

Potencial energético de la biomasa residual de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Andrea Carolina Landaverde Ventura

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2018

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Potencial energético de la biomasa residual de la Escuela Agrícola Panamericana, 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

Andrea Carolina Landaverde Ventura

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2018

Potencial energético de la biomasa residual de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Andrea Carolina Landaverde Ventura

Resumen. El aprovechamiento de la biomasa residual como fuente de energía renovable puede resultar una alternativa con ventajas ambientales y económicas. En el presente estudio se estimó la generación de biomasa residual de unidades productivas en la Universidad Zamorano y su potencial para generar energía mediante digestión anaerobia y procesos termoquímicos. Se caracterizó residuos de alimentos, poscosecha, olote, aserrín, gallinaza, estiércol vacuno, purines de cerdo, suero lácteo y aguas rojas. Se determinó el poder calorífico para la biomasa residual seca, e Índice de Producción de Metano (IPM) para biomasa húmeda. Se estimó una generación anual de 2,385 toneladas de biomasa residual húmeda y 1,372 m³ de agua residual, con lo cual se podría obtener hasta 624 MWh de electricidad y 1,040 MWh de energía térmica. Además, las 618 toneladas anuales de biomasa residual seca generarían 11,007 MWh de electricidad o 1,763 MWh de energía térmica. Esta investigación propone las bases para poder implementar sistemas de aprovechamiento energético en el campus Zamorano, comprobando la disponibilidad de biomasa residual y su potencial energético. Se concluye que la generación dispersa de residuos en el campus puede ser el principal obstáculo para su integración como alternativa energética, lo que implica la necesidad de planificar la cadena de suministro como parte de futuros estudios de factibilidad.

Palabras clave: Bioenergía, digestión anaerobia, energía renovable, poder calorífico, residuos, residuos-a-energía.

Abstract. Residual biomass utilization as a source of renewable energy can be an alternative with environmental and economic benefits. This study estimated the generation of residual biomass from productive units at Zamorano University and its potential to generate energy through anaerobic digestion and thermochemical processes. The characterization of food waste, post harvesting waste, corn cobs, sawdust, poultry waste, pig and cattle manure, dairy wastewater and slaughterhouse waste was performed. Heating power was determined for dry residual biomass and BMP for wet-fractionation of residual biomass. It was estimated a generation of 2,385 tons of wet biomass and 1,372 m³ wastewater, from which it could be obtained annually 624 MWh of electricity and 1,040 MWh of heat. Also, a generation of 618 tons of dry residual biomass was determined, from which it could be obtained annually 1,007 MWh of electricity or 1,763 MWh of heat. This study shows and overview of implementing a waste-to-energy system at Zamorano, proving the availability of residual biomass and its energy potential. In conclusion, the dispersion of waste generation in the campus is the main obstacle to its integration as an energy alternative, which implies the necessity to plan a waste biomass to energy supply chain as a part of future feasibility studies.

Key words: anaerobic digestion, bioenergy, heating power, renewable energy, waste, Waste-to-energy.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES.....	26
5. RECOMENDACIONES.....	27
6. LITERATURA CITADA.....	28
7. ANEXOS.....	33

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Parámetros fisicoquímicos preliminares realizados a los residuos.....	6
2. Parámetros fisicoquímicos realizados según clasificación de biomasa residual.....	6
3. Caracterización fisicoquímica del inóculo (Biol).....	7
4. Indicador de generación de residuos por unidad productiva.....	14
5. Caracterización preliminar de los residuos.....	15
6. Caracterización de biomasa residual seca.....	15
7. Determinación de nitrógeno total, carbono total y relación C/N.....	16
8. Caracterización de los efluentes de los reactores batch.....	19
9. Potencial energético de la biomasa residual húmeda de Zamorano.....	20
10. Potencial energético de la biomasa seca de Zamorano.....	21
11. Comparativo del potencial beneficio energético mediante implementación de Planta de cogeneración a partir de biogás.....	24
12. Comparativo del potencial beneficio energético de la implementación de una planta de ciclo combinado con gasificación directa.....	25
13. Potencial beneficio energético de la implementación de un horno secador utilizando olote como combustible.....	25
Figuras	Página
1. Mapa de unidades productivas seleccionadas para el estudio.....	4
2. Reactores batch alimentados con distintos residuos a cargas de 1 mg SV/mL.....	7
3. Mediciones de metano por método de volumetría.....	8
4. Preparación de muestra de biomasa en crisol para análisis en calorímetro.....	9
5. Generación de residuos de alimentos procedentes de bandeja y cocina en el Comedor Estudiantil “Doris Stone”, en el año 2017.....	11
6. Estimación de generación de residuos de lechuga en el año 2017.....	12
7. Generación de olote procedente de Planta de Semillas durante distintos ciclos.....	13
8. Tasa de producción diaria de metano para cada residuo.....	17
9. Producción acumulada de metano para cada residuo.....	17
10. Índice de producción de metano para cada residuo.....	18
11. Comparación de remoción en ST y SV para cada tipo de residuo.....	19
12. Potencial energético anual de la biomasa residual húmeda según mes.....	21

Anexos	Página
1. Determinación de sólidos totales.....	33
2. Análisis de Nitrógeno total.....	33
3. Montaje de reactores batch para determinación de IPM.....	34
4. Estimación de generación de aguas rojas provenientes de Planta de Cárnicos, de acuerdo al registro de animales sacrificados en el año 2017.....	34
5. Estimación de generación de suero lácteo proveniente de la Planta de Lácteos, de acuerdo al registro de producción de quesos en el año 2017.....	35
6. Inventario de animales según unidad productiva para el mes de Agosto de 2018.....	35

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial y la incertidumbre sobre las reservas de combustibles fósiles han derivado en la necesidad de desarrollar alternativas de producción de energía renovable y sostenible. El aprovechamiento de la biomasa residual puede ser una fuente de producción de energía con ventajas ambientales y económicas (Flores, 2017). Entre las ventajas se encuentran el manejo de residuos, la independencia de combustibles fósiles, la mejora socioeconómica de las áreas rurales y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de combustibles fósiles (Quintero y Quintero, 2015).

La biomasa residual es la fracción orgánica de los residuos y productos derivados de procesos biológicos (Budí, 2016). Según la fuente de generación, la biomasa se clasifica en residuos animales, agrícolas, forestales e industriales (Arévalo, 2013). Además, según el contenido de humedad, se diferencia la biomasa residual seca y húmeda. La biomasa residual seca incluye los subproductos sólidos provenientes de actividades agrícolas, forestales y ganaderas, por ejemplo, el aserrín, las podas de madera y residuos boreales. Por el contrario, la biomasa residual húmeda es el conjunto de flujos residuales de origen orgánico, que se generan de la actividad humana o animal, como las aguas residuales, residuos industriales y purines de animales (Garay, 2011).

El aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos exige una evaluación de las características fisicoquímicas de cada uno y las variadas tecnologías de aprovechamiento de los mismos (Budí, 2016). Entre las tecnologías de aprovechamiento energético se encuentran la conversión termoquímica, conversión fisicoquímica y conversión biológica. Es importante considerar los parámetros que influyen en los procesos de conversión para seleccionar la biomasa de calidad, el pretratamiento y la tecnología adecuada (Iakovou, Karagiannidis, Vlachos, Toka y Malamakis, 2010).

El principal factor de diferenciación en la selección de tecnología a utilizar es el porcentaje de humedad de la biomasa. Debido a sus características, la conversión termoquímica requiere de biomasa con niveles de humedad menores al 50%, presentando mejores rendimientos con valor inferior al 30% (Iakovou et al., 2010). Por otra parte, para la conversión bioquímica es más apropiado utilizar materias con altos contenidos de humedad, mayores al 50% (Escalante, 2010). Cuando la biomasa no cumple con los requisitos, se puede adecuar por medio de pretratamientos como el secado, o la combinación con otro tipo de materias de diferente composición, como en la codigestión (Ramírez, 2017).

Entre las tecnologías de conversión termoquímica, la combustión es un proceso factible para aprovechar la biomasa residual seca. La combustión aprovecha la energía química de la biomasa para generar calor, vapor y electricidad (Kam y Morey, 2009). Los parámetros que influyen en la calidad de biomasa para este proceso son el poder calorífico, contenido de humedad, porcentaje de cenizas, y tipo y porcentaje de elementos inorgánicos (García, Pizarro, Lavín y Bueno, 2012).

El poder calorífico (PC) es el calor que se desprende por unidad de masa de un combustible (Santander, 2011). Para considerar biomasa de calidad apta para combustión directa, el contenido de humedad debe ser inferior al 25% debido a que contenidos altos reducen el PC neto, la eficiencia de la combustión y de la temperatura generada (García et al., 2012). Además, si el contenido de cenizas es mayor al 0.7% se requiere limpieza constante de los equipos de combustión y altos valores de elementos inorgánicos provocan corrosión en calderas de combustión (Obernberger y Thek, 2010).

Por otra parte, la digestión anaerobia es la conversión de material orgánico a biogás, una mezcla de metano y dióxido de carbono, con un contenido energético de 20 - 40% (Sosnowski, Wieczorek y Ledakowicz, 2003). El metano tiene un poder calorífico de 9,500 kcal/m³ (Comisión Nacional de Energía, 1999). Dicha tecnología es comercialmente probada y ampliamente utilizada para tratar residuos orgánicos con contenidos de humedad superiores al 80 - 90% (Igoni, 2008). Es indispensable que la biomasa de calidad para digestión anaerobia cuente con ciertos parámetros para su óptima degradación, como son un porcentaje de humedad superior al 50% y una relación Carbono:Nitrógeno (C:N) de 20-30 (Ramírez, 2017). Es importante, determinar la degradabilidad expresada como fracción de sólidos volátiles (SV) transformables en metano (Carlin, 2015).

La digestión anaerobia se ve afectada por una alta relación C:N, evidenciándose en insuficiente N para las células de la biomasa. En cambio, sustratos con baja relación C:N, aumentan los niveles de amoníaco, el cual es tóxico para los microorganismos (Jain, 2015). Por esta razón, la codigestión, es decir, el tratamiento anaerobio de diferentes residuos orgánicos en un mismo proceso, es considerada una estrategia para optimizar la estabilidad y eficiencia de la digestión anaerobia (Shen, 2013).

Entre las principales limitantes que obstaculizan el incremento de la implementación de residuos para generación energética, está el alto costo de las operaciones de logística necesaria para garantizar la cadena de suministro de biomasa residual. Esta cadena puede incluir los siguientes componentes: cosecha o recolección de la biomasa y pretratamiento, almacenamiento, transporte y conversión energética (Iakovou et al., 2010).

Asimismo, existen factores limitantes asociados a la biomasa residual, como lo son su disponibilidad estacional y variabilidad en las características fisicoquímicas. Además, la biomasa residual está ligada a un sistema productivo que es cambiante de acuerdo a la demanda del mercado, lo cual se debe considerar para el suministro de biomasa residual a plantas de conversión energética. Otra limitante son los residuos perecederos, es decir, aquellos que en poco tiempo inician su proceso de descomposición en un periodo acelerado, lo cual reduce el tiempo que se puede transportar y almacenar (Iakovou et al., 2010).

En Zamorano se han realizado diferentes investigaciones en donde se identifica el potencial energético a partir de los tipos de biomasa, como residuos de maíz y frijol (Ventura, 2014). Además, otras investigaciones se han enfocado en distintos tipos de residuos como estiércol vacuno, purines y residuos de alimentos (Carlin, 2015). En el año 2017, la demanda energética anual de Zamorano fue 5,446,938 kWh, de la cual el parque solar tiene una cobertura energética del 26% (Chacón, 2017). Esto representa una oportunidad para poder aumentar la cobertura energética mediante el aprovechamiento de la biomasa residual.

Zamorano cuenta con distintas unidades que generan grandes cantidades de desechos. Sin embargo, la mayoría de estos residuos no son aprovechados y en ocasiones, se les da el manejo inadecuado. La conversión energética de residuos es una estrategia de energía limpia, renovable y sostenible. Por ello, se identifica una oportunidad para el diseño de estrategias que conduzcan a la gestión apropiada de los residuos y el aprovechamiento de su contenido energético. La construcción de un inventario de residuos con la respectiva estimación del potencial energético, constituye el primer paso requerido para evaluar la viabilidad técnica y económica requerida en la toma de decisiones para futuros proyectos.

Para el enfoque del estudio se delimitan los siguientes tipos de biomasa residual: estiércol vacuno, purines de cerdo, gallinaza, aserrín, suero lácteo, aguas residuales de matadero, olote, residuos de alimentos y residuos de vegetales. Se plantearon los siguientes objetivos:

- Desarrollar un inventario anual de la biomasa residual de las unidades seleccionadas de Zamorano.
- Caracterizar los residuos conforme a los requisitos de selección de la tecnología de conversión de su potencial energético.
- Estimar el potencial energético de la biomasa residual de las unidades seleccionadas de Zamorano y describir escenarios de integración.

2. METODOLOGÍA

Localización del estudio.

El estudio se desarrolló en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, ubicada en el Valle del Yeguaré, departamento Francisco Morazán, Honduras. Las unidades seleccionadas en las cuales se recolectará información primaria, son Planta de Semillas, Planta de Poscosecha, Unidad de Forestales y Comedor Estudiantil (Figura 1). Las unidades productivas, para las cuales se obtendrá información secundaria son Planta de cárnicos, Planta de lácteos, Ganado lechero, Avicultura y Ganado Porcino. Las unidades se seleccionaron debido a la disponibilidad del residuo, características y potencial energético del mismo.

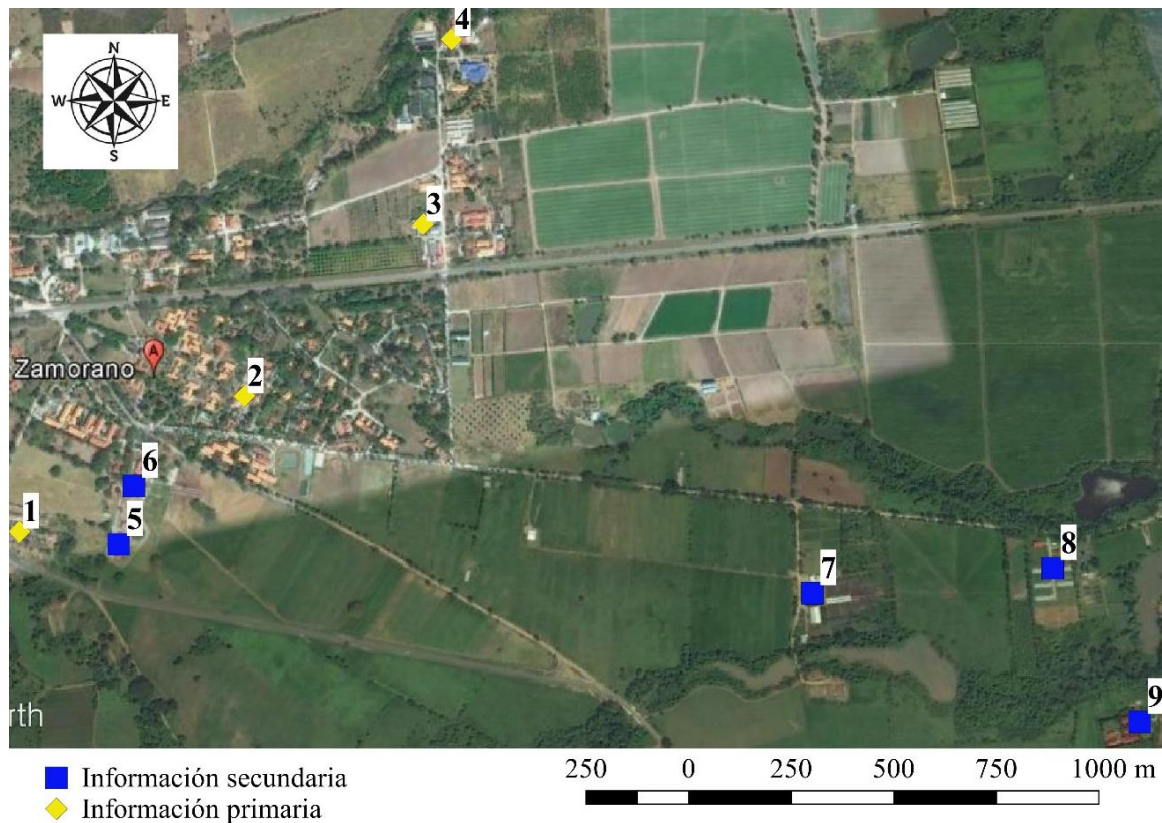


Figura 1. Mapa de unidades productivas seleccionadas para el estudio. (1) Forestales, (2) Comedor Estudiantil, (3) Planta de Semillas, (4) Planta de Poscosecha, (5) Planta de cárnicos, (6) Planta de lácteos, (7) Ganado Lechero, (8) Avicultura, (9) Ganado Porcino.

Cuantificación de residuos.

Recolección de información sobre ciclos de generación de residuos. Se realizaron visitas a planta y entrevistas a los encargados de cada unidad. Se recopiló información oral sobre los ciclos de generación de residuos y la gestión actual de los mismos. Se construyeron indicadores de generación de residuos y se evaluó la estacionalidad de los mismos, utilizando fuentes primarias de información (registros de producción anual) y fuentes secundarias (tesis).

Para el caso del Comedor Estudiantil, se realizaron pesajes diarios de los contenedores de residuos durante la cuarta semana del mes de mayo, usando una báscula de plataforma electrónica. Se solicitó información sobre el registro del Comedor estudiantil de la generación de residuos procedentes de bandeja, y el número de platos servidos. Con los resultados de los pesajes de residuos totales, se estimó el porcentaje de residuos orgánicos procedentes de bandeja y el porcentaje correspondiente a residuos provenientes de la preparación de alimentos.

Las actividades de cuantificación en la Planta de Poscosecha se realizaron durante tres semanas aplicando un balance de materia. Se registró el peso de las entradas de materias primas y las salidas de estas convertidas en productos terminados. La resta de ambos valores da como resultado el material orgánico de descarte, el cual se reporta en kg/semana. Se consideró la lechuga como materia prima y todos los productos finales elaborados a partir de ésta: Lechuga en hojas, Mix de ensalada, Romana 2 pack, Escarola 2 pack, Escarola amarilla cesta y Escarola morada cesta.

La selección de materia prima de lechuga se fundamentó en la dinámica de generación de residuos para la unidad, siendo la mayor proporción de estos un resultado del procesamiento de ésta. Los productos elaborados a base de lechuga equivalen actualmente al 14% del total de la producción de la planta de Poscosecha, sin embargo, el resto de los productos no presentan generación de residuos en cantidades significativas.

La biomasa residual procedente de Planta de Semillas fue estimada por medio de balance de materia, obteniendo los registros de entrada de materia prima del Proyecto Monsanto, y las salidas en producto final. Los ciclos productivos evaluados fueron del año 2013 a 2017. Así mismo, en la Unidad de Forestales, se cuantificó la producción de aserrín obtenido del área de carpintería, mediante el almacenamiento de este residuo en sacos durante una semana. Posteriormente fue pesado utilizando una báscula de plataforma. Se realizó un balance de materia, utilizando los registros de materia prima utilizada durante el mes de Junio de 2018, para calcular el porcentaje de residuos de aserrín.

Toma de muestras. Se recolectaron muestras de 1 kg en tres diferentes días para cada tipo de residuo. Las muestras de materia orgánica húmeda, como residuos de alimento y poscosecha, fueron recolectadas en bolsas plásticas y homogenizadas utilizando un molino de disco de 4 mm de pantanlla. Posteriormente se ingresaron al Laboratorio de Bioenergía y se refrigeraron a 5 °C.

Las muestras secas (olote y aserrín), fueron recolatadas en bolsas plásticas. Se redujo el tamaño de partícula del olote, usando un molino de disco de 4 mm de pantalla. Luego, se ingresaron las muestras al Laboratorio de Bioenergía y se conservaron en bolsas plásticas en un lugar seco, hasta su posterior análisis. Todas las muestras fueron analizadas por triplicado para los ensayos seleccionados.

Caracterización preliminar de los residuos.

Se realizó una caracterización preliminar de los residuos, para determinar los parámetros descritos en el Cuadro 1. La caracterización permitió establecer el tipo de tecnología adecuada para aprovechamiento energético y la selección de ensayos posteriores.

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos preliminares realizados a los residuos.

Parámetro	Método	Referencia
Sólidos Totales	2540 B	(AOAC, 2002)
Humedad		
Sólidos Volátiles	2540 E	

La determinación de sólidos totales (ST) se realizó al colocar crisoles tarados previamente a 600 °C con 15 g de residuos, en el caso de muestras sólidas, y 30 mL en el caso de muestras líquidas, en un horno a 105 °C por 12 horas. Luego, se registró el peso de la materia seca de cada crisol utilizando una balanza analítica. Los sólidos volátiles (SV) se determinaron al colocar cada crisol con materia seca en una mufla a 600 °C por dos horas, y se registró el peso nuevamente, de acuerdo con la metodología descrita en AOAC (2002).

Determinación del potencial energético. La biomasa residual se clasificó como húmeda y seca conforme a la categorización descrita por Escalante (2010). Si el contenido de humedad es mayor al 50%, los residuos son más adecuados para aprovechamiento mediante procesos biológicos como la digestión anaerobia. Si los residuos presentan contenido de humedad menor al 50%, se evalúa su potencial energético para combustión directa. Los residuos seleccionados se caracterizarán mediante los siguientes parámetros (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros fisicoquímicos realizados según clasificación de biomasa residual.

Tipo	Parámetro	Método	Referencia
Húmeda	Nitrógeno total	FOSS según Kjeldahl	(FOSS, 2003)
	Carbono total		(Adams, et al., 1951)
	Índice de Producción de Metano	BMP	(Angelidaki, et al., 2009)
Seca	Poder calorífico	C 2000 basic IKA	
	Contenido de cenizas	2540 E	(AOAC, 2002)

Determinación de Índice de Producción de Metano (IPM).

Montaje de reactores batch. Se realizó el montaje de 5 reactores batch de 250 mL para cada tipo de residuo, colocando 100 mL de inóculo y 100 mL de residuo diluido en agua destilada (Figura 2). Además, se montaron 5 reactores sólo con inóculo y agua destilada, denominados blanco. El inóculo (biol) fue recolectado del biodigestor de la Unidad de Ganado Porcino y se caracterizó para determinar los parámetros fisicoquímicos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Caracterización fisicoquímica del inóculo (Biol).

Parámetro	Método	Referencia
Sólidos Totales	2540 B	(APHA, 2005)
Humedad		
Sólidos Volátiles	2540 E	
Nitrógeno Total Kjeldhal	4500-Norg C	

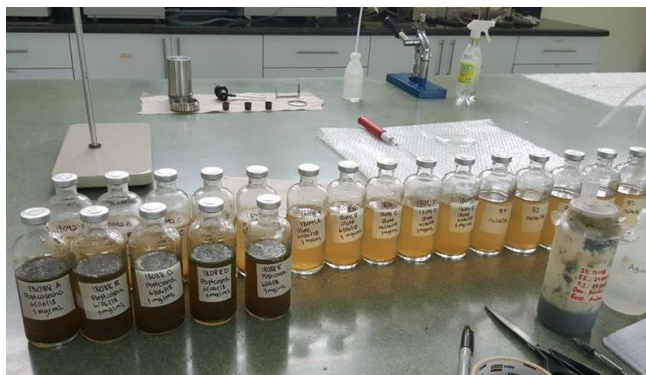


Figura 2. Reactores batch alimentados con distintos residuos a cargas de 1 mg SV/mL.

Se realizó el montaje de cada reactor a una carga orgánica de 1 mg SV/mL, y según el residuo, se calculó la cantidad de materia húmeda para cumplir dicha carga con la ecuación 1. Se inocularon 5 reactores para cada residuo, y 5 reactores como blanco. Se identificaron según tipo de residuo, carga orgánica y fecha de montaje de los reactores. Los 20 reactores batch se colocaron en una cámara incubadora a una temperatura aproximada de 35 °C, durante 48 y 51 días, hasta que se estabilizó la producción de metano.

$$\text{Total de SV (mg)} = \text{Carga orgánica} \left(\frac{\text{mg SV}}{\text{mL}} \right) \times \text{Volumen líquido de reactor (mL)} \quad [1]$$

Lecturas de metano. La medición de metano se realizó por el método de volumetría descrito por Wilkie, Smith y Bordeaux, (2004) en el cual se utiliza Hidróxido de Potasio (KOH) en un contenedor de vidrio conectado al reactor batch por medio de una manguera, como se muestra en la Figura 3. El volumen desplazado de KOH representa el volumen generado de metano en el reactor. Las mediciones se realizaron cada tres días, hasta que el volumen acumulado en las últimas tres repeticiones fue constante.

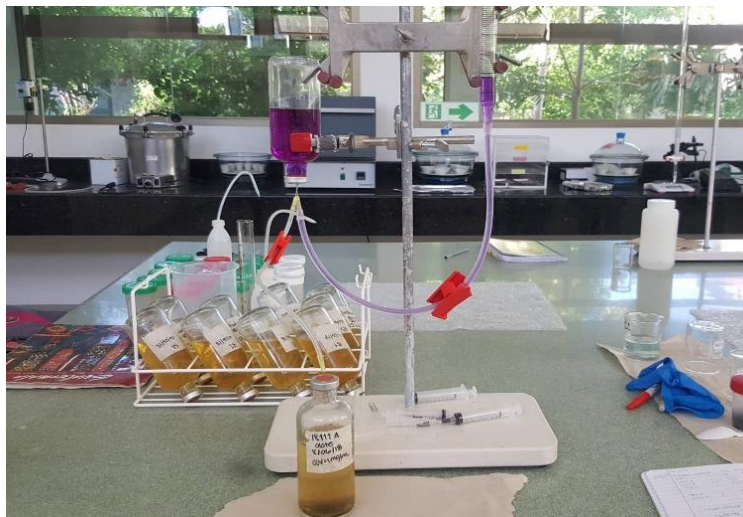


Figura 3. Mediciones de metano por método de volumetría.

Los valores de temperatura y presión atmosférica se registraron en cada medición, para luego hacer una corrección del metano producido a condiciones estándares de presión temperatura y volumen, utilizando la ecuación 2:

$$V = \frac{V_m \times P_m \times T}{P \times T_m} \quad [2]$$

Donde:

V= Volumen de CH₄ corregido a condiciones normales (mL)

V_m= Volumen de CH₄ de cada medición registrada (mL)

P_m= Presión registrada durante cada medición (mm Hg)

T= Temperatura a condiciones normales (Kelvin)

P= Presión a condiciones normales (mm Hg)

T_m= Temperatura ambiental (Kelvin)

La construcción de curvas acumuladas de generación de metano y el cálculo de IPM se realizaron con los valores normalizados de producción de metano, utilizando la ecuación 3:

$$\text{IPM}(\text{mL CH}_4/\text{mg SV}) = \frac{\text{Volumen CH}_4 \text{ acumulado (mL)}}{\text{Volumen reactor (mL)} \times \text{Carga orgánica} \left(\frac{\text{mg SV}}{\text{mL}} \right)} \quad [3]$$

Eficiencia en remoción de sólidos. Al finalizar el proceso de digestión, el efluente de los reactores fue caracterizado según los parámetros de pH, sólidos totales, sólidos volátiles y nitrógeno amoniacal. Se determinó la eficiencia en remoción de sólidos totales y volátiles, debido a que ésta muestra el porcentaje de materia orgánica que no puede ser convertida mediante la digestión anaerobia. Para ello, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Eficiencia en remoción ST (\%)} = \frac{\text{ST iniciales (\%)} - \text{ST finales (\%)}}{\text{ST iniciales (\%)}} \times 100 \quad [4]$$

$$\text{Eficiencia en remoción de SV (\%)} = \frac{\text{SV iniciales (\%)} - \text{SV finales (\%)}}{\text{SV iniciales (\%)}} \times 100 \quad [5]$$

Determinación del poder calorífico (PC). Se determinó el PC por medio del análisis en bomba calorimétrica de oxígeno adiabático C 2,000 basic IKA. La preparación de la muestra consistió en compactar 1 g de muestra previamente homogenizada y se agregó en el crisol del calorímetro, el cual se colocó en la base de la bomba del calorímetro. Luego, se ató el hilo de ignición en la superficie de la muestra (Figura 4). Se agregó en la bomba 5 mL de agua destilada, y finalmente se colocó la base dentro la bomba para ser analizada. El resultado se muestra en J/g, el cual indica el poder calorífico superior de la muestra.



Figura 4. Preparación de muestra de biomasa en crisol para análisis en calorímetro.

Estimación del potencial energético. Teniendo los resultados de IPM, se calculó la cantidad de metano que se puede generar con base en la cantidad de residuo disponible por medio de digestión anaerobia. Se calculó utilizando el dato del potencial calorífico del metano, el cual es de 9,500 kcal/m³ normalizados de metano (Comisión Nacional de Energía, 1999). Luego, se calculó la conversión energética de metano en electricidad, considerando la eficiencia de conversión de un generador eléctrico operado con biogás que es de 33% (Ventura, 2014). Con el valor obtenido del poder calorífico para la biomasa residual seca, se estimó el potencial energético utilizando la siguiente ecuación:

$$M \times PC = MJ \quad [6]$$

Donde

M= Masa del residuo (kg)

PC= Poder calorífico (MJ/kg)

MJ= Energía (MJ)

Identificación de escenarios de integración.

Se construyó una tabla resumen que representa el inventario de energía disponible en la biomasa residual. A partir de la disponibilidad estacional de los residuos y tesis realizadas en años previo. Se identificaron posibles rutas de cadena de suministro enfocadas en usuarios potenciales, basándose en la información sobre el consumo energético actual de unidades productivas.

De acuerdo al volumen y características de cada residuo, se realizó una propuesta de tecnología aplicable con base en tres escenarios. El primero consistió en el aprovechamiento de la biomasa residual húmeda, utilizando digestión anaerobia, por medio de una planta de cogeneración para producir biogás. El segundo escenario considera el aprovechamiento de la biomasa residual seca, a través de la implementación de un gasificador para generación de electricidad. El último escenario consiste en el aprovechamiento del olote como combustible sólido para un horno secador y suplir los requerimientos energéticos de la Planta de Semillas. Las secadoras de la Planta de Semillas consumen 29,286 galones de diésel al año de acuerdo a la Oficina de Compras y Suministros de Zamorano. Además, se identificaron los mayores obstáculos para la implementación de un sistema de generación de energía a partir de la biomasa residual disponible en el campus.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de biomasa residual.

Los pesajes realizados en el Comedor Estudiantil determinaron que el promedio de generación diaria de residuos orgánicos, incluyendo residuos de cocina y residuos de bandeja, es 438 kg. Del total de los residuos del comedor, 69.97% proviene de la preparación de alimentos y 30.03% son residuos de bandeja. Acorde al registro de pesos de residuos de alimentos provenientes de bandeja generados en el comedor, se evidencia que la producción de residuos no es constante (Figura 5). Los meses que presentan menor generación de residuo son enero, abril, agosto y diciembre, los cuales coinciden con los períodos vacacionales de los estudiantes.

Acorde con registros de la administración del Comedor Estudiantil, el promedio de platos servidos en el mes de mayo de 2018 fue 2,003 al día. A partir de esta información, se estimó que el promedio de producción de residuos de alimentos por plato servido es de 0.22 kg al día.

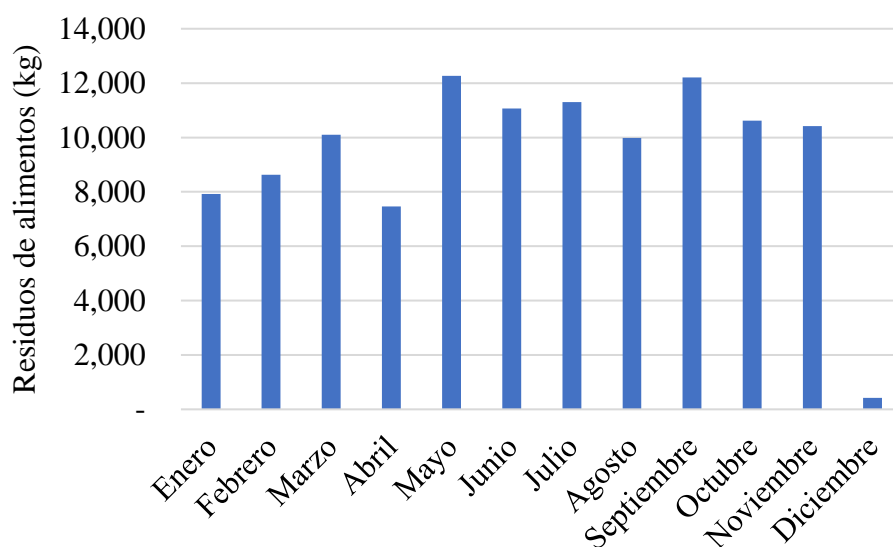


Figura 5. Generación de residuos de alimentos procedentes de bandeja y cocina en el Comedor Estudiantil "Doris Stone", en el año 2017.

Se determinó que la generación semanal de residuos orgánicos en la Planta de Poscosecha es 1,066.70 kg. Los residuos de lechuga representan el 53.44% de la materia prima que se recibe para la elaboración de productos de Lechuga en hojas, Mix de ensalada, Romana 2 pack, Escarola 2 pack, Escarola amarilla cesta y Escarola morada cesta. De acuerdo a registros proporcionados por la planta Poscosecha, se estimó la generación de residuos de lechuga del año 2017 (Figura 6), donde se muestran las variaciones según la disponibilidad de materia prima durante ese mes.

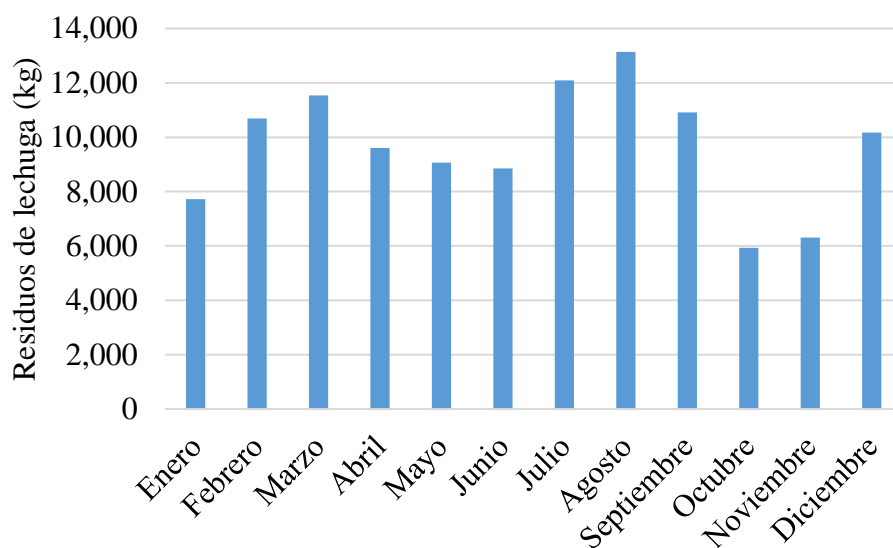


Figura 6. Estimación de generación de residuos de lechuga en el año 2017.

Acorde a los registros de la Planta de Semillas, la generación de residuos orgánicos provenientes del Proyecto Monsanto varía de acuerdo a los ciclos de producción de maíz (Figura 7). Dicho proyecto abastece de materia prima a la Planta de Semillas durante dos ciclos productivos al año con una duración promedio de 7 meses. A partir de esta información, se determinó que la generación anual promedio es de 610,250 kg de olote. Cada ciclo comprende las actividades de siembra en campo, cosecha y transporte hacia la Planta de Semillas.

La cosecha en campo se realiza manualmente, retirando la tuza y el estigma del fruto, para obtener las mazorcas de maíz que son trasladadas a la Planta de Semillas. En la planta se recibe la mazorca con una humedad aproximada del 35%, y posteriormente se separa la semilla, materia inerte y olote. Se estima que el olote representa el 11% del peso total de la materia prima que se recibe. Actualmente, dichos residuos son trasladados a una compostera, o distribuidos entre algunas unidades productivas del campus que requieran su uso, como por ejemplo la Unidad de Ornamentales y la Unidad de Agricultura Orgánica.

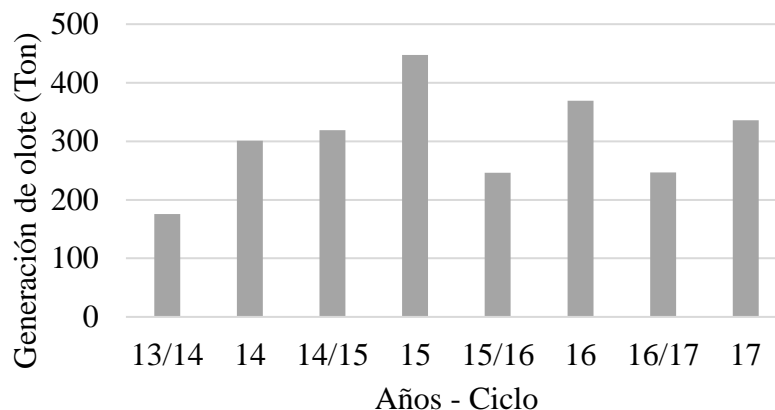


Figura 7. Generación de olote procedente de Planta de Semillas durante distintos ciclos.

La Unidad de Forestales tiene una producción destinada a venta externa, y una producción para uso interno. Las especies maderables utilizadas como materia prima son en su mayoría pino, melina y cedrillo. Los residuos de aserrín representan el 2% de la madera procesada en el área de carpintería. Se determinó que la generación de residuos de aserrín, provenientes de la sección de carpintería en la Unidad de Forestales es de 139 kg a la semana. Sin embargo, la cuantificación de este residuo solamente consideró área de carpintería y no el área de aserradero, por lo cual el resultado fue bajo. Además, la generación de este residuo es inconstante, ya que depende de la demanda de servicios externos e internos.

La dinámica de generación de residuos de cada planta varía de acuerdo a la naturaleza de cada proceso productivo. El Cuadro 4 presenta los indicadores de generación de residuos en cada unidad, incluyendo la cuantificación de residuos obtenida por datos secundarios, los cuales están estrechamente relacionados con la eficiencia de los procesos. En la Planta de Semillas los residuos de olote se generan aproximadamente cada siete meses, por lo cual requiere de almacenaje previo a su disposición final. En cambio, el Comedor Estudiantil y la Planta de Poscosecha generan diariamente residuos orgánicos de acelerada descomposición, los cuales son transportados diariamente a la compostera.

La Unidad de Forestales, aunque genera diariamente residuos de aserrín, no son lo suficientemente abundantes para ser movilizados y se acumulan por semanas en un lugar específico de la unidad. Posteriormente son movilizados a unidades productivas en donde este requiera. En el caso de la Unidad de Ganado Lechero, está expresada en el Cuadro 4 solamente la fracción recuperable de estiércol, que es aproximadamente el 40 - 50%, debido al sistema semi-estabulado bajo el cual trabaja la Unidad (Carlin, 2015).

Cuadro 4. Indicador de generación de residuos por unidad productiva.

Unidad	Tipo de residuo	Indicador	Referencia
Comedor estudiantil	Residuos de alimentos	0.22 kg/plato/día	
Planta de Poscosecha	Residuos de lechuga	53 kg/ 100 kg de materia prima	
Unidad de Forestales	Aserrín	0.02 kg/ kg de madera	
Planta de Semillas	Olote	110 kg/ton de materia prima	
Avicultura	Gallinaza	0.099/kg/ave/día	(Yepez, 2017)
Ganado porcino	Purines de cerdo	2.14 kg/ cerdo de 100 kg/día	(Armas, 2016)
Ganado lechero	Estiércol vacuno	13.8 kg/vaca/día	(Carlin, 2015)
Planta de lácteos	Suero lácteo	8.7 L suero/ kg de queso Zamorella	(González, 2017)
		7.2 L/ kg queso Crema Picante	
		8.5 L/ kg queso Cheddar	
Planta de cárnicos	Aguas rojas	375.6 L/cerdo sacrificado 476.5 L/res sacrificada	(González, 2017)

Caracterización preliminar de residuos. Las características de los residuos son fundamentales para determinar el tipo de tecnología adecuado para su aprovechamiento energético. Los resultados de los análisis preliminares realizados a los residuos se muestran en el cuadro 5. Según Zhang et al. (2006), el contenido de humedad en residuos de alimentos se encuentra entre 66 - 73%, lo cual coincide con los resultados obtenidos.

Debido al alto contenido de humedad de los residuos de alimentos y residuos de poscosecha, la conversión biológica, como la digestión anaerobia, es más adecuada para tratar este tipo de residuo en comparación con las tecnologías de conversión termoquímica (Zhang et al., 2006). Los residuos de vegetales y frutas tienen un contenido de humedad que varía entre 80 - 90%, similar al valor encontrado en los residuos de poscosecha, compuesto mayormente por lechuga (Jolanun, Tripetchkul, Chiemchairsri, Chaiprasert y Towprayoon, 2004).

Las características del aserrín y el olote, debido a su contenido de humedad inferior al 25%, indican que son más aptos para procesos termoquímicos. El alto contenido de ST y SV del olote se debe a su contenido de hemicelulosa, 40%; celulosa, 29%; y lignina, 16%, según Blandino et al. (2016). Además, existen estudios que evalúan el uso de olote como sustrato para digestión anaerobia, debido a su contenido de hemicelulosa y celulosa que puede ser degradada por microorganismos (Blandino, Claudio, Soldano y Reyneri, 2016).

Cuadro 5. Caracterización preliminar de los residuos.

Residuo	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles en base húmeda (%)	Humedad (%)	Referencia
Residuos de alimentos	29.55 ±1.65	25.18 ±3.43	70.45 ±1.65	
Residuos de poscosecha	4.62 ±0.05	3.67 ±0.08	95.38 ±0.05	
Aserrín	83.91 ±3.66	83.41 ±3.57	16.09 ±3.66	
Olote	89.44 ±0.23	87.67 ±0.48	10.57 ±0.23	
Gallinaza	22.18	16.71	77.82	(Yepez, 2017)
Purines de cerdo	32.01	26.53	67.99	(Armas, 2016)
Estiércol vacuno	20.65	15.88	79.35	(Carlin, 2015)
Suero lácteo	7.79	5.86	92.21	(González, 2017)
Aguas rojas	1.61	1.49	98.39	(González, 2017)

Los resultados obtenidos para el poder calorífico y cenizas se detallan en el Cuadro 6, donde se detalla la media y la desviación estándar. El valor de cenizas obtenido es similar al reportado por Relova et al. (2010), el cual es de 0.44%. El valor del PC obtenido es comparable con otros estudios, donde se encontró que el aserrín tuvo un poder calorífico de 16,200 J/g (Relova et al., 2010). Los resultados de la caracterización del aserrín indican que este material combustible presenta mayor poder calorífico y reduce los costos en el generador de calor, debido a la poca cantidad de cenizas que produce.

Las características del olote muestran que debido a que su porcentaje de cenizas es superior a 0.7% (Cuadro 6), no es un sustrato considerado de calidad para combustión directa, debido a se requerirá constante limpieza de los equipos convencionales de combustión (Oberberger y Thek, 2010). Sin embargo, la gasificación se presenta como una mejor alternativa para el aprovechamiento energético del olote. La gasificación es una tecnología de conversión térmica que produce un gas de síntesis limpio para su posterior generación de calor o energía. Además, es flexible en la alimentación y tipología del producto, ya que toda biomasa con contenido de humedad inferior a 35% puede ser gasificada (Almeida, 2014).

Cuadro 6. Caracterización de biomasa residual seca.

Residuo	Poder calorífico (J/g)	Contenido de cenizas (%)
Aserrín	17,835.33 ± 49.33	0.43 ±0.26
Olote	16,410.20 ± 19.33	1.76 ±0.32

Los valores obtenidos de nitrógeno en el estudio se reportan en el Cuadro 7. Los valores obtenidos indican que los sustratos son adecuados para ser utilizados en procesos de digestión anaeróbica. El valor de residuos de alimentos (1.27%) concuerda con los obtenidos por Abel (2011) el cual es de 1.69% de N. La variación puede ser debido a heterogeneidad en los residuos de alimentos.

La importancia de evaluar la relación C/N se debe a que un alto valor puede resultar en baja producción de metano. La relación C/N de residuos de poscosecha (Cuadro 7) concuerda con el valor obtenido por otros autores, el cual es de 13 para residuos de vegetales (Asquer, Pistis y Scano, 2013). La cantidad y calidad del biogás depende de la composición del sustrato, el carbono es la fuente de energía de los microorganismos metanogénicos y el nitrógeno interviene en la formación células nuevas (Food and Agriculture Organization, 2011).

Cuadro 7. Determinación de nitrógeno total, carbono total y relación C/N.

Residuo	Nitrógeno Total	Unidades	CT (%)	C/N	Referencia
Residuos de alimentos	12.73	g/kg	25.18	19.78	
Residuos de poscosecha	2.41	g/kg	3.67	15.23	
Olote	2.30	g/kg	48.71	211.76	
Gallinaza	201.90	mg/L	41.85	20.72	(Yepez, 2017)
Purines de cerdo	ND	ND	ND	ND	
Estiércol vacuno	0.21	g/kg	0.158	7.5	(Carlin, 2015)
Suero lácteo	8203.67	mg/L	ND	39	(González, 2017)
Aguas rojas	292.5	mg/L	ND	26	(González, 2017)

La caracterización del inóculo (biol) extraído del biodigestor de la Unidad de Ganado Porcino mostró resultados de 2.73% \pm 0.05 de sólidos totales (ST), y 1.31% \pm 0.05 de sólidos volátiles (SV). Los ST y SV varían de acuerdo al tiempo de digestión que tenga el sustrato, lo cual se relaciona con la frecuencia de alimentación del biodigestor. Dicho biodigestor opera con estiércol de cerdo, a cargas superiores a 1 g SV/L. El nitrógeno total de este inóculo fue de 1,340 mg/L NH₃-N, lo que indica la alta presencia de compuestos inhibidores a la cual funciona este biodigestor (Armas, 2016).

Determinación del Índice de Producción de Metano. Los datos registrados de la producción diaria de metano (CH₄) para cada reactor con una carga de 1 mg SV/mL, fueron variables según el tipo de residuo (Figura 8). Los residuos de alimentos produjeron la mayor cantidad de metano, mientras que el olote produjo la menor cantidad.

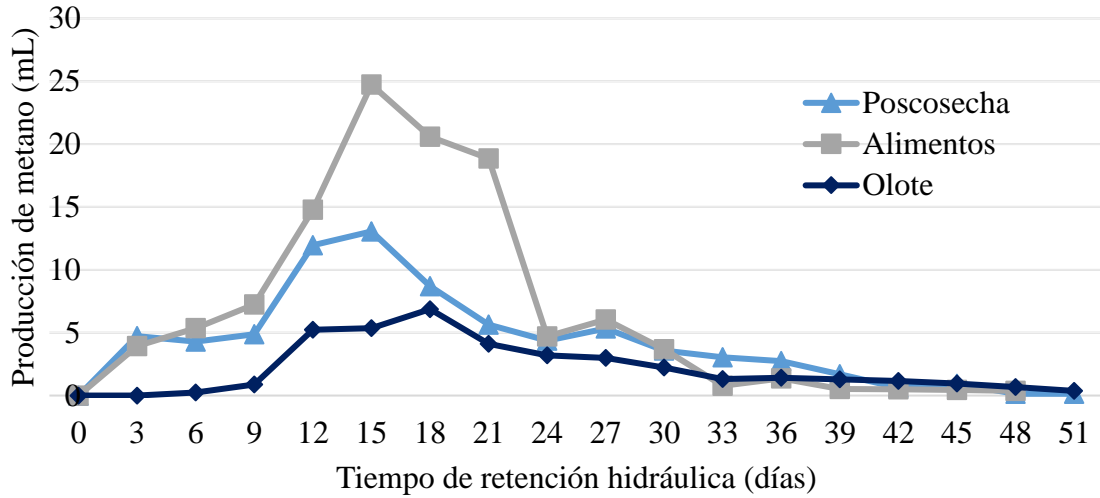


Figura 8. Tasa de producción diaria de metano para cada residuo.

Con la medición del metano acumulado se puede conocer el tiempo de retención hidráulica (TRH) necesarios para la digestión de la mayor parte de materia orgánica en gas (Figura 9). El TRH se estimó cuando los residuos alcanzaron el 90% de producción de metano, siendo 48 días para residuos de alimentos, y 51 días para los residuos de poscosecha y olote. Al tener un desbalance entre carbono y nitrógeno, el olote puede requerir mayor tiempo de retención en comparación con los residuos de alimentos, por lo que la codigestión del olote es recomendada para incrementar la productividad de metano.

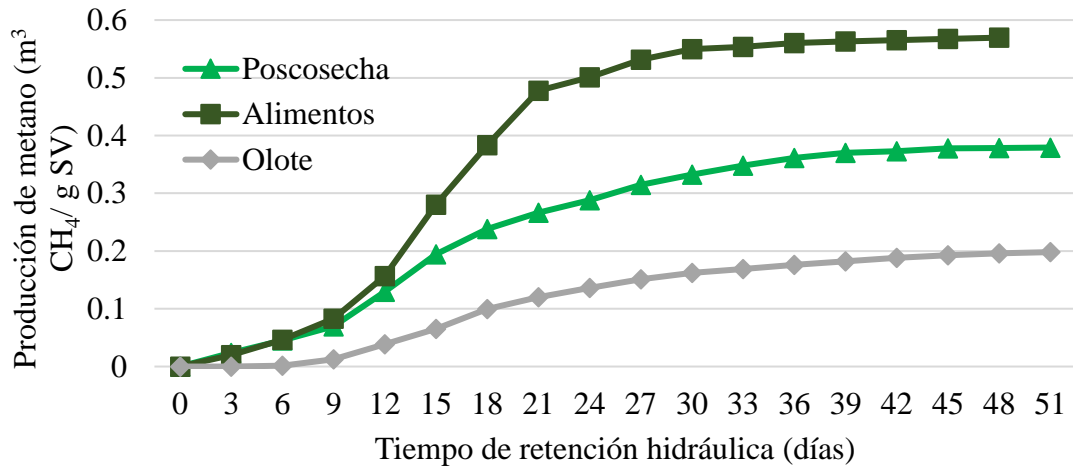


Figura 9. Producción acumulada de metano para cada residuo.

Se calculó el IPM para cada residuo, utilizando los datos corregidos de producción acumulada de metano (Figura 10). El resultado de IPM de residuos de alimentos se encuentra alto con respecto al reportado por Carlin (2015), con 0.47 mL CH₄/mg SV. Angelidaki et al. (2009) indicaron que el valor del IPM puede estar influenciado por diversos factores, como tamaño de partícula, tipo de sustrato y actividad metanogénica del inóculo. En el caso de residuos de alimentos influye la heterogeneidad de su composición. El IPM de poscosecha es similar al reportado en otros estudios, donde se encuentra que para los residuos vegetales la producción está entre 0.19 a 0.4 mL/mg SV (Gunaseelan, 2004).

El olote presentó la menor producción acumulada de metano, lo cual puede ser debido a que solamente la celulosa y hemicelulosa en su composición son degradables, mientras que la lignina no puede ser digerida por las bacterias (Zheng, Zhao, Xu y Li, 2014). Por ello, se debe hacer un pretratamiento para remover la lignina de dicho sustrato, o puede usarse en codigestión con otro residuo.

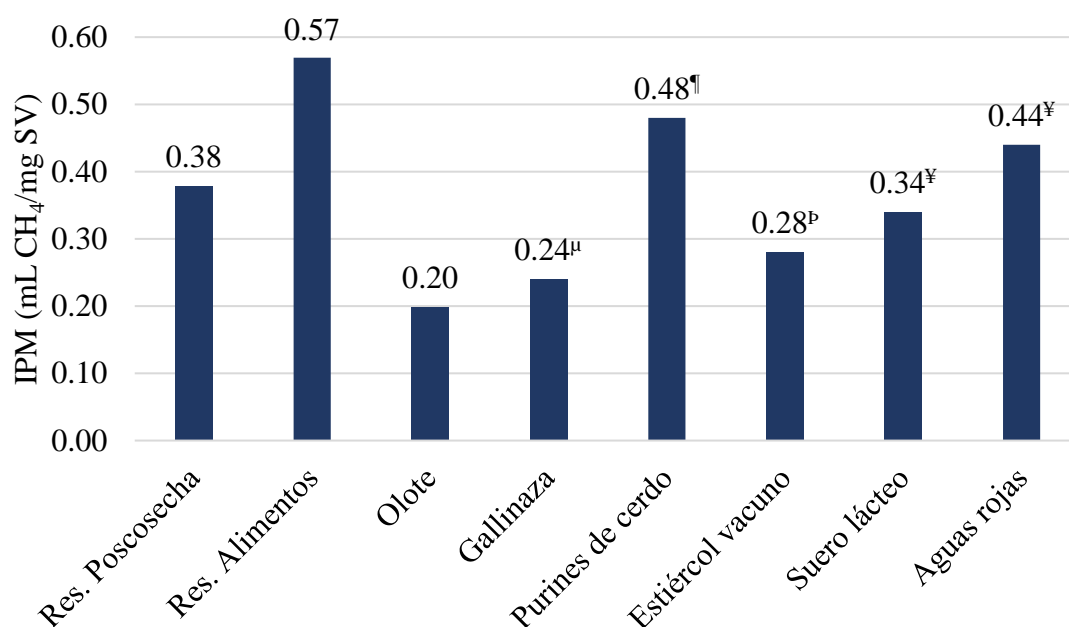


Figura 10. Índice de producción de metano para cada residuo.

μ: (Yepez, 2017), ¶: (Armas, 2016), P: (Carlin, 2015), ¥: (González, 2017)

El contenido de los reactores fue analizado al concluir el proceso de generación de metano (Cuadro 8) para evaluar el desempeño de la digestión anaerobia. Los reactores presentaron estabilidad en el proceso, y según los valores de pH entre 7 - 7.4 que se encuentran en un rango neutro, y los procesos no tuvieron inhibición por acumulación de nitrógeno amoniacal. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal superiores a 2,000 mg/L inhiben el proceso de digestión anaerobia, afectando el crecimiento de microorganismos metanogénicos (Marin-Batista, Castro y Escalante, 2015).

Cuadro 8. Caracterización de los efluentes de los reactores batch.

Residuo	pH	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	NTK (mg/L)
Res. Alimentos	7.42 ± 0.01	1.35 ± 0.05	0.71 ± 0.07	264.83 ± 62.42
Res. Poscosecha	7.44 ± 0.03	1.77 ± 0.05	0.78 ± 0.05	271.72 ± 9.75
Olote	7.39 ± 0.02	1.26 ± 0.04	0.67 ± 0.08	146.21 ± 7.80
Blanco	7.46 ± 0.02	1.23 ± 0.02	0.45 ± 0.01	510.34

Eficiencia de remoción. La remoción de SV se debe a la conversión de los sólidos orgánicos a materia gaseosa, ya que todos los reactores batch produjeron metano (Watson y Solano, 2011). La remoción en ST y SV de residuos de alimentos, residuos de poscosecha y olote se presentan en la Figura 11.

Los residuos de poscosecha y residuos de alimentos mostraron los mayores porcentajes de remoción, lo cual puede estar asociada a la degradabilidad de los residuos. Los valores de remoción de SV de olote concuerdan con el valor reportado por Surra et al. (2017), con 67.7%, lo cual indica la degradabilidad de dicho sustrato es menor, y por dicha razón su producción de metano fue baja. Esto sugiere que la utilización de residuos de alimentos y poscosecha incrementa la producción de metano, mientras que los residuos de olote requieren pretratamiento o codigestión para obtener resultados óptimos. La remoción de sólidos volátiles demuestra que la digestión anaerobia es un tratamiento efectivo para los sustratos evaluados.

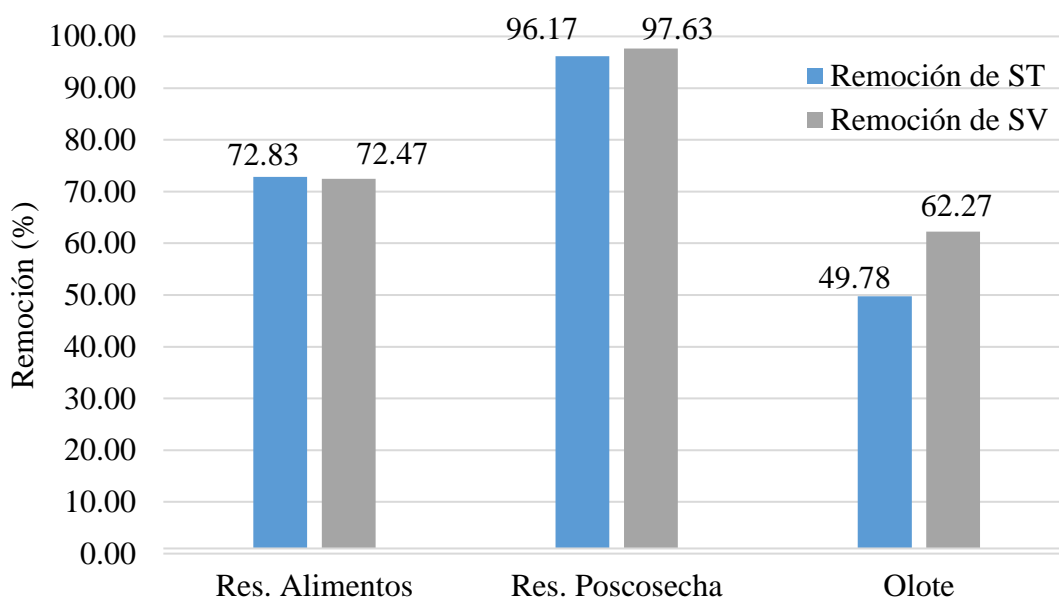


Figura 11. Comparación de remoción en ST y SV para cada tipo de residuo.

Potencial energético de la biomasa residual húmeda.

De acuerdo con la información obtenida, se puede asumir una generación anual de 2,385 toneladas al año de biomasa residual sólida, y 1,372 m³/año de biomasa residual líquida provenientes de las unidades productivas seleccionadas. Si todo el material fuera aprovechado, mediante conversión anaerobia, se podrían generar 171,173 m³ de metano al año. Considerando una eficiencia de conversión eléctrica y térmica de 33% y 55%, respectivamente, al año se podrían obtener hasta 624 MWh de energía eléctrica y 1,040 MWh de energía térmica utilizando una planta de cogeneración (Cuadro 9).

Cuadro 9. Potencial energético de la biomasa residual húmeda de Zamorano.

Residuo	Cantidad generada anual	Unidades	Producción de CH₄ (m³/año)	Energía eléctrica (MWh)	Energía térmica (MWh)
Res. Poscosecha	62.00	Ton	864.63	3.15	5.25
Res. Alimentos	112.40	Ton	16,131.95	58.82	98.03
Gallinaza	39.64	Ton	1,589.53	5.80	9.66
Purines de cerdo	462.70	Ton	58,915.00	214.80	358.01
Estiércol vacuno	1,707.89	Ton	75,928.94	276.84	461.40
Suero lácteo	653.22	m ³	13,025.34	47.49	79.15
Aguas rojas	718.50	m ³	4,717.79	17.20	28.67
Total			171,173.18	624.10	1,040.16

La disponibilidad de la biomasa residual varía en el año, por lo cual la generación de energía también variará (Figura 12). Los meses en que se observa una reducción en la generación energética son enero, febrero, abril, agosto y es más acentuada en diciembre. La disminución en producción de energía está asociada a la disponibilidad de residuo. En el comedor estudiantil, por ejemplo, debido a los períodos vacacionales de los estudiantes, se disminuye la generación de residuos. Además, por ser el período vacacional del personal en diciembre, también se reduce la producción en plantas de agroindustria, como la Planta de Poscosecha, Planta de cárnicos y Planta de Lácteos. El resto de los residuos se mantienen en generación poco variable durante el año. La mayor generación de energía se presenta en el mes de mayo con un potencial energético total de 165 MWh, lo cual coincide con el regreso de los estudiantes de cuarto año de su pasantía externa, por lo cual existe mayor generación de residuos. El potencial energético en diciembre es de 134 MWh, siendo éste valor el más bajo durante todo el año.

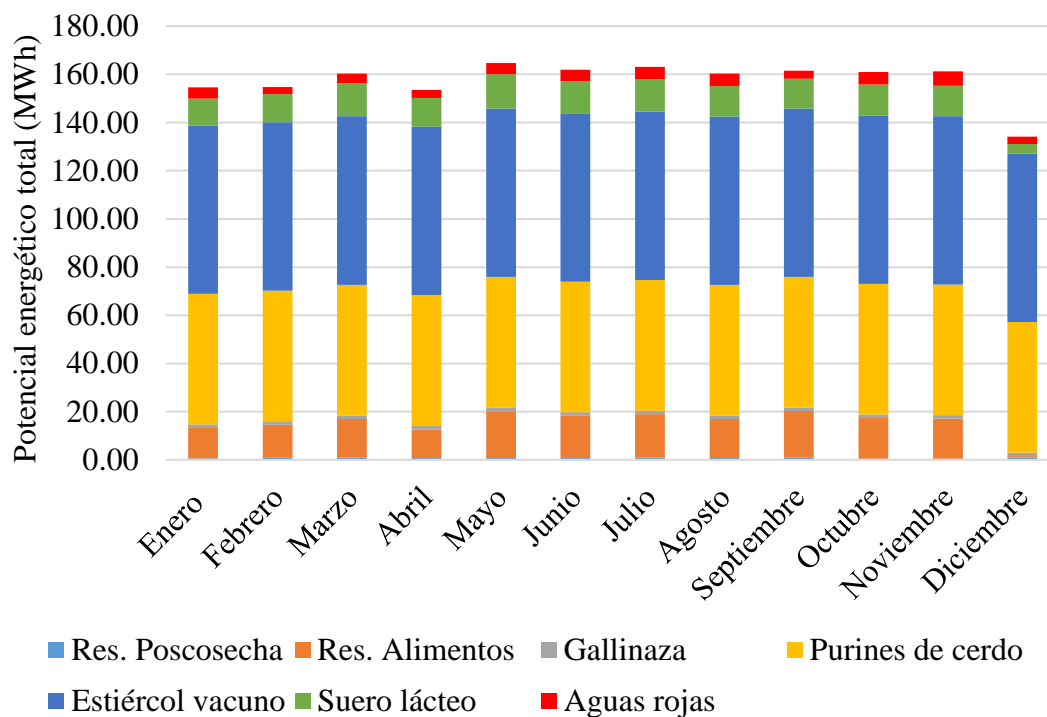


Figura 12. Potencial energético anual de la biomasa residual húmeda según mes.

Potencial energético de la biomasa residual seca.

Para el caso de la biomasa residual seca, el campus de Zamorano reporta una generación anual de 7.25 y 610.25 toneladas de residuos de aserrín y de olote, respectivamente. Con estos residuos se podrían generar un total de 2,518 MWh. Considerando el aprovechamiento utilizando un gasificador y una conversión eléctrica del 40% se podrían generar 1,007 MWh. Por otra parte, se podría aprovechar para generación de calor, en la cual teniendo en cuenta una conversión térmica de 70% se podría obtener 1,763 MWh anuales (Cuadro 10).

Cuadro 10. Potencial energético de la biomasa seca de Zamorano.

Residuo	Cantidad generada (ton/año)	Energía total (MWh/año)	Energía eléctrica (MWh/año)	Energía térmica (MWh/año)
Aserrín	7.25	30.14	12.06	21.10
Olote	610.25	2,488.00	995.20	1,741.60
Total	617.50	2,518.14	1,007.26	1,762.70

La disponibilidad del olote se considera constante, debido a que por su gran volumen de generación cada siete meses, éste puede almacenarse para ser utilizado a lo largo del año. La generación de aserrín en cambio, es variable de acuerdo a la producción interna y externa y puede ser almacenado para su posterior uso. Sin embargo, debido a su bajo volumen de generación, no es un sustrato con suficiente disponibilidad para la generación energética.

Escenarios de integración.

Fundamentado en la características del residuo, su disponibilidad y los requerimiento energéticos en el campus Zamorano, se plantean tres posibles escenarios para el aprovechamiento energético de la biomasa residual. Dichos escenarios son: i) una planta de cogeneración utilizando biogás, ii) un gasificador para generación de electricidad y iii) un horno secador para la Planta de Semillas utilizando olote como combustible.

Planta de cogeneración con biogás. El establecimiento de una planta de cogeneración utilizando biogás podría ser en el área de Agroindustria, junto a la Planta de Lácteos y Cárnicos. La ubicación facilitaría la distribución de energía a la Planta de Cárnicos y Planta de Lácteos, y el resto de energía eléctrica generada puede ser conectada a la red. Una planta de cogeneración utilizando biogás genera 35% de energía eléctrica, 55% de energía térmica y 10% de pérdida (Rutz, 2015).

Dicha planta estaría situada tentativamente en el área de Agroindustria, para suplir las demandas energéticas de la Planta de Cárnicos y Planta de Lácteos. Se solicitaron los consumos energéticos promedio mensuales en el año 2017, los cuales son 32,602 kWh para Planta de Cárnicos y 23,266 kWh para Planta de Lácteos. Además se obtuvo información sobre el consumo anual de combustible utilizado para el funcionamiento de calderas, el cual fue de 4,527 galones en la Planta de Cárnicos y 13,593 galones en la Planta de Lácteos.

El calor generado puede reemplazar el uso de diésel para funcionamiento de calderas. Teniendo en cuenta un poder calorífico de diésel de 35.86 MJ/L y un rendimiento del 70% de las calderas, por cada galón de diésel se pueden obtener 26.39 kWh. Este escenario suple la demanda energética de las Plantas de Cárnicos y Planta de Lácteos en un 93% (Cuadro 11). En adición, la energía térmica generada cubre un 217% la demanda de dichas plantas, lo cual significa un ahorro por consumo de combustibles de USD 64,147 anuales.

La implementación de esta tecnología presenta ventajas como el uso y tratamiento de residuos con disponibilidad permanente, como lo son el estiércol vacuno y purines de cerdo. Además, su conversión biológica resultaría en la reducción de emisiones de CO₂, lo cual reduciría el impacto ambiental de estas actividades agrícolas. La digestión anaerobia presenta ventajas económicas comparada con el compostaje debido a que presenta un mejor balance energético, por la generación de energía que permite (Edelmann, Engeli y Gradenecker, 2000).

Entre las desventajas de este escenario está la logística requerida para el transporte de la biomasa residual, el pretratamiento de los residuos que lo requieran, operación y mantenimiento del equipo. Según estudios realizados previamente en Zamorano considerando la introducción de los residuos generados en Planta de Cárnicos, Planta de Lácteos, Ganado porcino y Ganado lechero, se estimó que el costo de inversión para una

planta de biogás de 60 kWe ascienden a USD 660,000. La potencia instalada baja hace que la inversión inicial sea alta y se reduzca la viabilidad del proyecto (CBCL Consulting engineers, 2017).

Las implicaciones de cada tipo de residuo varían según tipo y disponibilidad. Los residuos de poscosecha y alimentos son generados diariamente y deben ser transportados en recipientes en un camión inmediatamente para evitar procesos de degradación. Los residuos de estiércol vacuno y purines de cerdo son producidos diariamente, y pueden ser recolectados por medio de canales dentro de cada granja. Dichos residuos pueden ser transportados en camiones cisterna. La gallinaza puede ser recolectada y transportada semanalmente. Las aguas rojas son generadas dos veces por semana y el suero lácteo es generado diariamente. Ambos residuos líquidos se deben transportar inmediatamente, para lo cual se puede implementar un sistema de tuberías.

Cuadro 11. Comparativo del potencial beneficio energético mediante implementación de Planta de cogeneración a partir de biogás.

Parámetro	A	B	C	D	E	F	G	Total
Distancia (Km)	2.1	0.5	2.5	3.3	2.1	0.1	0.1	NA
Consumo diésel (USD/año)	115	28.7	22.8	211.9	133	NA	NA	511.4
Generación anual (Ton/año):	62	112.4	39.6	462.7	1,707	653.2	718.5	NA
Producción de metano (m3/año)	865	16,132	1,590	58,915	75,929	13,025	4,718	171,173
Energía eléctrica (MWh/año)	3.2	58.8	5.8	214.8	276.8	47.5	17.2	624.1
Energía térmica (MWh/año)	5.3	98.0	9.7	358.0	461.4	79.2	28.7	1,040.2
Consumo Energía eléctrica total planta de lácteos y planta de cárnicos (MWh)								670.4
Energía eléctrica cubierta de planta de lácteos y planta de cárnicos (%)								93.1
Consumo Energía térmica total planta de lácteos y planta de cárnicos (MWh)								478.3
Energía térmica cubierta de planta de lácteos y planta de cárnicos (%)								217.5
Costo equivalente en electricidad (USD/año)								81,132.8
Costo equivalente en combustible (USD/año)								64,147.2

A: Residuos de poscosecha; B: Residuos de alimentos; C: Gallinaza; D: Purines de cerdo; E: Estiércol vacuno; F: Suero lácteo; G: Aguas rojas; *: Generación anual expresada en m3/año.

Planta de ciclo combinado con gasificación directa. El establecimiento de una planta de gasificación integrada con ciclo combinado contigua a la laguna seca de Zamorano, podría representar una alternativa para el tratamiento de la biomasa residual seca. La eficiencia de conversión eléctrica de la gasificación es de 40%, por lo cual es una excelente alternativa para aprovechamiento energético (EUROELECTRIC, 2003). En el Cuadro 12 se muestra el potencial beneficio energético de este escenario.

Cuadro 12. Comparativo del potencial beneficio energético de la implementación de una planta de ciclo combinado con gasificación directa.

Parámetro	Aserrín	Olote	Total
Distancia (km)	0.95	1.80	NA
Consumo combustible (gal/año)	2.47	15.75	18.22
Valor combustible (USD/año)	8.74	55.76	64.50
Generación energía eléctrica (MWh/año)	12.06	995.20	1,007.26
Energía cubierta Zamorano (%)	0.22	18.27	18.49
Costo equivalente electricidad (USD/año)	1,567.31	129,376.22	130,943.54

Las actividades de operación y mantenimiento incluyen drenaje de cenizas diariamente, chequeo de humedad en biomasa, revisión de tolvas y entradas de aire cada 100 horas, y revisión de equipo y tuberías cada 400 horas. Actualmente, los costos de operación son elevados debido a que se incluye el costo de suministro del combustible (Castro, 2015).

Horno secador usando olote como combustible. El horno secador de combustible sólido se emplea para generar vapor caliente limpio y gas a partir de la combustión de sólidos. El olote puede ser utilizado como combustible sólido, ya que su humedad se encuentra en el rango adecuado (10 - 15%) (KMEC Engineering, 2017). Dicha tecnología puede alcanzar un rendimiento térmico de 75%. Funciona como un generador de vapor para ser utilizado en el secado del material en la Planta de Semillas, ya que actualmente los secadores de la Planta de Semillas funcionan con diésel.

La implementación de un horno secador presenta la desventaja que es una tecnología en desarrollo y no se encuentra comercialmente. La innovación tecnológica es requerida para el diseño de un horno secador que pueda satisfacer las necesidades de la Planta de Semillas y así poder aprovechar el potencial energético del olote en el mismo sitio de generación. Su potencial beneficio energético se presenta en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Potencial beneficio energético de la implementación de un horno secador utilizando olote como combustible.

Parámetro	Olote
Generación (Ton/año)	610.25
Consumo energía térmica para secadores Planta de Semillas (MWh)	773.00
Generación energía térmica (MWh/año)	1,866.00
Energía térmica cubierta para secadores (%)	241.40
Costo equivalente en combustible (USD/año)	104,843.88

4. CONCLUSIONES

- Debido al tipo de actividades productivas desarrolladas en el campus, Zamorano cuenta con disponibilidad estacional y permanente de biomasa residual, siendo los de mayor proporción los residuos de estiércol vacuno y purines de cerdo con características que favorecen su conversión energética a través de digestión anaerobia. Además, otro residuo con gran volumen de generación corresponde al olote generado en Planta de Semillas, el cual es más apto a conversión por medio de procesos termoquímicos.
- La biomasa residual con mayor potencial energético disponible corresponde al olote. Sin embargo, debido a su composición físico-química, la cual es alta en contenido de cenizas, no es un sustrato apto para aprovechamiento mediante combustión y es más adecuado para gasificación.
- Los principales obstáculos en el aprovechamiento del potencial energético están relacionados con la generación dispersa de la biomasa residual en el campus y la disponibilidad estacional de algunos residuos. Estos factores requerirán la planificación de la cadena de suministro hacia el sitio de conversión energética como aspecto central de un estudio de factibilidad.
- La alternativa más viable de aprovechamiento energético será la que requiera menos energía de transporte y genere mayor cobertura de la demanda energética del usuario. En este caso, se identifica como escenario óptimo la implementación de un horno secador para cubrir las necesidades energéticas de la Planta de Semillas, aprovechando los subproductos de dicha actividad.

5. RECOMENDACIONES

- Desarrollar un análisis de logística que garantice la cadena de suministro de la biomasa residual generada en el campus Zamorano para su integración energética.
- Desarrollar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de aprovechamiento energético, considerando el inventario de biomasa residual presentado.
- Validar el desempeño de gasificación a escala piloto para generación de energía eléctrica, utilizando el sustrato de olote como combustible.
- Diseñar y validar el desempeño de un horno secador que opere con el residuo generado por la planta de semillas, para su integración como proceso unitario en esta unidad productiva.
- Evaluar el desempeño del olote como co-sustrato en la mejora del balance de nutrientes en la cogeneración con diferentes sustratos disponibles en el campus.
- Cuantificar y evaluar el potencial energético de los residuos boreales, incluyendo residuos de poda generados en el campus y residuos de planes de manejo forestal, para completar el inventario de biomasa residual presentada en este documento.
- Implementar un sistema de control documental de la biomasa residual generada en las unidades productivas, para facilitar la implementación de un sistema de aprovechamiento energético de residuos.

6. LITERATURA CITADA

- Abel, A., & Rodríguez, Y. (2011). *Caracterización de residuos sólidos de mercados en Santo Domingo Oeste, Provincia Santo Domingo*. Santo Domingo: Ciencia y Sociedad.
- Adams, R., MacLean, F., Dixon, J., Bennet, F., Martin, G., & Lough, R. (1951). *The utilization of organic wastes in N.Z.: Second interim report of the inter-departmental committee*. New Zeland: New Zealand Engineering.
- Almeida, C. (2014). *Diseño, selección y construcción de un gasificador de desechos del maíz*. Guayaquil: Universidad Estatal de Guayaquil.
- Angelidaki, Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J., Guwy, A., . . . Lier, J. v. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology-WST*, 927.
- AOAC. (2002). *AOAC Official Method 2011.11*.
- APHA. (2005). *Standar methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC.: American Public Health Association.
- Arévalo, W. (2013). *La biomasa: Una alternativa energética proveniente de la vida misma*. Universidad ed Nariño.
- Armas, Y. (2016). *Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purines*. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana.
- Asquer, C., Pistis, A., & Scano, E. (2013). *Characterization of fruit and vegetable wastes as a single substrate for the anaerobic digestion*. Romania: Environmental Engineering and Management Journal.
- Blandino, M., Claudio, F., Soldano, M., & Reyneri, A. (2016). The use of cobs, a maize grain by-product, for energy production in anaerobic digestion. *Italian Journal of Agronomy*, 195-198.
- Budí, A. (2016). *Estimación del potencial energético de la biomasa residual agrícola y análisis de aprovechamiento en los municipios de la Comarca del Alto de Palancia*. Alto Palancia: Universidad Jaume.

- Burgos, F. (2014). *La biomasa como fuente de energía sustentable*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Carlin, R. (Noviembre de 2015). *Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno*. Tegucigalpa: Zamorano.
- Castro, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CBCL Consulting engineers. (2017). *Renewable Energy and Energy Management Study, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano*. Zamorano.
- Chacón, R. (2017). *Validación de estudios de factibilidad frente al desempeño técnico del parque solar de Zamorano, Honduras*. Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana.
- Claar, P. (1981). *Economic and Energy Analysis of Potential Corn Residue Harvesting Systems*. *Agricultural Energy*.
- Comisión Nacional de Energía . (1999). *El gas natural*. CNE.
- Doelle K, O. F. (2015). *Anerobic Digestion of Food Waste to Produce Biogas*. *Journal of Food Processing & Technology*, 3.
- Edelmann, W., Engeli, H., & Gradenecker, M. (2000). *Co-digestion of organic solid waste and sludge from sewage treatment*. *Water Science Technology*, 213-21.
- Escalante, H. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- EUROELECTRIC. (2003). *Efficiency in Electricity Generation*. Bruselas: EUROELECTRIC.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). *Manual del biogás*. Santiago de Chile.
- Flores, P. (2017). *Universidad Autónoma de Nuevo León*. Obtenido de UANL: <http://eprints.uanl.mx/14435/1/1080252151.pdf>
- Garay, O. (2011). *Análisis Técnico-Económico de una planta de generación eléctrica a base de biogás*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A., & Bueno, J. (2012). *Characterization of Spanish biomass wastes for energy use*. *Bioresource Technology*, 249-258.

- González, H. (2017). *Codigestión anaerobia como alternativa de tratamiento de los efluentes agroindustriales en Zamorano, Honduras*. Zamorano.
- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yañez-Ocampo. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión. *Revista argentina de microbiología*, 229-235.
- Gunaseelan, V. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 389-399.
- Iakovou, E., Karagiannidis, A., Vlachos, D., Toka, A., & Malamakis, A. (2010). Waste biomass-to-energy supply chain management. *Waste management (New York, N.Y.)*.
- Igoni, A. (2008). *Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste*. *Appl. Energy*.
- Jain, S. (2015). A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste. *Renew. Sust. Energy Rev*, 142-154.
- Jara, H. (2009). Biomasa y sus propiedades como combustible. *Revista Celulosa y Papel*, 5.
- Jolanun, B., Tripetchkul, S., Chiemchairsri, C., Chaiprasert, P., & Towprayoon, S. (2004). Effect of moisture content on fed batch composting reactor of vegetable and fruit wastes. *Environmental Technology*, 293-301.
- Kam, M. D., & Morey, R. (2009). *Biomass integrated gasification combined cycle for heat and power at ethanol plants*. *Energy Convers.*
- KMEC Engineering. (2017). *Horno de combustible sólido*. Obtenido de Plantas peletizadoras: <http://www.plantaspeletizadoras.com/horno-de-combustible-solido.html>
- Lizotte, P.-L., Savoie, P., & Champlain, A. D. (2015). Ash Content and Calorific Energy of Corn Stover Components in Eastern Canada. *Energies*.
- Marin-Batista, J., Castro, L., & Escalante, H. (2015). *Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización*. Bucaramanga: Revista Colombiana de Biotecnología.
- Minguela, C. d., & Antolín, G. (2011). *Instalación térmica con biomasa residual en una industria del sector maderero*. Valladolid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

- NETL. (2018). *Gasification background*. Obtenido de National Energy Technology Laboratory: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasification/clean-power>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook*. London-Washington DC: Earthscan.
- Pavlas, M., & Touš, M. (2009). Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Techn Environ Policy (Clean Technologies and Environmental Policy)*, 19-29.
- Quintero, J., & Quintero, L. (2015). Perspectivas del potencial energético de la biomasa global en el marco global y latinoamericano. *Gestión y Ambiente*, 179-188.
- Ramírez, L. (2017). *Potencial energético de la biomasa residual pecuaria del departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Relova, I., Hernández, E., García, J., Cándano, F., Coro, R., & Frenández, L. (2010). *Potencial de aserrín de la industria del aserrado de Pinus caribaea var. caribaea con fines energéticos*. Pinar del Río: Universidad Pinar del Río.
- Rutz, D. (2015). *Sustainable Heat Use of Biogas Plants*. Munich: WIP Renewable Energies.
- Santander, U. I. (2011). *Atlas del Potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Santander: Ministerio de Minas y Energía.
- Shen, F. (2013). Performances of anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste (FVW) and food waste (FW): single-phase vs two-phase. *Bioresource Technol.*, 80-85.
- Sosnowski, P., Wieczorek, A., & Ledakowicz, S. (2003). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction. *Adv. Environmental Resources*, 609-616.
- Steffen, R. (1998). *Feedstocks for Anaerobic Digestion*. Vienna: University of Agricultural Sciences.
- Stella, L., & Bolaños, I. (2015). *Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Surra, E., Bernardo, M., Lapa, N., Esteves, I., Fonseca, I., & Mota, J. (2017). Maize cob waste pre-treatments to enhance biogas production through co-anaerobic digestion with OFMSW. *Elsevier*.
- Tchobanoglous, G. (2002). *Handbook of Solid waste management*. McGraw-Hill.

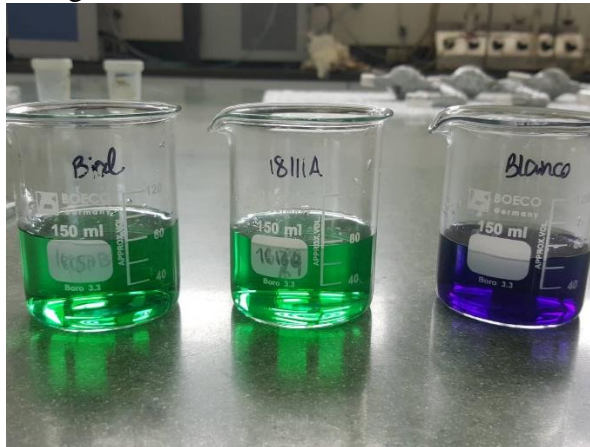
- Torres, R., Montero, G., Triny, M., Toscano, L., & Janet, L. (2011). *Lignina obtenida de residuos agrícolas como combustible de tercero generación*. México: Universidad Autónoma de Baja California.
- TRANSBIOMA. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. Palencia.
- Tu, Q., Zhu, C., & McAvoy, D. C. (2015). Converting campus waste into renewable energy—a case study for the University of Cincinnati. 39.
- Uceda, M. (2015). Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de la Amazonía Peruana. *Revista Forestal del Perú*.
- Ventura, C. (2014). *Productividad de metano a partir de residuos de cultivo de maíz y frijol*. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana.
- Watson, R., & Solano, O. (2011). Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*.
- Wilkie, A., Smith, P., & Bordeaux, F. (2004). An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource Technology*, 103-109.
- World Energy Council. (2016). *World Energy Resources*. World Energy Council.
- Yepez, L. (2017). *Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano*. Tegucigalpa: Zamorano.
- Zhang, R., El-Mashad, H. M., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2006). *Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion*. California: University of California.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., & Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Energy Combust. Sci.*, 35-53.

7. ANEXOS

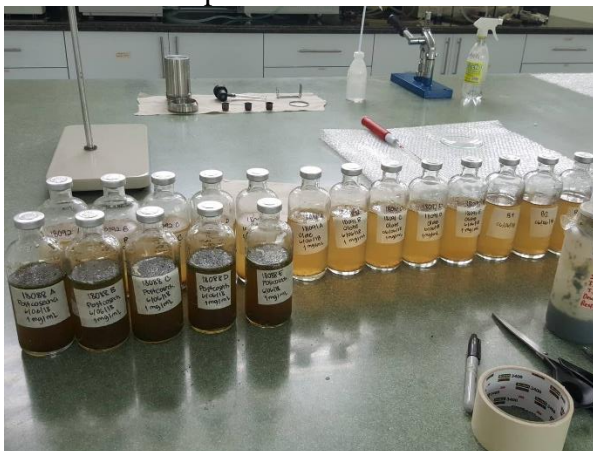
Anexo 1. Determinación de sólidos totales.



Anexo 2. Análisis de Nitrógeno total.



Anexo 3. Montaje de reactores batch para determinación de IPM.



Anexo 4. Estimación de generación de aguas rojas provenientes de la Planta de Cárnicos, de acuerdo al registro de animales sacrificados en el año 2017.

Mes	Generación de aguas rojas (L)
Enero	64,008.90
Febrero	41,198.20
Marzo	54,730.90
Abril	46,137.00
Mayo	64,092.90
Junio	65,275.70
Julio	70,349.20
Agosto	72,238.30
Septiembre	44,606.60
Octubre	71,952.50
Noviembre	81,992.80
Diciembre	41,921.40
Total	718,504.40

Anexo 5. Estimación de generación de suero lácteo proveniente de la Planta de Lácteos, de acuerdo al registro de producción de quesos en el año 2017.

Mes	Generación suero lácteo (L)
Enero	50,412.29
Febrero	52,674.49
Marzo	62,632.69
Abril	54,211.52
Mayo	64,629.55
Junio	60,395.02
Julio	61,311.22
Agosto	57,167.81
Septiembre	56,029.31
Octubre	58,342.42
Noviembre	57,112.36
Diciembre	18,297.66
Total	653,216.32

Anexo 6. Inventario de animales según unidad productiva para el mes de Agosto de 2018.

Unidad	Cantidad	Descripción
Ganado Lechero (Sección ordeño)	340	Animales adultos
Ganado porcino	594	Cerdos áreas de Engorde
Avicultura	1,100	Gallinas ponedoras