, se observa que, no sobrepasa el límite máximo de carga orgánica.

Además de presentar un volumen de estiércol líquido bajo que es alimentado diariamente, la COV también resultó ser más baja que la óptima que es de 0.50 kg SV/m<sup>3</sup> (Cevallos e Hidalgo, 2013). Probablemente se deba al exceso de agua con que se limpian los corrales, el causante de una mayor dilución de los sólidos presentes en el volumen de alimentación diario. La fosa de acopio posee un canal de desbordamiento de seguridad para que cuando llega a su nivel máximo, re direcciona las aguas residuales sin tratamiento a la laguna de

oxidación. Por lo que se observa una DQO baja ya que existe poca carga orgánica presente dentro del biodigestor.

### **Cuantificación de emisiones generadas y estimación de la HC.**

Se estimaron las emisiones totales derivadas de las excretas de los cerdos de la granja. Siguiendo las directrices del IPCC (2006) se calculó el factor de emisión para cada categoría de acuerdo al inventario que se maneja en la granja. Asumiendo una falta de biodigestor, se tomó como gestión del estiércol la fosa de acopio, donde la única categoría que no dispone sus residuos, es la de lactantes. Dichos se disponen en una compostera a cielo abierto en la parte trasera de la granja. Razón por la cual su factor de conversión a metano (MCF) se establece como disposición en fango: 71%. Los demás valores para la máxima producción de metano (Bo) y MCF se determinaron de acuerdo a los establecidos a nivel de Latinoamérica, por defecto de un inventario del Nivel 1 en Honduras.

Cuadro 5. Emisión por gestión de estiércol de la granja de ganado porcino, sin la implementación del biodigestor de julio 2016 a julio 2017.

Categorías	Peso (kg)	Estiércol		MCF (%)	SV (kg/U.A/día)	EF (kg CH <sub>4</sub> /año)	Gg CH <sub>4</sub> /año	Bo (%)
		(kg/U.A/día)	Bo					
Lactantes	4.0	2.1	0.3	71	0.63	66.79	0.00028	1.6
Destete	24.4	1.2	0.3	30	0.30	7.57	0.00036	2.1
Engorde	64.8	2.7	0.3	30	0.73	42.68	0.01197	70.7
Reposición	100.0	3.0	0.3	30	0.83	52.99	0.00174	10.3
Hembras producción	250.0	1.1	0.3	30	0.31	7.24	0.00130	7.7
Machos producción	200.0	3.0	0.3	30	0.84	53.86	0.00128	7.6
Total							0.01693	100

**Emisión por gestión de estiércol.** La emisión total de la granja por la gestión de estiércol es de 423.27 ton CO<sub>2</sub> eq-año, valor que fue calculado convirtiendo la emisión total de Gg de CH<sub>4</sub>/año a kg CH<sub>4</sub>/año y multiplicando dicho valor por el potencial de calentamiento equivalente a 25 kg de CO<sub>2</sub>. Se puede observar en el Cuadro 5, que la categoría de lactantes es la que posee un factor de emisión de metano mayor, siendo de 66.79 kg CH<sub>4</sub>/año. Esto se debe al tipo de disposición a cielo abierto al que son destinadas sus excretas. Las hembras reproductoras por su lado, poseen el menor factor de emisión derivado de la poca cantidad de estiércol que defecan, al igual que los cerdos en destete. Los cerdos de engorde, representan el 70% de la cantidad de emisiones por la gestión del estiércol. Tal como lo dijeron Philippe y Nicks, (2014) y Armas (2016), el área de engorde aporta el 90% de

estiércol a la fosa de acopio, lo cual es directamente proporcional al porcentaje de emisiones con que contribuye dicha categoría.

**Emisión por fermentación entérica.** Dentro de las emisiones indirectas del ganado se integra la fermentación entérica, como se ha venido mencionando, el sistema digestivo de los porcinos es de carácter monogástrico y los niveles de emisión de metano son muy pequeños (FAO, 2017). La fermentación entérica para porcinos corresponde a 1 kg CH<sub>4</sub>/U.A. Al igual que la gestión de estiércol, el factor de conversión del CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub> eq, corresponde a 25 kg de CO<sub>2</sub>, dicho valor fue multiplicado por la sumatoria de las emisiones por fermentación entérica en kg CH<sub>4</sub>/año. Al final se obtuvieron 14.22 ton de CO<sub>2</sub> eq/año por fermentación entérica.

**Emisión por consumo eléctrico.** Analizando los datos proporcionados por Planta Física de Zamorano, se observó que el consumo de energía mensual de la granja porcina se encuentra en un rango entre 1,046 a 3,014 kWh, consumiendo aproximadamente en promedio 24.36 MWh/año. Considerando que el factor de emisión por consumo de electricidad para Honduras es de 0.633 ton de CO<sub>2</sub> eq /MWh, Entonces las emisiones por la energía anual consumida dentro de la granja son equivalentes a 15.41 ton de CO<sub>2</sub> eq/año.

**Calculo de la HC.** Se estableció la huella de carbono de la granja (Figura 4) derivada de las operaciones de la planta. El consumo de energía y la gestión del estiércol representan en conjunto el 97% de la huella de carbono. Las toneladas de CO<sub>2</sub> que declaro la empresa GAIA para la granja porcina en el año 2016, fue de 426.15 ton de CO<sub>2</sub> tomando en cuenta únicamente la fermentación entérica y gestión del estiércol. Por lo cual se considera representativo el valor estimado al sumar las emisiones por consumo eléctrico. En resumen, la HC está compuesta por 14.22, 15.41 y 423.27 ton de CO<sub>2</sub> eq/año, por fermentación entérica, consumo eléctrico y gestión de estiércol, respectivamente. Dando como total 452.90 ton de CO<sub>2</sub> eq/año.

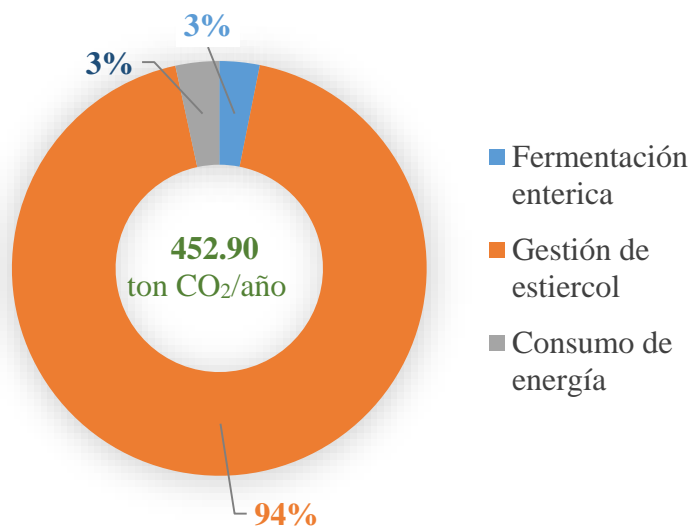


Figura 4. Huella de carbono total por la gestión de cerdos.

### Reducción de emisiones con la implementación del biodigestor.

Con el volumen promedio diario de estiércol líquido que alimenta al biodigestor (2.23 m<sup>3</sup>), se analizaron las corrientes de entrada y salida del mismo, para determinar la remoción de sólidos volátiles del efluente (Ecuación 8). Dicho valor fue calculado con el promedio de sólidos volátiles (mg/L) de las cajas de registro de entrada y salida del biodigestor y el volumen de estiércol líquido que ingresa diariamente. El promedio total de sólidos volátiles que son removidos en el digestor es de 9.04 kg (Cuadro 6).

Cuadro 6. Sólidos volátiles removidos durante el proceso de digestión anaerobia.

Fecha	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Promedio real de agua residual (m <sup>3</sup> /día)	kg SV removidos/día
24/06/2017	7,778	2,112	2.23	12.65
25/06/2017	5,150	1,216	2.23	8.78
27/06/2017	3,316	1,112	2.23	4.92
28/06/2017	5,734	1,330	2.23	9.83
Promedio				9.04

Las emisiones capturadas por el biodigestor, corresponden a la cantidad de sólidos volátiles presentes en el volumen de aguas residuales que ingresan diariamente, luego de pasar por el separador de sólidos. Como fue explicado anteriormente, el volumen líquido de estiércol que ingresa al biodigestor es de 2.23 m<sup>3</sup>, capturando 9.04 kg de SV/día. El índice de producción de metano (IPM) para el biodigestor de la granja porcina es de 0.56 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kg SV (Armas, 2016). Para calcular la cantidad de CH<sub>4</sub> promedio acumulado que resulta dentro del biodigestor, se multiplicó el IPM por los kg de SV diarios que son removidos, dando como resultado 5.06 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>/día.

$$CH_4 \text{ capturado} = 0.56 \frac{m^3 CH_4}{kg SV} \times 9.04 \frac{kg SV}{día} = 5.06 m^3 CH_4 / día$$

Las emisiones que son capturadas dentro de un sistema de digestión anaerobia y posteriormente son quemadas se reconocen como nulas. Por lo cual el CO<sub>2</sub> capturado es el equivalente a las moléculas de CH<sub>4</sub> producidas (IPCC, 2006). Para estimar los kg de CO<sub>2</sub> capturados se debe multiplicar el volumen de CH<sub>4</sub> acumulado por su densidad (0.656 kg/m<sup>3</sup>) para determinar la cantidad de kg representativos al año. Posteriormente se convirtieron en toneladas de CO<sub>2</sub> eq-año, utilizando el potencial de calentamiento del metano dando como resultado 30.29 ton CO<sub>2</sub> eq-año.

$$kg CH_4 = 5.06 m^3 \times 0.656 \frac{kg}{m^3} \times 365 días = 1211.56 \frac{kg CH_4}{año}$$

$$\text{ton } CO_2 \frac{eq}{\text{año}} = 1211.56 \text{ kg } CH_4 \times \frac{25 \text{ kg } CO_2 \text{ eq}}{1 \text{ kg } CH_4 * 10^3} = 30.29 \text{ ton } CO_2 \frac{eq}{\text{año}}$$

**Cuantificación de requerimientos energéticos.** Se hizo una auditoria energética, para determinar las necesidades de kWh diarios de la granja por medio del llenado de una hoja de estimación de cargas. Se identificaron las cargas necesarias para cada sección de la granja. Posterior a ello, se comparó el promedio de cargas mensuales necesarias frente al historial de consumo energético proporcionado por planta física.

Cuadro 7. Requerimientos energéticos diario de la granja porcina utilizando la hoja de estimación de cargas.

Sección	Consumo promedio diario (kWh)	Porcentaje (%)
Administración y bodega	114.90	46.34
Engorde 1 y 2	25.09	10.12
Gestación y laboratorio	73.30	29.56
Maternidad y destete	34.66	13.98
Total	247.90	100.00

Al estimar la demanda energética de forma manual se obtuvo un consumo de 247.9 kWh/día. Al comparar este valor con los registros mensuales de consumo energético de la planta, se observa que este valor es superior, sin embargo, existen múltiples incongruencias con los registros históricos que no permitieron identificar el origen de la desviación. Para fines de esta investigación se utilizó el valor promedio del consumo energético reportado por planta física.

La sección que presenta mayor demanda energética es la de administración y bodega con un 46.34% (Cuadro 7). Esto se debe a que dentro de sus cargas se encuentra el calentador eléctrico que posee una potencia de 4.5 kW utilizado aproximadamente 3 horas diarias (más o menos), en este sentido la demanda eléctrica anual del calentador es de 4,927.5 kWh. Sin embargo, se debe mencionar que no es el consumo real de todos los días, ya que varía de acuerdo a la temporada del año, estudiantes que se bañan con agua caliente y el tiempo de cada ducha.

**Reducción de emisiones por aprovechamiento de biogás.** Al reemplazar el consumo anual del calentador térmico, por la implementación de duchas de biogás se obtiene una reducción de 4,927.5 kWh. Las duchas consumen 4 m<sup>3</sup> de biogás para suplir la necesidad de calentar el agua. Sin embargo, se cuenta con una producción de biogás diaria aproximadamente de 6 m<sup>3</sup>, que pueden ser utilizados por el generador eléctrico por 2 horas diarias generando 6 kWh que en caso de operar por un año se proporcionarían 2,190 kWh adicionales a la granja. La reducción entonces por el reemplazo del calentador térmico y el uso del generador eléctrico se traduce en 4.50 ton de CO<sub>2</sub> eq-año. El costo por kWh para Zamorano es de USD 0.14 por kWh y se multiplicó por la cantidad de energía consumida anualmente, determinando un ahorro por consumo eléctrico de USD 996.45.

La producción diaria de biogás puede estimarse a partir del promedio de SV removidos y el valor de IPM. En este caso se obtuvo un promedio de 9.04 kg SV removidos, que al multiplicarse por el IPM  $0.56 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$  reportado por Armas (2016), y una proporción de  $\text{CH}_4$  del 65%, da como resultado una producción  $7.78 \text{ m}^3$  de biogás. Mediciones realizadas en campo reportan que el digestor genera en promedio  $10 \text{ m}^3$  de biogás al día, con una concentración de metano superior al 65%. Las diferencias encontradas pueden deberse a variaciones en la concentración de SV en las muestras tomadas.

La reducción total de las emisiones es de  $34.79 \text{ ton de CO}_2 \text{ eq/año}$  (Ecuación 10). Siendo  $4.50 \text{ ton de CO}_2/\text{año}$  por la reducción en el consumo eléctrico y  $30.29 \text{ ton de CO}_2/\text{año}$  por la gestión del estiércol dentro del biodigestor. En este sentido la HC de la granja baja a  $418.11 \text{ ton de CO}_2 \text{ eq/año}$  (Figura 5). Durante la concepción del proyecto del digestor, se esperaba mitigar la huella de carbono derivada de la actividad de engorde, equivalente a  $299 \text{ ton de CO}_2 \text{ eq/año}$ , pero el volumen que es tratado en el biodigestor representa apenas el 24% de lo que es almacenado en la fosa. Sumado a esto, la fosa no posee la capacidad de almacenar todas las aguas residuales de la granja, sino que las desvía por rebalse a la laguna de estabilización.

Por otra parte, el biodigestor no está funcionando a su capacidad de diseño, tanto en la carga orgánica aplicada como en su TRH. Este aspecto es difícil de modificar en tanto se mantenga la alta dilución de la carga orgánica, por elevado consumo de agua durante las actividades de limpieza de corrales. Finalmente, aun modificando el volumen y concentración de COV, las dimensiones del digestor actual no permiten el tratamiento de la totalidad de residuos generados.

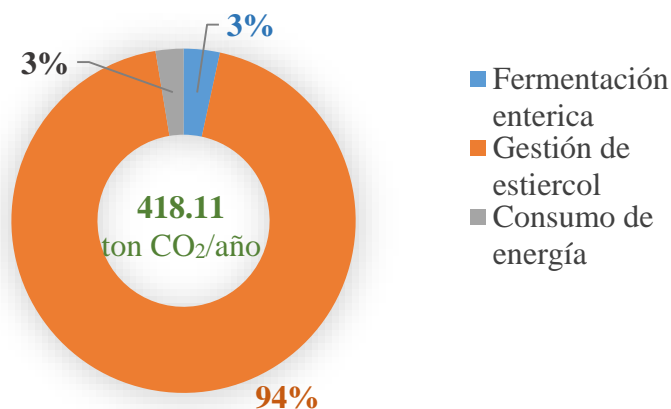


Figura 5. Huella de carbono con la implementación del biodigestor.

**Beneficios económicos derivados de la implementación del biodigestor.**

Dentro de los beneficios económicos que se perciben por la implementación del biodigestor el principal es la reducción de costos por consumo de energía eléctrica, al reemplazarlo por

el calentador térmico de duchas. Considerando un cobro de USD 0.14 por kWh consumido, se obtiene que la cantidad en efectivo que se dejará de pagar al año por electricidad es de USD 996.45, volviéndose un beneficio de carácter tangible (Cuadro 8). Actualmente se puede cubrir el 29% de la energía eléctrica con el aprovechamiento de los beneficios del biogás.

Cuadro 8. Beneficios económicos del proyecto.

	Sin biodigestor	Con biodigestor
Consumo de kWh/año	24,360.00	17,242.50
Costo por kWh/año (USD)	3,410.40	2,413.95
Emisión de ton CO <sub>2</sub> eq-año	452.90	418.11
Reducción ton CO <sub>2</sub> eq-año	-	34.79

Al integrar los diferentes beneficios del biogás a las actividades diarias (duchas de biogás y generador eléctrico) se generan externalidades positivas como la reducción del consumo eléctrico y la reducción de la HC. Si la granja no aprovecha el biogás como subproducto del biodigestor, entonces los beneficios no se verán reflejados. Los beneficios se pueden incrementar al aprovechar la capacidad total de diseño del biodigestor ya que actualmente los resultados reflejan que no se está operando en las condiciones correctas.

Una externalidad negativa derivada del sub-dimensionamiento del biodigestor es que aún se tiene una HC alta porque no se les brinda un pre-tratamiento a todas las aguas residuales de la granja. Esto no quiere decir que el digestor no funcione ya que se ha demostrado que está cumpliendo con su función de mitigación ambiental, sino que no brinda abasto para toda el agua residual que genera diariamente la granja. Otra externalidad negativa es el rebalse de aguas residuales de la fosa de acopio y que son dirigidas sin ningún tipo de tratamiento hacia la laguna de oxidación, también ligado a la carencia de un biodigestor más grande.

Además, se pueden clasificar los costos derivados del consumo eléctrico anual de acuerdo al grado de receptividad de las entidades involucradas, entre ellas la ENEE que es la que percibe el pago por consumo eléctrico, y la granja porcina quien es el que percibirá una reducción en el pago por energía derivada de la implementación del biodigestor. Por medio de la regulación de gases de efecto invernadero, se percibe un servicio ambiental compensado de acuerdo a su utilidad, con el fin de mantener la sostenibilidad financiera del proyecto (SERNA, 2006). El precio al mes de septiembre por toneladas de CO<sub>2</sub> reducida corresponde a USD 8.28 (Sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub> [SENDECO<sub>2</sub>], 2017). La percepción de costos por cada entidad involucrada se observa el Cuadro 9.



Cuadro 9. Percepción de costos por consumo de electricidad y reducción de emisiones

	<b>Sin biodigestor</b>		<b>Con biodigestor</b>	
	<b>ENEE</b>	<b>Granja Porcina</b>	<b>ENEE</b>	<b>Granja Porcina</b>
Costo por kWh/año (USD)	3,410.40	3,410.40	2,413.95	2,413.95
Costo de emisión por consumo eléctrico (USD)		127.68		90.37
Costo por reducción de emisiones (USD)				288.06
<b>TOTAL (USD)</b>	<b>3,410.40</b>	<b>3,538.08</b>	<b>2,413.95</b>	<b>2,216.26</b>

Al incurrir en el aprovechamiento del biogás como fuente energética, no solo se percibe una disminución en los costos por el consumo eléctrico, sino también las emisiones que son reducidas y poseen un valor de USD 288.06 anuales. Entonces los beneficios económicos del biodigestor se resumen en la reducción del consumo de energía eléctrica y emisiones hacia la atmosfera, generando anualmente USD 1,284.51 a favor de la granja. Es importante recordar que los beneficios económicos se comenzaran a percibir cuando la granja integre dentro de sus actividades diarias el biogás como fuente energética.

## 4. CONCLUSIONES

- El biodigestor no se encuentra operando a toda su capacidad, siendo el principal inconveniente la COV que se encuentra muy por debajo a la de su diseño óptimo de funcionamiento. Lo anterior se debe a que el ingreso del efluente se encuentra altamente diluido, por lo que la COV debe aumentar, así como el volumen de alimentación diario para reducir el TRH a 21 días, que es el óptimo para obtener una buena producción de CH<sub>4</sub> y remoción de la carga contaminante.
- La gestión actual del estiércol de la granja no resulta ser la más apropiada por el hecho que únicamente se trata una porción de las aguas residuales que se retienen dentro de la fosa ya que la estructura de rebalse de la fosa deriva hacia la laguna de oxidación cualquier volumen adicional a la capacidad de retención, sin atravesar por la etapa de separación de cerdaza o la digestión anaerobia.
- Aunque la dimensión del digestor es inferior a la requerida para el tratamiento de la totalidad de estiércol generado diariamente por la planta porcina, cumple con su objetivo de mitigación de GEI y podría incrementar su aporte si es operado conforme a su capacidad de diseño, impactando de forma positiva en la reducción de la HC.
- Los beneficios económicos se percibirán solamente si la granja integra dentro de sus actividades diarias el biogás como fuente energética, ya sea por el reemplazo del calentador eléctrico por duchas operadas con biogás o por el uso de la energía producida por el generador eléctrico. Estos beneficios se incrementarán en la medida en que el digestor opere conforme a sus parámetros de diseño.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Implementar prácticas de producción más limpia (PML) para reducir el consumo de agua en la limpieza de los corrales. Y poder tener un efluente con mayor carga orgánica que permita alimentar al digestor bajo los parámetros de diseño.
- Incrementar el volumen de efluente que ingresa al digestor, modificando el régimen de 2.23 m<sup>3</sup> diarios a 4.5 m<sup>3</sup> para reducir el TRH a 21 días.
- Monitorear las condiciones de operación del digestor en campo, cuantificando el aporte energético real a la planta de ganado porcino, comparando con el presente estudio e investigaciones pasadas.
- Evaluar la viabilidad financiera para la ampliación o construcción de un nuevo biodigestor, que permita el tratamiento de la totalidad del estiércol generado, considerando alternativas orientadas a la independencia energética de la planta y usos alternativos del biol.

## 6. LITERATURA CITADA

- Armas, Y. L. (2016). Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purine (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana. Zamorano, Honduras.
- Bustamante, H. N. (2009). Estimación del aporte de un biodigestor a la sostenibilidad de una finca ganadera. (Tesis de pregrado). Univeridad del Azuay, Cuenca-Ecuador.
- El Financiero. (2013). Porcina Americana desarrolla el biodigestor más grande del país en Cartago: Situado en granja porcina que tuvo problemas sanitarios por excretas y ahora genera 100% de energía. Costa Rica. Recuperado de [http://www.elfinancierocr.com/negocios/Porcina-Americana-desarrolla-biodigestor-Cartago\\_0\\_310168981.html](http://www.elfinancierocr.com/negocios/Porcina-Americana-desarrolla-biodigestor-Cartago_0_310168981.html).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (2016). La economía del cambio climático en Honduras.: Mensajes Clave 2016. Honduras.
- Cevallos, W. e Hidalgo, K. (2013). Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana. Zamorano, Honduras.
- DeSutter, T. y Ham, J. (2005). Lagoon-Biogas Emissions and Carbon Balance Estimates of a Swine Production Facility: Gaseous emissions from manure storage facilities, *J.ENVIRON.QUAL*, 34, pp.198 – 206.
- Espíndola, C. y Valderrama, J. O. (2012). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas, *Información Tecnológica*, 23 (1), pp. 163 – 176.
- Food and Agriculture Organization (2009). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2009. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization (2014). Indicador de Emisiones de Honduras. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#country/95>.

- Food and Agriculture Organization (2016). Climate change, agriculture and food security. The state of food and agriculture. Roma: FAO
- Food and Agriculture Organization (2017). Modelo de evaluación ambiental de la ganadería mundial: GLEAM 2.0 Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero y su potencial de mitigación. Recuperado de <http://www.fao.org/gleam/results/es/>.
- Hosseini, S. E. y Wahid, M. A. (2013). Feasibility study of biogas production and utilization as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 454 – 462.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.: Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 10.
- Jarret, G., Martinez, J. y Dourmad, J.-Y. (2011). Pig feeding strategy coupled with effluent management – fresh or stored slurry, solid phase separation – on methane potential and methane conversion factors during storage. *Atmospheric Environment*, 45 (34), pp. 6,204 – 6,209.
- Mehta, A. (2002). The Economics and Feasibility of Electricity Generation using Manure Digesters on Small and Mid-size Dairy Farms (Tesis de grado). University of Wisconsin - Madison.
- Muñoz, L., Ramis, G. y Martinez, A. (2006). El sector ganadero, competitividad y medio ambiente. *EXPOAVIGA*, 1, pp. 9 – 21.
- Noya, I., Aldea, X., Gasol, C. M., González-García, S., Amores, M. J., Colón, J., ... Boschmonart-Rives, J. (2016). Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. *Journal of environmental management*, 171, pp. 133 – 143.
- Philippe, F. y Nicks, B. (2014). Review on greenhouse gas emissions from pig houses. Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, ecosystems & environment*, 199, pp. 10 – 25.
- Rojas, A. M. (2014). Estimación de la reducción de emisiones e gases de efecto invernadero a partir de fórmulas matemáticas en instalaciones porcícolas, localizadas en el municipio de Trujillo, departamento del Valle del Cauca (Tesis de grado). Universidad de Manizales, Colombia.

Sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub> (2017). Histórico de precios de 2017. Recuperado de <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.

Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (2009). Guía de Producción más limpia para la producción porcina. Recuperado de <http://studylib.es/doc/7714591/guia-de-produccion-mas-limpia-para-la-produccion>.

Sitio Solar. (2013). La generación de biogas en las explotaciones ganaderas. Recuperado de <http://www.sitiosolar.com/biodigestion%20en%20granjas.htm>.

Sommer, S. G., Petersen, S. O. y Møller, H. B. (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69 (2), pp. 143 – 154.

United Nations Agency for International Development. (2009). Evaluación de recursos pecuarios y agro-industriales para la reducción de emisiones de metano en Honduras. San Pedro Sula.

Xiaohua, W., Di Chonglan, Xiaoyan, H., Weiming, W., Xiaoping, J. y Shangyun, J. (2007). The influence of using biogas digesters on family energy consumption and its economic benefit in rural areas—comparative study between Lianshui and Guichi in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (5), pp. 1,018 – 1,024.

Zuñiga, S. (2016). Diseño de biodigestores y producción de electricidad. Recuperado de <http://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/produccion%20sostenible/Curso%20biodigestores.pdf>.

## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Resultados de laboratorio para estimación de parámetros de caracterización.

	<b>ID</b>	<b>Peso crisol (g)</b>	<b>Vol. Muestra (mL)</b>	<b>Peso crisol + materia seca (g)</b>	<b>Crisol + ceniza (g)</b>	<b>ST (mg/L)</b>	<b>SV (mg/L)</b>	<b>%SV (ST)</b>
	17151	56.4230	25	56.6621	56.5128	9564	5972	62.44249
	17151	51.7471	25	52.0407	51.8510	11744	7588	64.61172
	17152	57.7105	25	57.8637	57.7395	6128	4968	81.0705
Entrada de	17152	52.1153	25	52.2789	52.1456	6544	5332	81.47922
biodigestor	17156	50.9899	25	51.1053	51.0238	4616	3260	70.62392
	17156	51.7603	25	51.8799	51.7956	4784	3372	70.48495
	17158	58.9467	25	59.1389	58.9966	7688	5692	74.03746
	17158	56.5439	25	56.7383	56.5939	7776	5776	74.27984
	17150	57.6964	25	57.7956	57.7463	3968	1972	49.69758
	17150	50.3581	25	50.4624	50.4061	4172	2252	53.97891
	17153	56.1723	25	56.2318	56.2018	2380	1200	50.42017
Salida de	17153	48.8882	25	48.9473	48.9165	2364	1232	52.11506
biodigestor	17157	56.4391	25	56.4958	56.4682	2268	1104	48.67725
	17157	50.3736	25	50.4303	50.4023	2268	1120	49.38272
	17159	31.3640	25	31.4300	31.3953	2640	1388	52.57576
	17159	36.6775	25	36.7413	36.7095	2552	1272	49.84326

**Anexo 2.** Resultados de laboratorio para Demanda Química de Oxígeno.

	<b>ID</b>	<b>Resultado</b>	<b>Factor dilución</b>	<b>DQO (mg/L)</b>
Entrada de biodigestor	17151	342	20	8,550
	17152	308	20	6,160
	17156	187	20	3,740
	17158	265	25	6,625
	17150	227	5	1,135
Salida de biodigestor	17153	988	1	988
	17157	1,380	1	1,380
	17159	117	25	2,925

**Anexo 3.** Calculo de emisión por fermentación entérica.

<b>Categorías</b>	<b>Unidad animal (100 kg)</b>	<b>EF (kg CH<sub>4</sub>/año)</b>	<b>Emisión por Fermentación Entérica (Gg CH<sub>4</sub>/año)</b>
<b>Lactantes</b>	4	1	0.00000
<b>Destete</b>	48	1	0.00005
<b>Engorde</b>	280	1	0.00028
<b>Reposición</b>	33	1	0.00003
<b>Hembras reproductoras</b>	180	1	0.00018
<b>Machos reproductores</b>	24	1	0.00002
<b>Total</b>	569		0.00057



**Anexo 4.** Base de datos de consumo energético, promedio mensual.

<b>Mes</b>	<b>2016</b>
<b>Enero</b>	1,016
<b>Febrero</b>	2,151
<b>Marzo</b>	116
<b>Abril</b>	734
<b>Mayo</b>	1,046
<b>Junio</b>	838
<b>Julio</b>	998
<b>Agosto</b>	998
<b>Septiembre</b>	dp
<b>Octubre</b>	3,014
<b>Noviembre</b>	2,068
<b>Diciembre</b>	dp
<b>kW/Promedio</b>	1,297
<b>kW/anual</b>	12,979

**Anexo 5.** Informe de resultados emitidos por UNILAB.



Fuente: (United Laboratories [UNILAB], 2008)

## Anexo 6. Hoja de estimación de cargas de la granja de ganado porcino.

Hoja de estimación de cargas, granja porcina de Zamorano												
Sección	Tipo de cargas	Cantidad	Voltaje	Amperaje	Watts	Watts	Uso	Uso días/		kWh	kWh	
		x	x	=	CA	CD	hrs/día x	sem/	7 días =	CA	CD	kW
	Calentador eléctrico de agua	1	240		4,500		3	7	7	13.50		4.50
	Lavadora BLWTW4840YW	2		1.95	500		2	2	7	0.57		0.29
	Secadora BLWED4900YW	1		21	4,600		2	2	7	2.63		1.31
	Lamparas vestidores 32 W	10	120	0.53		640	12	7	7		76.80	6.40
	Televisor	1		6.50	6.5		3	5	7	0.01		0.00
	Ventiladores	2	120	0.42		100.8	3	5	7	0.22		0.07
	Refrigerador NWS8950G	1	120	0.96	115.2		24	7	7	2.76		0.12
1	Microondas	1			1,500		0.01	7	7	0.02		1.50
	Oasis	1	120	5	600		12	7	7	7.20		0.60
	Estufa	1	120		120		0.08	7	7	0.01		0.12
	Cargadores de celular	4	240	1	960		2	5	7	1.37		0.69
	Impresora	1	240	6	1440		0.33	5	7	0.34		1.03
	CPU	1	110	4	440		6	6	7	2.26		0.38
	Computador	1	110	1.50	1.5		6	6	7	0.01		0.00
	Focos halogenos	4				150	12	7	7		7.20	0.60
	Lamparas engorde 1	7	120	0.53		448	4	7	7	12.54		3.14
2	Lamparas engorde 2	7	120	0.53		448	4	7	7	12.54		3.14
	Lamparas	12	120	0.53		768	6	7	7	55.30		9.22
3	Focos halogenos	10				1500	12	7	7	18.00		1.50
	Lamparas destete	6	120	0.53		384	8	7	7	18.43		2.30
	Ventiladores maternidad	4	120	7	3360		3	7	7	10.08		3.36
4	Lamparas maternidad	8	120	0.53		512	12	7	7	6.14		0.51