

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del  
Medio Natural



## **Análisis de distintos residuos agrícolas como potenciales productos de codigestión anaerobia e implantación en biodigestores en la comunidad Inti Churi, provincia de Bolívar, Ecuador**

Trabajo de Fin de Máster correspondiente al Máster Universitario en  
Ingeniería Agronómica

Autor:

Javier Abellán Álvaro

Tutor UPV:

Borja Velázquez Martí

Tutor externo (UEB):

Juan Alberto Gaibor Chávez

Curso académico: 2020 -2021

Valencia, noviembre 2021

Análisis de distintos residuos agrícolas como potenciales productos de codigestión anaerobia e implantación en biodigestores en la comunidad Inti Churi, provincia de Bolívar, Ecuador.

## Resumen

El objetivo del proyecto es la implantación de forma efectiva de un sistema de gestión de residuos agropecuarios para dar soporte energético a las comunidades rurales más desfavorecidas de la provincia de Bolívar. Esto se ha llevado a cabo mediante la implementación de biodigestores para la producción de biogás rico en metano ( $\text{CH}_4$ ) a partir de residuos agrícolas y ganaderos en la organización indígena Casaiches – Inti Churi, ubicada en una zona rural del cantón de Guaranda, en la sierra andina ecuatoriana, superando los 3.200 msnm. Para lograrlo, este trabajo de investigación se realizó en dos fases: fase experimental de laboratorio, en la que se ensayaron las condiciones óptimas para el proceso, y fase de aplicación en campo.

De esta forma, en primer lugar, se seleccionaron los principales residuos agropecuarios generados en la organización, que fueron lactosuero, estiércol de vaca, residuos de la cosecha del maíz y paja de cebada, para después caracterizarlos con el fin de conocer su idoneidad como materia prima del proceso. Tras este paso se ensayó con diferentes combinaciones de estas materias primas para conocer cuáles poseían un mayor rendimiento energético, combinándose por un lado el estiércol y el lactosuero (residuos ganaderos), y por otro, la cebada y el maíz. (residuos agrícolas). Estas combinaciones de residuos agrícolas y ganaderos se hicieron en tres relaciones: 1/1, 3/1 y 1/3. Los tres tratamientos que mayor volumen acumulado de  $\text{CH}_4$  obtuvieron al cabo de 20 días tenían una relación de cebada y maíz de 3/1, diferenciándose cada uno de ellos por la relación de estiércol y lactosuero: 1/1, 3/1 y 1/3. Los resultados fueron de 331,78 mL, 315,1 mL y 304,81 mL, respectivamente. Estos tratamientos fueron los que finalmente se cargaron en los digestores instalados en campo, en los que se obtuvo biogás con un porcentaje de  $\text{CH}_4$  superior al 70%, al igual que en la fase experimental. Sin embargo, el proceso fue mucho más lento en campo, tardando casi diez veces más en llegar a porcentajes de  $\text{CH}_4$  similares a los obtenidos en la fase experimental, lo que permite afirmar que las condiciones del proceso, y en especial la temperatura, condicionan enormemente su desarrollo.

Una vez obtenidos los resultados, se puede concluir que la obtención de energía térmica (en forma de biogás) a partir de residuos agropecuarios sometidos a un proceso de codigestión anaerobia por encima de los 3.200 msnm es totalmente factible y queda probado gracias a este proyecto. Esto resulta realmente interesante en comunidades y poblados alejados de las ciudades donde el suministro de gas es limitado, ya que es una forma de obtención de energía de bajo costo y complejidad, que además ayuda en la gestión de residuos in situ.

Palabras clave: digestión anaerobia, biogás, zonas rurales, valorización de residuos agropecuarios.

Analysis of different agricultural waste as potential anaerobic co-digestion agents and implementation in biodigesters in the Inti Churi organization, Bolivar province, Ecuador.

## Summary

The objective of the project is the effective implementation of an agricultural waste management system to provide energy support to the most vulnerable rural communities in the province of Bolivar. This has been carried out through the implementation of biodigesters for the production of biogas rich in methane (CH<sub>4</sub>) from agricultural and livestock waste in the indigenous organization Casaiches - Inti Churi, located in a rural area of the canton of Guaranda, in the Ecuadorian Andean highlands, above 3,200 meters above sea level. To achieve it, this research project was carried out in two phases: an experimental laboratory phase, in which the optimal conditions for the process were tested, and a field application phase.

In this way, firstly, the main agricultural waste generated in the organization was selected, which were whey, cow dung, maize harvest residues and barley straw, and then characterized in order to determine their suitability as raw material for the process. After this step, different combinations of these raw materials were tested to find out which had a higher energy yield, combining manure and whey (livestock waste) on the one hand, and barley and maize (agricultural waste) on the other. These combinations of agricultural and livestock waste were made in three ratios: 1/1, 3/1 and 1/3. The three treatments that obtained the highest accumulated CH<sub>4</sub> volume after 20 days had a ratio of barley and maize of 3/1, each of them differing in the ratio of manure and whey: 1/1, 3/1 and 1/3. The results were 331.78 mL, 315.1 mL and 304.81 mL, respectively. These treatments were the ones that were finally loaded into the digesters installed in the field, in which biogas was obtained with a percentage of CH<sub>4</sub> higher than 70%, as in the experimental phase. However, the process was much slower in the field, taking almost ten times longer than in lab to reach similar CH<sub>4</sub> percentages, which allows to affirm that the conditions of the process, and especially the temperature, greatly determine its development.

Once the results have been obtained, it can be concluded that obtaining thermal energy (in the form of biogas) from agricultural waste subjected to an anaerobic co-digestion process above 3,200 meters above sea level is totally feasible and has been proven thanks to this project. This is really interesting in communities and villages far from cities where gas supply is limited, as it is a low-cost and non-complex way of obtaining energy, which also helps in on-site waste management.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, rural areas, agricultural waste valorization.

# ÍNDICE GENERAL

1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	3
2.1 Objetivo General .....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. Caracterización del problema .....	4
3.1 Ubicación del proyecto.....	4
3.1.1 Fase experimental o de investigación .....	4
3.1.2 Fase de campo o aplicación.....	6
3.2 Planteamiento del problema .....	7
3.3 Situación del problema .....	8
4. Materiales y métodos.....	8
4.1 Caracterización de las materias primas.....	8
4.2 Preparación de los biodigestores .....	8
4.2.1 A nivel de laboratorio .....	8
4.2.2 A nivel de campo .....	11
4.3 Cálculo y montaje de los biodigestores.....	13
4.3.1 A nivel de laboratorio .....	13
4.3.2 A nivel de campo .....	16
4.4 Métodos de evaluación.....	17
4.4.1 A nivel laboratorio .....	17
4.4.2 A nivel de campo .....	18
4.5 Análisis estadístico .....	18
5. Resultados .....	19
5.1 A nivel de laboratorio.....	19
5.1.1 Caracterización de los residuos agropecuarios e inóculo .....	19
5.1.2 Volumen producido de biogás .....	19
5.1.3 Volumen producido de CH <sub>4</sub> .....	23
5.1.4 Porcentaje diario de CO <sub>2</sub> producido.....	24
5.1.5 Análisis estadístico .....	25

5.1.6	Cinética microbiana.....	30
5.2	A nivel de campo .....	32
5.2.1	Porcentaje diario de producción de CH <sub>4</sub> .....	33
5.2.2	Porcentaje diario producido de CO <sub>2</sub> .....	35
6.	Conclusiones y Recomendaciones .....	37
	BIBLIOGRAFÍA.....	39

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Ubicación de la fase experimental. ....	5
<b>Tabla 2.</b> Situación geográfica y climática de la fase experimental.....	5
<b>Tabla 3.</b> Ubicación de la fase de campo.....	6
<b>Tabla 4.</b> Situación geográfica y climática de la fase de campo.....	6
<b>Tabla 5.</b> Diseño experimental de la fase de laboratorio.....	10
<b>Tabla 6.</b> Cálculo de los SV para cada componente de la mezcla, según la TCO determinada.....	15
<b>Tabla 7.</b> Valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores.....	15
<b>Tabla 8.</b> Cantidad de los distintos materiales utilizados para la codigestión a introducir en los digestores en laboratorio.....	16
<b>Tabla 9.</b> Cálculo de los SV necesarios, según la TCO determinada y el volumen útil del digestor.....	16
<b>Tabla 10.</b> Carga de los distintos materiales utilizados para la codigestión a introducir en los digestores en campo.....	17
<b>Tabla 11.</b> Características fisicoquímicas de los residuos agropecuarios e inóculo utilizados.....	19
<b>Tabla 12.</b> Volumen diario producido de biogás (mL).....	20
<b>Tabla 13.</b> Volumen acumulado de biogás (mL) durante los 20 días.....	22
<b>Tabla 14.</b> Volumen de CH <sub>4</sub> producido diariamente (ml).....	23
<b>Tabla 15.</b> Volumen acumulado de CH <sub>4</sub> (mL) durante los 20 días.....	24
<b>Tabla 16.</b> ANOVA para la producción de biogás (mL) de los nueve tratamientos para los veinte días.....	26
<b>Tabla 17.</b> Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción acumulada de biogás (mL) para los nueve tratamientos durante los veinte días.....	26
<b>Tabla 18.</b> Pruebas de medias por mínimos cuadrados para el factor A.....	27
<b>Tabla 19.</b> Pruebas de medias por mínimos cuadrados para el factor B.....	28
<b>Tabla 20.</b> Resumen de las relaciones estadísticamente significativas para los nueve tratamientos durante los veinte días.....	29
<b>Tabla 21.</b> Resultados de la molaridad acumulada de metano para el modelo modificado de Gompertz.....	31
<b>Tabla 22.</b> Comparación datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz.....	32

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Mapa político de la provincia de Bolívar. ....	2
<b>Figura 2.</b> Localización de las dos fases del proyecto. ....	2
<b>Figura 3.</b> Climograma del cantón de Guaranda.....	4
<b>Figura 4.</b> Localización de la fase experimental.....	5
<b>Figura 5.</b> Localización de la fase de aplicación.....	7
<b>Figura 6.</b> Esquema del digestor utilizado en laboratorio. ....	11
<b>Figura 7.</b> Interior y exterior de las casetas montadas en campo. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 8.</b> Alzado de uno de los digestores instalados en campo.....	12
<b>Figura 9.</b> Alzado, planta y perfil de las casetas en que fueron instalados los digestores. ....	13
<b>Figura 10.</b> Producción diaria de biogás durante los 20 días.....	20
<b>Figura 11.</b> Producción de biogás diario (mL) de los tres mejores tratamientos. ....	21
<b>Figura 12.</b> Producción acumulada de biogás (mL) durante los 20 días. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 13.</b> Porcentaje de CH <sub>4</sub> producido durante los 20 días.....	24
<b>Figura 14.</b> Porcentaje de CO <sub>2</sub> producido durante los 20 días. ....	25
<b>Figura 15.</b> Gráfico LDS del factor A respecto a la producción de biogás (mL). ....	27
<b>Figura 16.</b> Interacciones de los distintos niveles del factor B sobre los niveles del factor A. ....	27
<b>Figura 17.</b> Gráfico LDS del factor B respecto a la producción de biogás.....	28
<b>Figura 18.</b> Interacciones de los distintos niveles del factor A sobre los niveles del factor B.....	29
<b>Figura 19.</b> Diferencias de los datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz. ....	32
<b>Figura 20.</b> Porcentaje de CH <sub>4</sub> producido diariamente en los seis digestores en campo. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 21.</b> Porcentaje de CH <sub>4</sub> producido diariamente para el tratamiento 2. ....	34
<b>Figura 22.</b> Porcentaje de CH <sub>4</sub> producido diariamente para el tratamiento 5. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 23.</b> Porcentaje de CH <sub>4</sub> producido diariamente para el tratamiento 8. ....	35
<b>Figura 24.</b> Porcentaje de CO <sub>2</sub> producido diariamente en los seis digestores en campo. ....	35
<b>Figura 25.</b> Porcentaje de CO <sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 2. ....	36
<b>Figura 26.</b> Porcentaje de CO <sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 5. ....	36
<b>Figura 27.</b> Porcentaje de CO <sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 8. ....	37

## Índice de ecuaciones

Ecuación (1). Modelo modificado de Gompertz .....	3
Ecuación (2). Modelo modificado de Gompertz para la producción de metano .....	3
Ecuación (3). Distribución de la TCO en el digestor .....	14
Ecuación (4). Distribución de la TCO en el digestor en función del tratamiento .....	14
Ecuación (5). Cálculo de los SV para la TCO .....	14
Ecuación (6). Cálculo de los ST para la TCO .....	14
Ecuación (7). Cálculo de la MF para la TCO .....	15

## Abreviaturas

- Trabajo de fin de máster (TFM)
- Materia orgánica (MO)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Universidad Estatal de Bolívar (UEB)
- Geomembranas de alta densidad (HDPE)
- Sólidos volátiles (SV)
- Tasa de carga orgánica (TCO)
- Sólidos totales (ST)
- Materia fresca (MF)
- Tiempo de retención hidráulica (TRH)
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S)
- Oxígeno (O<sub>2</sub>)
- Relación carbono nitrógeno (C/N)

# 1. Introducción

El objeto del siguiente Trabajo de Fin de Máster (TFM) es analizar la producción de biogás, a través de codigestión anaerobia de residuos agropecuarios de la zona andina de la provincia de Bolívar, Ecuador.

Sin lugar a duda las energías renovables van a ir sustituyendo con el paso de los años a las energías convencionales, y a largo plazo han de constituir la mayor parte de la energía producida y usada en el planeta. En la provincia de Bolívar existen condiciones propicias para el aprovechamiento de algunas de estas fuentes, que pueden contribuir no solo a la solución de parte de la demanda energética, sino a la protección del medio ambiente (Sanabria, 2018).

El biogás es un biocombustible proveniente de la biomasa (materia orgánica de origen animal o vegetal). Es un gas combustible producto de la descomposición de la materia orgánica (MO) en condiciones de ausencia de oxígeno, o anaerobias; con la característica de estar mayormente compuesto por metano (CH<sub>4</sub>) (Navarro, 2017).

Los biocombustibles han acompañado al ser humano desde prácticamente los inicios de su historia, siendo el descubrimiento del fuego fue el primer encuentro entre nuestra especie y estos. Su incidencia moderna quedó relegada a un segundo plano con la aparición de los combustibles fósiles y el motor de combustión interna. Sin embargo, en los años setenta, debido a la crisis del petróleo recobraron importancia, pero no fue hasta principios del siglo XXI, con la llegada de las preocupaciones medioambientales y sobre sostenibilidad, cuando empezaron a cobrar relevancia (Ramos & Villar, 2016). Si se atiende al proceso de digestión anaerobia para la generación de energía, se encuentra la misma situación, ya que, tal y como Abbasi *et al.*, (2012) cuentan, a finales del siglo XVIII ya se tienen evidencias de su conocimiento.

Por tanto, la relevancia científica de este proyecto no reside en el proceso bioquímico en sí, ni tan siquiera en su uso como una forma de valorizar residuos orgánicos, ya que esto está ampliamente estudiado y probado (Comino *et al.*, 2010; Flotats *et al.*, 2001; Kapoor *et al.*, 2020; Labatut & Pronto, 2018; Lytras *et al.*, 2021; Meneses Quelal *et al.* 2021; Ziemiński & Frac, 2012). Su relevancia estaría dada por el uso de residuos agropecuarios que no han sido investigados, especialmente la combinación de lactosuero, estiércol y residuos agrícolas vegetales de la zona andina objeto de estudio. Se evalúa también la aplicación de esta tecnología en zonas donde las condiciones climáticas están muy alejadas del óptimo que requiere el proceso, como consecuencia de situarse por encima de los 3.200 msnm. Pero, sobre todo, resulta destacable por el carácter social del mismo.

La importancia del proyecto radica en que la implantación de digestores en zonas rurales andinas contribuirá a solucionar un problema de abastecimiento de gas que se está produciendo en zonas alejadas de los núcleos urbanos, debido a su encarecimiento paulatino. Actualmente existe un subsidio al suministro de tanques de gas por parte del estado, que hasta el momento lo ha hecho más accesible a la población. Sin embargo, políticas recientemente implantadas tienden a reducir o eliminar este subsidio, ya que favorece el contrabando existente en las fronteras con Colombia o Perú, que no tienen el gas subsidiado (Villavicencio Mora & Ruiz Cedeño, 2019). Por esta razón distintos proyectos han sido desarrollados en el país de la misma índole (Garfí, Martí Herrero *et al.*, 2016; Ramírez, Martí Herrero *et al.*, 2019). En este, se plantea conocer las condiciones adecuadas de operación y el potencial esperable del trabajo de los digestores para abastecer a las comunidades de gas para cocinas y para producción de agua caliente sanitaria, en zonas de clima frío como son los Andes. La implantación de esta tecnología

dota de independencia energética a estas comunidades, lo que puede permitirles un desarrollo in situ sin depender tanto de los núcleos urbanos.

Esta investigación, tal y como se explicó anteriormente, ha tenido dos fases de estudio. La fase experimental se realizó en la Universidad Estatal de Bolívar (UEB), Facultad de Ciencias Agropecuarias Recursos Naturales y del Ambiente, en los laboratorios de Investigación y estudios de biomasa de Laguacoto. La fase de campo de la investigación se la realizó en las Comunidades de la Organización Inti Churi, Cantón Guaranda, Provincia Bolívar, según la localización que se detalla más adelante.

En la Figura 1 se puede apreciar la localización de la provincia de Bolívar dentro del estado ecuatoriano, así como la distribución en cantones de la misma. Por otro lado, en la Figura 2 se señala la situación de los dos puntos en que se desarrolló este proyecto dentro del cantón de Guaranda, los laboratorios de investigación de la UEB y la organización indígena Inti Churi.

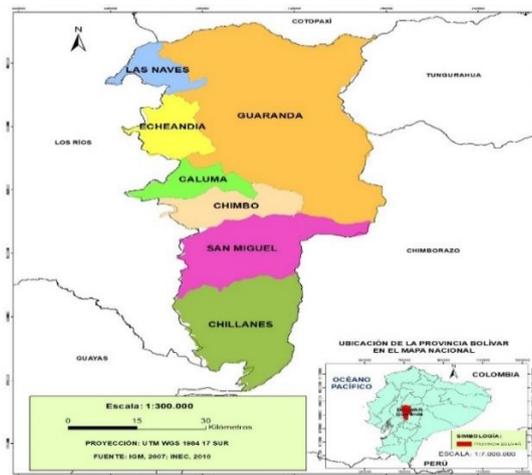


Figura 1.

Mapa político de la provincia de Bolívar.

Nota: mapa político de la provincia de Bolívar dividido por cantones. Escala: 1.300000. Fuente: (Paucar, 2016).



Figura 2.

Localización de las dos fases del proyecto.

Nota: vista satelital de la zona en que fue desarrollada el proyecto. Escala: 1.2000. Fuente: Google Maps.

Además, en este trabajo, una vez conocidos los rendimientos energéticos de los tratamientos ensayados, estos se compararán con su máximo teórico, gracias al estudio de la cinética microbiana del proceso. La cinética microbiana busca explicar el desarrollo de los distintos microorganismos implicados en un proceso químico mediante modelos matemáticos predictivos. En procesos relacionados con la industria, o con un fin específico, resulta realmente importante este estudio porque del mismo dependerá el rendimiento o producción del proceso (Córdoba, 2016).

En el crecimiento microbiano se tienen en cuenta principalmente dos factores, la tasa de crecimiento específico ( $\mu$ ) de los microorganismos estudiados y la concentración de sustrato (S), que supondrá el alimento de estos microorganismos. La relación entre estos dos factores determinará la velocidad de crecimiento de los microorganismos, y de esta derivarán las leyes empíricas que se conocen como modelos teóricos (Velázquez Martí *et al.*, 2016).

En el caso de este trabajo se utilizará el modelo modificado de Gompertz para un proceso bioquímico como es la digestión anaerobia, que queda representado tal y como muestra la Ecuación (1). Siendo "X" la concentración celular microbiana para un tiempo determinado, " $t_{lag}$ " el tiempo de latencia o de adaptación celular, " $v_{máx}$ " la velocidad máxima de crecimiento celular, "t" el tiempo estimado en el proceso, "a" la máxima concentración celular obtenible y "e" es considerado una constante.

$$X = a * e^{[-e^{(\frac{v_{máx} * e}{a} * (t_{lag} - t) + 1)}]} \quad (1)$$

El interés de este modelo para el caso de este estudio reside en aplicar, tal y como distintos autores apuntan, el modelo modificado de Gompertz en el rendimiento o producción acumulada de metano en un proceso de digestión anaerobia (Córdoba *et al.*, 2018; Jeong *et al.*, 2007; Varsha *et al.*, 2020; Velázquez Martí *et al.*, 2016). Esta función sería la que aparece en la Ecuación (2), en la que "M" es la producción acumulada de metano para un tiempo determinado, " $M_e$ " es el potencial de metano producible, " $v_{Mmáx}$ " es la velocidad máxima de producción de metano acumulado, " $t_{lag}$ " es el tiempo de latencia o de adaptación del proceso para comenzar a producir metano, y "t" y "e", al igual que en el modelo modificado de Gompertz simple, son el tiempo determinado y una constante.

$$M = M_e * e^{[-e^{(\frac{v_{Mmáx} * e}{M_e} * (t_{lag} - t) + 1)}]} \quad (2)$$

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Evaluar la obtención de biogás y digestato a partir de la codigestión anaerobia de residuos agropecuarios en la organización Inti Churi, cantón Guaranda, provincia Bolívar.

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente las materias primas que serán utilizadas en el proceso.
- Definir las condiciones óptimas de operación de la digestión anaerobia de residuos agropecuarios de la zona andina.
- Evaluar los parámetros de funcionamiento y caracterizar los productos obtenidos del biodigestor.

- Analizar los procesos cinéticos.
- Proporcionar una alternativa energética a las familias beneficiarias de este proyecto en la organización Inti-Churi, que les otorgue más independencia.

### 3. Caracterización del problema

#### 3.1 Ubicación del proyecto

Tal y como se explicó en el primer punto de este trabajo, el proyecto fue llevado a cabo en dos ubicaciones distintas dentro del cantón de Guaranda, pero antes de explicarlas con mayor lujo de detalles, cabe hacer una mención a la climatología de la zona.

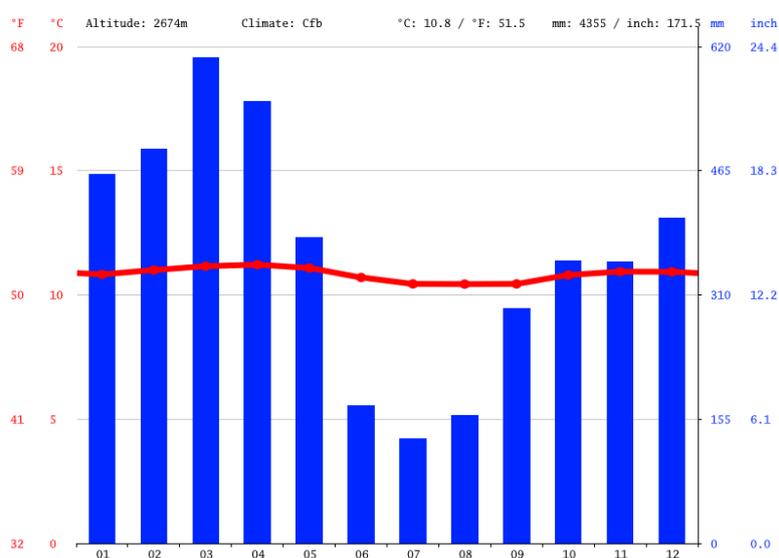


Figura 3.

Climograma del cantón de Guaranda.

Nota: datos medios de pluviometría y temperatura en el cantón de Guaranda. Fuente: extraído de la web [climate-data.org](https://es.climate-data.org/americas-del-sur/ecuador/provincia-de-bolivar/guaranda-2963/) (<https://es.climate-data.org/americas-del-sur/ecuador/provincia-de-bolivar/guaranda-2963/>).

En la Figura 3 puede apreciarse el climograma de la ciudad de Guaranda, obtenido de la web “climate-data.org” a partir de datos históricos. En vista a estos datos, resulta evidente que en la zona de aplicación de este proyecto encontramos un clima típico de las zonas andinas, es decir, con una dinámica de temperaturas baja, siendo la media de 10,8°C; frente a una dinámica de precipitaciones muy alta, siendo la media de 4355 mm anuales. Atendiendo a la clasificación Köppen-Geiger encontramos un clima del tipo Cfb o Cfc, es decir, entre un clima oceánico y un clima oceánico frío. En este caso, este climograma no se debe a la proximidad al océano, sino a la gran altitud de los montes andinos que hacen que las nubes que consiguen superar sus crestas queden atrapadas en sus valles generando una gran pluviometría (Peel *et al.*, 2007).

#### 3.1.1 Fase experimental o de investigación

##### 3.1.1.1 Ubicación de la fase experimental

En la Tabla 1 se detalla la ubicación de la fase experimental de la investigación.

**Tabla 1.**  
*Ubicación de la fase experimental.*

Ubicación	Localidad
Provincia	Bolívar
Cantón	Guaranda
Sector	Laguacoto II
Dirección	Vía Guaranda-San Simón km 1 ½

*Fuente: Trabajo experimental 2021*

### 3.1.1.2 Situación geográfica y climática de la fase experimental

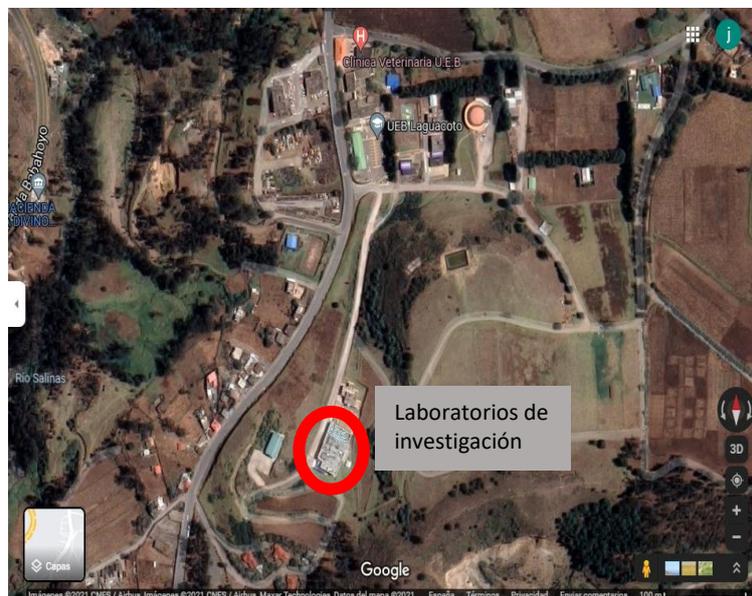
Así mismo, en la Tabla 2 se detallan las coordenadas geográficas, así como los datos climáticos disponibles para la ubicación de la fase experimental del proyecto. Estas últimas concuerdan con las del climograma presentado.

**Tabla 2.**  
*Situación geográfica y climática de la fase experimental.*

Parámetros	Valor
Altitud	2800 msnm
Latitud	0.1° 34' 15" sur
Longitud	79° 0' 0.2" oeste
Temperatura mínima	8 °C
Temperatura media anual	13 °C
Temperatura máxima	18 °C
Humedad	75%

*Fuente: Estación meteorológica, de la Universidad estatal de Bolívar. Laguacoto II.*

Por último, la Figura 4 muestra la vista satélite de las instalaciones en las que estuvo ubicada esta fase.



**Figura 4.**

*Localización de la fase experimental.*

*Nota: vista satélite de la ubicación dónde se desarrolló la fase experimental, coordenadas en la Tabla 2.  
Escala: 1.100. Fuente: Google Maps.*

### 3.1.2 Fase de campo o aplicación

#### 3.1.2.1 Ubicación de la fase de campo

La organización Inti Churi está ubicada a 19 km de la ciudad de Guaranda por la vía antigua a Riobamba, esta organización está compuesto por siete comunidades indígenas.

A continuación, en la Tabla 3 se detalla la ubicación de la fase de campo de la presente investigación, concretando en las comunidades de la organización en que tuvo lugar.

**Tabla 3.**  
*Ubicación de la fase de campo*

<b>Ubicación</b>	<b>Localidad</b>
Provincia	Bolívar
Cantón	Guaranda
Parroquia	Veintimilla
Organización:	Inti Churi
Comunidad	Chinipamba (1)
Comunidad	San Antonio (2)
Comunidad	Erapamba (3)
Región:	Sierra Centro
Dirección	Vía Guaranda -Riobamba gallo rumi km 19

*Fuente: Unidad Educativa Inti Churi.*

#### 3.1.2.2 Situación geográfica y climática de la fase de campo

En la Tabla 4 se detallan las coordenadas geográficas, junto a los datos climáticos disponibles de la ubicación de la fase de campo del presente proyecto. De nuevo, como en el caso de la fase de investigación o experimental, se observa que coincide con las del climograma presentado anteriormente, si bien en este caso encontramos condiciones más frías debido a una mayor altitud.

**Tabla 4.**  
*Situación geográfica y climática de la fase de campo.*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Altitud	3.335 msmsm
Latitud	0.1° 35" 12" sur
Longitud	78° 55" 0.6" oeste
Temperatura mínima	7 °C
Temperatura media anual	12 °C
Temperatura máxima	18 °C
Humedad	75%

*Fuente: Unidad Educativa Inti Churi.*

Para finalizar, en la Figura 5 se puede ver la vista satelital de la ubicación de la fase de campo o aplicación de este proyecto.



**Figura 5.**

*Localización de la fase de aplicación.*

*Nota: vista satélite de la ubicación dónde se desarrolló la fase de campo, coordenadas en la Tabla 1.*

*Escala: 1.1000. Fuente: Google Maps.*

### 3.2 Planteamiento del problema

Como se explicó anteriormente, en zonas como la de implementación de este proyecto, el acceso a fuentes de energía es muy limitado, especialmente en el caso del gas, lo que unido a previsibles cambios en los subsidios que tiene, parece que lo limitaran ya no solo físicamente sino económicamente. Conseguir una fuente de energía distinta al gas licuado de petróleo (GLP), resulta interesante debido a que no es accesible en las zonas rurales de esta provincia, por su geografía irregular y su distancia con los núcleos urbanos más grandes. Además, los residuos orgánicos, y en concreto los agropecuarios pueden suponer una vía de contaminación del medio ambiente cuando son directamente aplicados sobre el terreno. Esto normalmente conlleva la contaminación de acuíferos o producción de malos olores en las zonas habitadas y sus alrededores, como ejemplos de efectos negativos de estas prácticas sobre el medio ambiente y el medio humano.

Por todo ello, se plantea desarrollar biodigestores alimentados con los residuos agropecuarios para generar biogás a fin, en primer lugar, de conseguir una fuente de generación de energía alternativa, y en segundo, de disminuir la contaminación generada por los mismos y plantear otra forma de gestionarlos.

Para poder llevarlo a cabo de la mejor forma posible se plantea seleccionar los residuos agropecuarios más convenientes en función de la zona en que se desarrollará la fase de campo, caracterizarlos y realizar distintas mezclas entre ellos, siendo cada una un tratamiento. Los principales residuos agropecuarios generados en la zona de estudio son: estiércol de vaca, paja de cebada y restos de maíz que se generan tras sus cosechas, y lactosuero como residuo de la quesera comunitaria. Después serán introducidos en digestores a nivel de laboratorio, en los que, ayudados de un iniciador o inóculo (que en este caso será lodo activo de una depuradora de aguas residuales), tendrá lugar la digestión anaerobia, y, por tanto, la producción de biogás en unas condiciones óptimas de cara al proceso. Estos digestores se monitorearán diariamente para conocer la cantidad y calidad del producto generado. Una vez la producción de biogás deje de ser significativa se seleccionarán los tres mejores tratamientos para que sean replicados a nivel de campo en seis digestores, es decir, cada tratamiento seleccionado tendrá dos repeticiones a nivel de campo. Al igual que en la fase anterior, los digestores instalados en campo serán monitoreados para conocer la calidad del biogás producido diariamente.

### 3.3 Situación del problema

Actualmente en las comunidades de la organización Inti Churi, al igual que en casi todas las explotaciones agropecuarias de la provincia e incluso del país, los residuos que se generan son normalmente vertidos sobre el terreno, sin ningún tipo de pretratamiento. Por un lado, en la organización tiene un peso más que significativo el residuo en forma de lactosuero que produce la quesera comunitaria, el cual es diluido y vertido al cauce de agua más próximo a la misma. Por otro lado, las heces del ganado, así como los residuos del cultivo son dejados en el sitio dónde se producen, con la excepción de que en el segundo caso algunas veces son triturados para facilitar su aporte al terreno.

## 4. Materiales y métodos

Antes de comenzar este punto, cabe destacar que en el Anejo II se encuentran fotografías para documentar las distintas etapas que a continuación se describirán.

### 4.1 Caracterización de las materias primas

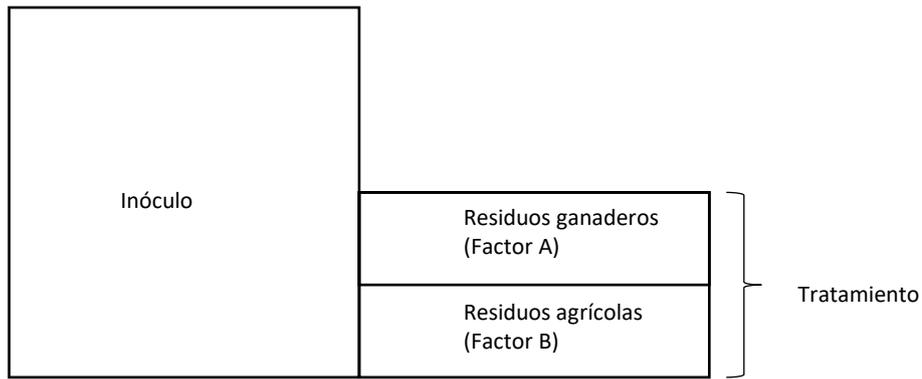
Para caracterizar los residuos agropecuarios se llevó a cabo un análisis proximal y elemental de cada una de las materias primas. En el primero se estudió el contenido de humedad (norma UNE-EN ISO 18134-3, 2016), de cenizas (UNE-EN ISO 1822, 2016) y de materia volatilizable (UNE-EN ISO 18123, 2016). En el segundo, se calculó su contenido en carbono, nitrógeno e hidrógeno (UNE-EN 15104, 2011).

### 4.2 Preparación de los biodigestores

#### 4.2.1 A nivel de laboratorio

Para esta investigación se utilizaron 27 unidades experimentales, agrupadas en 9 tratamientos con 3 repeticiones cada una, que estuvieron sometidas a una temperatura constante de 35°C. Cada una de estas unidades fue introducida en un digestor con un volumen de 311 mL, el 60% lo ocuparía la mezcla (186 mL) y el 40% (125 mL) el biogás producido. La mezcla está compuesta por inóculo y sustrato (tratamiento o combinación de materias primas) con una relación de 2 a 1.

El diseño experimental se caracteriza, como ya se comentó anteriormente, por ser novedoso debido a la combinación de las materias primas utilizadas junto con el inóculo. Para ello el espacio que ocupa la mezcla queda dividido entre materias primas e inóculo, en orden a la relación establecida, que en el caso de este proyecto fue el doble de inóculo que de sustrato (2:1). En la Figura 6 se puede apreciar de una forma más esquematizada esta distribución.



**Figura 6**

*. Distribución de la mezcla de inóculo y sustrato dentro de los digestores.*

*Nota: la distribución dentro de la mezcla fue del doble de inóculo que de sustrato (2:1), estando este último a su vez dividido en dos partes iguales (1:1) entre los dos factores o tipos de residuos agropecuarios estudiados.*

La fracción de las materias primas se dividió en dos partes iguales, por un lado, los residuos puramente ganaderos (estiércol y lactosuero) comprendieron el factor A; y por otro, los residuos lignocelulósicos (maíz y cebada) supusieron el B. A su vez cada factor estuvo dividido en tres proporciones distintas: 1/1, 3/1 y 1/3.

Finalmente, se analizó la influencia de la composición de los residuos ganaderos en cuanto a las fracciones de estiércol y lactosuero (Factor A), y la influencia de la composición de los residuos agrícolas en cuanto a las fracciones de maíz y cebada (Factor B).

En la Tabla 5 se puede apreciar los niveles para cada uno de los factores y como se combinaron para establecer los 9 tratamientos.

**Tabla 5.**  
Diseño experimental de la fase de laboratorio.

Factores	Código	Niveles	Tratamiento	Código	Niveles	
					A	B
Residuos ganaderos (estiércol-lactosuero)	A	a1: 50/50%	T1	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	50/50 %	50/50 %
		a2: 75/25 %	T2	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	50/50 %	75/25 %
		a3: 25/75 %	T3	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	50/50 %	25/75 %
	B	b1: 50:50 %	T4	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	75/25 %	50/50 %
		b2: 75: 25 %	T5	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	75/25 %	75/25 %
		b3: 25: 75 %	T6	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	75/25 %	25/75 %
Residuos lignocelulósicos (cebada-maíz)	B	b2: 75: 25 %	T7	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	25/75 %	50/50 %
		b3: 25: 75 %	T8	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	25/75 %	75/25 %
			T9	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	25/75 %	25/75 %

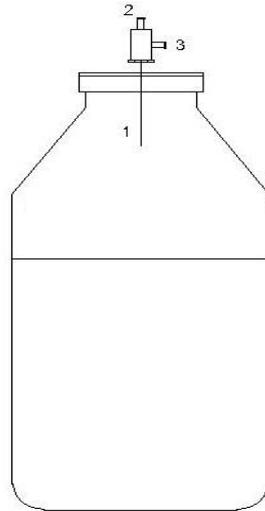
*Nota: a cada uno de los factores utilizados se les dividió en tres niveles, combinando los distintos niveles de cada factor se obtuvieron los nueve tratamientos con los que se trabajó. Fuente: elaboración propia.*

Una vez cargado, para que el digestor quedase herméticamente cerrado, se utilizó un tapón de goma y para evitar fugas se colocó una arandela metálica que rodea al tapón en el cuello del digestor. Finalmente se cerró todo utilizando un sellador industrial.

Una vez cargados, estos digestores fueron introducidos en una estufa de forma que se mantuviese una temperatura constante de 35°C (±2°C), para solo extraerlos diariamente para la medición del gas producido dentro de un extractor de gases.

Para la medición del biogás generado se utilizó una válvula de 3 vías como se muestra en la Figura 7, siendo la vía inferior o aguja (1) la salida del gas, la vía superior (2) fue dirigida para la medición de presión y la vía lateral (3) se conectó a una jeringuilla para medir el volumen del gas generado, y más tarde caracterizarlo. Todos estos materiales fueron facilitados por la UEB con el inconveniente de que algunos de estos eran reutilizados de proyectos anteriores, por

lo que, tal y como se muestra más adelante, hubo ciertos problemas de fugas en los digestores, principalmente por el deterioro de los tapones.



**Figura 7.**

*Esquema del digestor utilizado en laboratorio.*

*Nota: la parte inferior del digestor correspondería al volumen ocupado por el sustrato (60% del total), mientras que la superior sería la que ocupe el biogás. Tal y como se explicó anteriormente sobre el tapón está dibujado también la válvula de tres vías con que se realizaron las mediciones. Fuente: elaboración propia.*

#### 4.2.2 A nivel de campo

En un principio se planteó simular las condiciones de campo en el laboratorio para así obtener resultados parecidos a los esperables en campo, pero fue evidente que emular las condiciones existentes en el campo a nivel de laboratorio iba a ser prácticamente imposible. Por ello, se decidió configurar el ensayo a nivel de laboratorio en las condiciones óptimas para la digestión anaerobia, de acuerdo a la bibliografía. De esta forma, se buscó que el proceso fuera lo más rápido y tuviera una producción lo más óptima posible para poder compararlo y escalarlo a la situación existente en campo. Cabe recalcar que la diferencia más notable fue en la temperatura, mientras que el laboratorio se pudieron mantener unas condiciones constantes de 35°C, en campo la temperatura varió diariamente desde los 10 a los 30°C.

Se construyeron casetas con el fin de conservar la temperatura en el biodigestor y evitar daños por animales o por las condiciones meteorológicas. Para ello se elaboraron adobes para construir las paredes, se utilizó plástico de invernadero para el tejado y paja de cebada como cama para el biodigestor, de forma que ayudase todo lo posible a su aislamiento y a mantener las condiciones más cálidas posibles en su interior. El resultado final puede verse en la Figura 8.

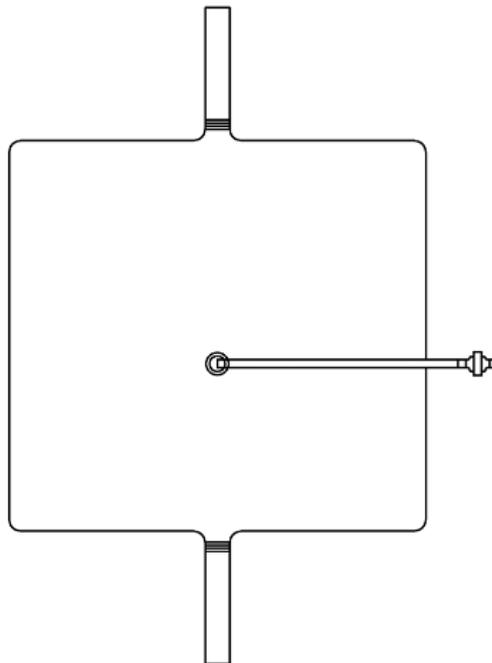


**Figura 8.**

*Interior y exterior de las casetas montadas en campo.*

*Nota: en la foto de la izquierda se puede apreciar la estructura de la caseta, a falta de la puerta. En la segunda foto se ve como queda el espacio interior, ocupado casi en su totalidad por el digester.*

Para los digestores se utilizó geomembranas de alta densidad (HDPE) de 500 micras con una longitud de 2 m, más 50 cm para la boca de entrada y 50 cm para la de salida, y otros 2 m de ancho. El digester poseía un volumen de 1800 L. El volumen ocupado por el sustrato fue de 1440 L (80% del volumen total), los 360 L restantes se reservaron para el gas producido en el biodigestor. Teniendo en cuenta las dimensiones del digester se decidió construir las casetas de en torno a 3 m x 3 m.



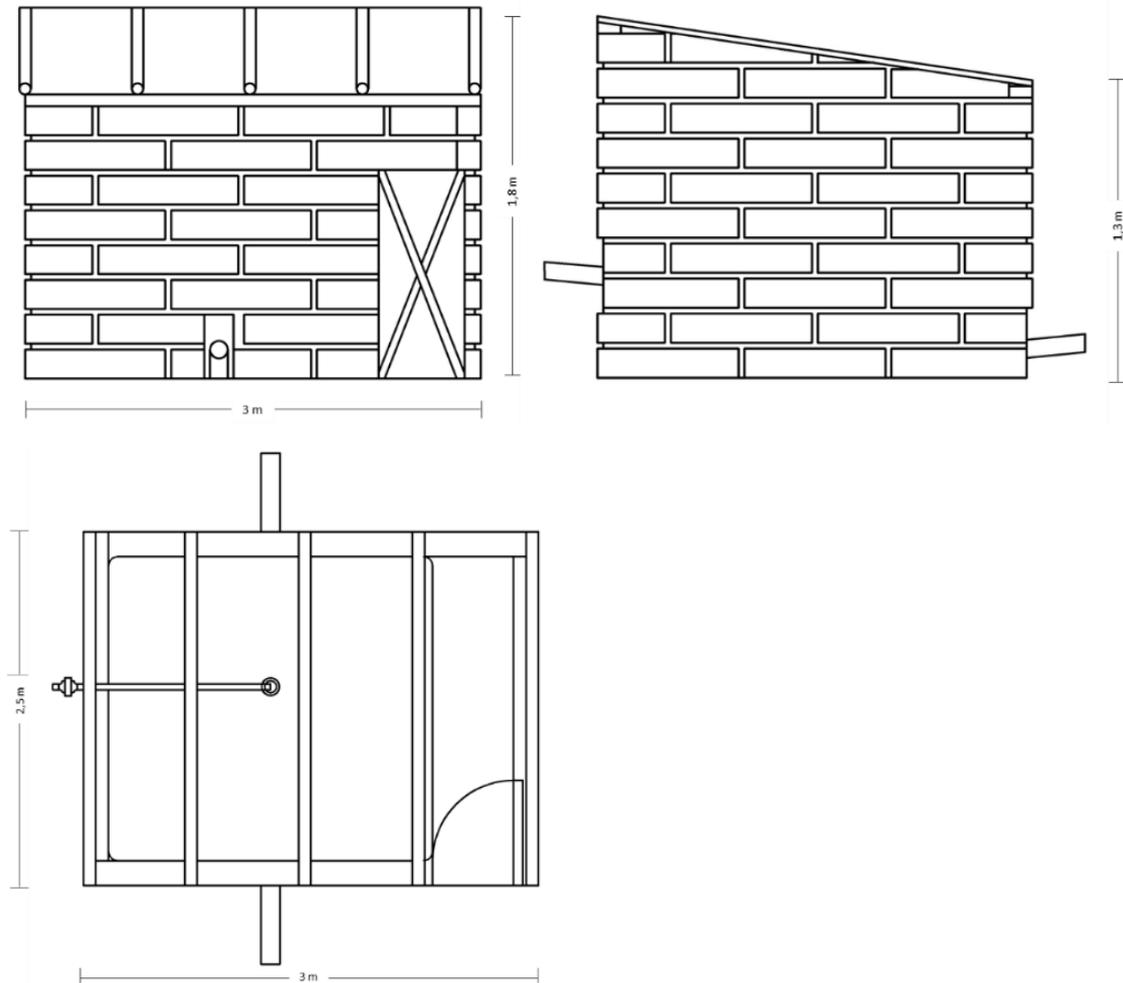
**Figura 9.**

*Alzado de uno de los digestores instalados en campo.*

*Nota: los tubos gruesos serían los de carga y descarga (indistintamente), mientras que la manguera sería por dónde se extrae el biogás. Fuente: elaboración propia.*

Para la entrada de la materia orgánica y salida del biol (material no digerido), se utilizó un tubo de 4" y de 1,5 m de largo. Para evitar fugas entre estos tubos y la geomembrana se utilizó caucho de neumático de automóvil y pegamento, de forma que se asegurase todo lo posible el sellado del tubo con el digester. Por otro lado, para la salida del gas se utilizó una rosca universal a la cual se conectó una manguera. Conectada a esta manguera en el exterior de la

caseta se colocó una trampa de gas casera hecha con una botella de plástico de 3 L y con agua hasta un tercio de su capacidad, de tal forma que cuando el digester estuviese lleno de gas haría burbujear el agua contenida en la misma. A continuación, se colocó una llave de bola para controlar la salida del gas hacia la cocina. En la Figura 10 se puede ver un esquema de los planos de las casetas.



**Figura 10.**

*Alzado, planta y perfil de las casetas en que fueron instalados los digestores.*

*Nota: en la parte superior izquierda alzado, a su derecha el perfil, y en la parte inferior la planta de la caseta, todas ellas con sus dimensiones. Fuente: elaboración propia.*

### 4.3 Cálculo y montaje de los biodigestores

#### 4.3.1 A nivel de laboratorio

El cálculo de la cantidad de materia prima con la que han de cargarse los digestores, se hizo gracias al contenido en sólidos volátiles (SV) del inóculo y las cuatro materias que componen el sustrato. De esta forma, a partir de la fracción conocida de las materias que va a ser volatilizada, y que, por tanto, comprenderá la parte que es susceptible de ser transformada en biogás, se calcula cuánto correspondería en términos de materia húmeda. Es decir, se realiza un cálculo a la inversa al del contenido en materia volátil, ya que este se calcula en función de la humedad de las distintas materias.

Así pues, fijando una tasa de carga orgánica (TCO, en g<sub>sv</sub>/L), se puede obtener los SV que corresponderían al volumen de los digestores con que se trabaja. A su vez estos SV estarían divididos entre los que corresponderían al inóculo y a la mezcla de materias primas, tal y como muestra la siguiente ecuación.

$$TCO_{digestor} \left( \frac{g}{L} \right) = \frac{SV_{inóculo}(g)}{V_{inóculo}(L)} + \frac{SV_{tratamiento}(g)}{V_{tratamiento}(L)} \quad (3)$$

Como la relación inóculo-tratamiento con la que se va a trabajar es conocida (en este caso de 2:1), se puede sustituir en función de esto, y del volumen que ocupa respecto al total de la mezcla, una de las partes. En la Ecuación ((4) se puede ver cómo quedaría al sustituir la parte del inóculo por su proporción respecto al tratamiento.

$$TCO_{digestor} = 2 * \frac{SV_{tratamiento}}{V_{mezcla} * \frac{2}{3}} + \frac{SV_{tratamiento}}{V_{mezcla} * \frac{1}{3}} \quad (4)$$

Una vez sustituido, y ya que el resto de parámetros son conocidos, se puede despejar cuántos SV (g) del tratamiento serían necesarios para conseguir la TCO propuesta en el volumen de los digestores utilizados, de acuerdo a lo que muestra la Ecuación ((5).

$$SV_{tratamiento} = \frac{TCO_{digestor}}{\frac{2}{V_{mezcla}} * \frac{2}{3} + \frac{1}{V_{mezcla}} * \frac{1}{3}} \rightarrow \quad (5)$$

$$SV_{tratamiento} = \frac{15 \frac{gSV}{L} * 2}{\frac{2}{186L} * \frac{2}{3} + \frac{1}{186L} * \frac{1}{3}} \rightarrow SV_{tratamiento} = 0,93 g$$

Conociendo la proporción de SV que hay en los sólidos totales (SV/ST) para cada materia prima, se puede calcular para cada una cuántos ST supondrían estos SV calculados, tal y como muestra la Ecuación ((6). Es decir, una vez obtenidos los SV de ((5), estos han de dividirse entre las dos partes de cada tratamiento (factor A y B), y a su vez cada parte dividirse por los SV/ST que correspondan a cada materia prima en función del nivel que tiene cada factor en cada tratamiento.

$$ST_{tratamiento}(g) = \frac{SV_{tratamiento}(g)}{\frac{\frac{SV_{tratamiento}}{ST_{tratamiento}}(\%)}{100}} \quad (6)$$

Una vez obtenidos los ST necesarios para completar la TCO fijada, se divide entre el que se obtuvo de las experiencias de laboratorio para cada materia (%), y así se obtiene la masa (g) de materia fresca (MF) que tendría que introducirse en los digestores. El cálculo quedaría tal y como refleja la Ecuación ((7).

$$MF_{\text{sustrato}}(g) = \frac{ST_{\text{tratamiento}}(g)}{\frac{ST_{\text{tratamiento}}(\%)}{100}} \quad (7)$$

Para recapitular, de estos 0,93 g de SV obtenidos en ((5), la mitad corresponderá al factor A (estiércol-lactosuero) y la mitad al factor B (cebada-maíz). Por tanto, para cada tratamiento, los 0,47 gramos correspondiente a cada factor, deberán multiplicarse por su respectiva proporción. Tal y como se explicó anteriormente, al dividir estos SV entre los SV/ST, se obtienen los ST. La cantidad de MF a introducir, se obtiene al dividir estos ST (g) entre el porcentaje de ST, proporcionalmente a cada tratamiento, y por cada materia. De la misma forma se calculan los SV correspondientes al inóculo para la TCO determinada, y la MF que sería necesaria utilizar para conseguirlos. Para completar el volumen restante hasta el estimado para la parte no gaseosa contenida en el digestor (186 mL) se añadió agua destilada.

La TCO determinada fue de 15 g<sub>sv</sub>/L, de acuerdo a la bibliografía existente (Babae & Shayegan, 2011; Comino *et al.*, 2010; Nagao *et al.*, 2012) y las dimensiones de los digestores utilizados. En la Tabla 6 se puede apreciar la cantidad de SV que fueron determinados para las dos partes de la mezcla a introducir en los digestores, así como las condiciones de trabajo de los mismos.

**Tabla 6.**

*Cálculo de los SV para cada componente de la mezcla, según la TCO determinada.*

	Relación	V (mL)	V (L)	TCO (g <sub>sv</sub> /L)	SV (g)	pH	Tª (°C)
Sustrato	1	62	0,062	15,00	0,93	7,79	35
Inóculo	2	124	0,124	15,00	1,86		

*Nota: una vez obtenidos los SV en función del volumen de cada materia y la TCO determinada, es necesario conocer el contenido de SV y su relación con los ST para poder calcular la MF que habría que introducir en los digestores.*

*Fuente: elaboración propia.*

Por su parte, en la Tabla 7 aparecen los valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores, tal y como fue descrito con anterioridad. Estos parámetros fueron obtenidos en la fase de caracterización de las materias primas.

**Tabla 7.**

*Valores de los distintos parámetros necesarios para el cálculo de las cargas de los digestores.*

Parámetro	Cebada	Maíz	Estiércol	Lactosuero	Lodo
Humedad (%)	80,69	84,29	86,05	80,88	96,02
ST (%)	19,31	15,71	13,95	19,12	3,98
SV (g)	76,09	78,95	52,08	80,52	39,15
SV (%)	14,70	12,40	7,27	15,40	1,56
SV/ST (%)	76,09	78,95	52,08	80,52	39,15

*Nota: estos valores fueron obtenidos siguiendo las directrices y los cálculos de las normas expuestas en el punto anterior. Fuente: elaboración propia.*

Por último, en la Tabla 8, se puede apreciar las cargas obtenidas en gramos, de los distintos materiales involucrados en la codigestión.

**Tabla 8.**

Cantidad de los distintos materiales utilizados para la codigestión a introducir en los digestores en laboratorio.

Relación	SV necesarios (g)	Sustrato Inóculo	Factor	SV (g)	ST (g)	MF (g)	Estiércol Cebada (g)	Lactosuero Maíz (g)
1:S 2:1	0,93	T1	B	0,47	0,70	4,24	2,12	2,12
			A	0,47	0,60	3,43	1,71	1,71
		T2	B	0,47	0,70	4,24	2,12	2,12
			A	0,47	0,61	3,81	2,86	0,95
		T3	B	0,47	0,70	4,24	2,12	2,12
			A	0,47	0,59	3,58	0,89	2,68
		T4	B	0,47	0,79	5,15	3,86	1,29
			A	0,47	0,60	3,43	1,71	1,71
		T5	B	0,47	0,79	5,15	3,86	1,29
			A	0,47	0,61	3,81	2,86	0,95
		T6	B	0,47	0,79	5,15	3,86	1,29
			A	0,47	0,59	3,58	0,89	2,68
		T7	B	0,47	0,63	3,55	0,89	2,66
			A	0,47	0,60	3,43	1,71	1,71
		T8	B	0,47	0,63	3,55	0,89	2,66
			A	0,47	0,61	3,43	2,86	0,95
		T9	B	0,47	0,63	3,55	0,89	2,66
			A	0,47	0,59	3,58	0,89	2,68
	1,86	Lodo activo		1,86	4,75	119,47		

Nota: tal y como se explicó de los SV necesarios se acaba obteniendo la MF a introducir en los digestores, y para conocer cuánto de cada materia prima supondría se divide entre el nivel que cada factor tiene en cada tratamiento.

Fuente: elaboración propia.

#### 4.3.2 A nivel de campo

En lo que respecta a la parte de campo, el método de cálculo seguido ha sido exactamente el mismo, utilizándose la misma TCO, y tan solo variando el volumen del digestor, que en este caso fue de 1800 L, aunque solo 1440 L (80% del total) fue ocupado por la mezcla, y por tanto tenido en cuenta en los cálculos. Además, para facilitar la carga del mismo, se diluyó este volumen en un 10% de agua, con lo que el volumen a ocupar por los distintos materiales a introducir fue de 1296 L. De esta forma, tal y como aparece en la Tabla 9, los SV de mezcla necesarios para alcanzar la TCO establecida en el volumen disponible serían 27 kg.

**Tabla 9.**

Cálculo de los SV necesarios, según la TCO determinada y el volumen útil del digestor.

Relación	V (L)	Dilución 0.1 (L)	TCO (g <sub>sv</sub> /L)	SV (g)
0:1	1.440	1.296	15	27.000

A continuación, en la Tabla 10 se detallan las cantidades de las materias primas utilizadas para realizar la carga de los biodigestores a nivel de campo.

**Tabla 10.**

*Carga de los distintos materiales utilizados para la codigestión a introducir en los digestores en campo.*

Sv necesarios (g)	Tratamiento	Factor	SV (g)	ST (g)	MF (g)	MF (kg)	Estiércol Cebada (kg)	Lactosuero Maíz (kg)
19.440,00	T2	B	9.720,00	14.660,36	88.643,49	88,64	44,32	44,32
		A	9.720,00	12.655,39	79.617,37	79,62	59,71	19,90
	T5	B	9.720,00	16.421,38	107.704,90	107,70	80,78	26,93
		A	9.720,00	12.655,39	79.617,37	79,62	59,71	19,90
	T8	B	9.720,00	13.240,47	74.257,43	74,26	18,56	55,69
		A	9.720,00	12.655,39	79.617,37	79,62	59,71	19,90

*Nota: la metodología es la misma que la explicada en la Tabla 8, en este caso, debido a las dimensiones, se expresa la cantidad de cada materia a introducir en kg. Fuente: elaboración propia.*

## 4.4 Métodos de evaluación

### 4.4.1 A nivel laboratorio

Los parámetros medidos fueron: presión, volumen, composición del gas, pH y tiempo de retención hidráulica (TRH).

Cabe recalcar que la temperatura a la que se trabajó en este experimento fue de 35°C, controlada en una incubadora.

#### 4.4.1.1 Presión del biogás

Se midió la presión del gas con el sensor de presión Delta TP 704 de un bar, conectado directamente a un medidor de presión Delta OHM OD 2124.2. Este medidor de presión está conectado a la válvula de tres vías, que a su vez está directamente conectada al biodigestor diariamente al momento de la medición. Como se mostró en la Figura 7, la vía dos es donde se mide la presión del gas.

#### 4.4.1.2 Volumen del biogás

El volumen del biogás fue medido diariamente en jeringas de 200 ml, de nuevo, como se puede observar en la Figura 7, se utilizó la vía 3 para este procedimiento. Este volumen de gas contenido en la jeringa posteriormente fue utilizado para medir la composición del mismo.

#### 4.4.1.3 Composición del biogás

Para la medición del gas se hizo uso del Gas Analyser Safety Booklet (BIOGAS 500), este aparato mide la composición de gases y líquidos (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>S), esta medición se la realiza con el gas obtenido de la medición del volumen.

#### 4.4.1.4 pH

Esta medición se realizó con la sonda de electrodo de pH c101 directamente conectado a un potenciómetro HACH HQ 40D. El pH se midió introduciendo la sonda de electrodo aproximadamente 5 centímetros en la muestra.

#### 4.4.1.5 Tiempo de retención hidráulica

Para el cálculo de este parámetro se tomó en cuenta los días de producción de biogás en los digestores, este tiempo de retención varió dependiendo del sustrato que se utilizó para este proceso, en la mayoría de los casos este proceso puede durar de 30 a 45 días.

#### 4.4.2 A nivel de campo

Los parámetros que se midieron en los experimentos en campo fueron: composición del gas, pH, temperatura y TRH. En cuanto a la presión y el volumen no se contó con los medios suficientes para poder monitorearlos.

##### 4.4.2.1 Composición del biogás

Este parámetro fue medido directamente de la manguera por donde sale el gas, mediante un adaptador casero conectado a una jeringa. Este parámetro, al igual que en laboratorio, fue medido con el Gas Analyser Satefy Booklet (BIOGAS 500), este aparato mide  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , y  $\text{H}_2\text{S}$ .

##### 4.4.2.2 Temperatura

La temperatura fue medida con termómetro laser, de nuevo no fue posible monitorear diariamente este parámetro debido a que el acceso a este aparato fue puntual y no periódico.

##### 4.4.2.3 pH

Su medida fue realizada con el mismo aparato que en laboratorio, pero se tuvo la misma situación que en cuanto a la medición de la temperatura.

#### 4.5 Análisis estadístico

Este punto se llevó a cabo para ayudar en la elección de los tres mejores tratamientos a nivel de laboratorio. Estos estudios se llevaron a cabo de dos formas, por un lado, se analizó la significancia de cada uno de los factores y los niveles existentes en cada tratamiento para la totalidad del ensayo, y por otro, se analizó diariamente la existencia de diferencias significativas entre los distintos tratamientos. Para el primer tipo de análisis se usó el programa "Statgraphics" por ajustarse muy bien a este tipo de análisis y porque los resultados obtenidos son mucho más visuales, mientras que para el segundo se utilizó el programa estadístico "R", por su facilidad para trabajar con grandes cantidades de datos.

El estudio llevado a cabo en el primer caso ha sido un ANOVA multifactorial (factor A y B) complementado con un estudio de mínimos cuadrados, para cada factor, con intervalos de confianza (LSD o de Fisher). En el segundo caso se ha realizado también un ANOVA multifactorial (cada tratamiento) para cada día, apoyado, de nuevo, con un estudio de mínimos cuadrados de las variables descritas con intervalos de confianza de Tukey. Estas variables han sido los valores acumulados (o diarios en el caso de trabajar con porcentajes) para cada tratamiento de los parámetros explicados anteriormente.

## 5. Resultados

### 5.1 A nivel de laboratorio

#### 5.1.1 Caracterización de los residuos agropecuarios e inóculo

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los diferentes análisis realizados, según las normas descritas en el punto anterior.

**Tabla 11.**  
*Características fisicoquímicas de los residuos agropecuarios e inóculo utilizados.*

Parámetro (%)	Cebada	Maíz	Estiércol	Lactosuero	Lodo
Sólidos volátiles (SV)	14,70	12,40	7,27	15,40	1,56
Sólidos totales (ST)	19,31	15,71	13,95	19,12	3,98
SV/ST	76,09	78,95	52,08	80,52	39,15
Humedad	2,87	2,41	2,95	10,25	2,13
Cenizas	9,21	13,28	38,25	9,68	55,73
Carbono fijo	14,70	7,77	9,67	9,80	5,13
N	1,76	2,62	1,58	6,34	2,34
C	44,46	43,50	33,31	8,11	5,45
H	6,09	6,13	4,22	7,78	4,32
O	35,31	32,05	19,74	8,35	3,67
C/N	24,28	16,59	21,87	1	1,56

*Nota: debido a la temporada en que los materiales lignocelulósicos fueron analizados, estos se encontraban aún en fase vegetativa, lo que explica el elevado contenido en carbono respecto al nitrógeno. Por su parte el lactosuero requirió de un pretratamiento largo y meticuloso debido a su estado líquido, así como al riesgo de desnaturalización de las proteínas. Fuente: elaboración propia.*

Como se muestra en la Tabla 11, la cebada (76,09%), el maíz (78,95%), el estiércol (52,8%) y el lactosuero (80,52%) poseen una elevada cantidad de SV/ST respectivamente, por tanto, estos sustratos poseen un bajo porcentaje de SV, siendo el estiércol de vaca el residuo agropecuario que se sitúa en cabeza. Mientras que el lodo activo, utilizado como inóculo en esta investigación, posee un 39,15% de SV/ST y un 55,63 % de cenizas, lo que da una idea sobre el porcentaje de MO disponible. Los resultados obtenidos son lógicos de acuerdo a la naturaleza de los residuos agropecuarios, donde se puede apreciar que el lodo activo es el que se degrada más fácil, seguido del estiércol, de los materiales lignocelulósicos, y, por último, del lactosuero.

La relación C/N del material agropecuario e inóculo se muestran también en la Tabla 11. Lo esperable sería que las relaciones de C/N mayores fuesen las de los materiales lignocelulósicos, sin embargo, en este caso esto no es así ya que en el momento de recolección y análisis de estos aún se encontraban en el momento de engrosamiento del fruto, por lo que la cantidad de nitrógeno contenida en ellos era mucho mayor que si la comparásemos con el residuo de la cosecha, donde el nitrógeno acumulado en los frutos ya ha desaparecido.

#### 5.1.2 Volumen producido de biogás

Para conocer con mayor exactitud este parámetro se calculó mediante la ecuación de los gases ideales, utilizando la diferencia de presión entre la atmosférica y la existente en el digestor y conociendo el resto de parámetros (temperatura, volumen molar, volumen ocupado por el sustrato y la constante de los gases ideales), se puede obtener el volumen de biogás. Los datos obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 12.

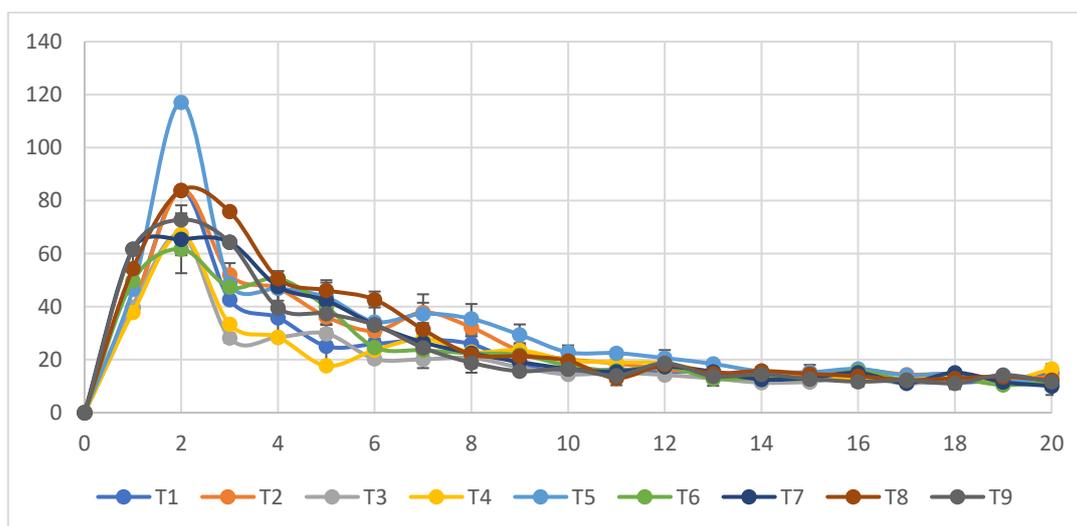
**Tabla 12.**  
Volumen diario producido de biogás (mL)

Día	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	39,61	39,80	39,80	37,84	46,62	49,74	58,05	54,36	54,36
2	58,05	83,92	67,29	80,23	109,79	76,53	65,44	76,53	72,84
3	38,51	48,67	33,22	40,35	48,71	30,16	56,72	68,21	64,38
4	35,88	46,97	28,49	39,58	46,97	32,19	41,02	32,19	35,88
5	25,13	36,21	29,86	36,21	43,61	25,13	42,31	39,43	37,36
6	25,94	30,89	20,35	29,16	34,30	24,68	33,15	35,52	33,15
7	27,46	37,88	20,18	35,84	37,32	28,12	26,57	26,50	24,50
8	25,90	32,22	20,69	29,90	35,44	26,75	20,29	21,99	18,88
9	18,37	23,47	17,11	23,61	29,41	21,88	19,18	21,32	15,67
10	15,15	20,21	14,45	19,84	22,84	17,77	16,59	19,59	16,59
11	16,33	18,59	15,11	18,99	22,50	15,85	15,52	13,08	14,01
12	15,52	16,33	14,23	18,66	20,62	17,52	17,41	18,07	18,70
13	15,45	15,22	12,93	15,26	18,44	12,97	15,48	14,89	13,78
14	12,93	13,86	11,34	13,82	15,59	13,01	12,56	15,78	14,45
15	11,71	14,41	11,71	15,19	15,30	12,79	13,16	13,34	12,75
16	14,78	16,22	13,71	12,01	16,56	15,71	15,08	13,78	11,75
17	11,86	13,71	10,98	12,93	14,12	12,23	10,86	12,31	12,19
18	11,35	14,68	13,01	14,43	14,72	12,87	15,12	12,98	11,13
19	12,43	12,80	11,85	11,78	12,18	10,48	11,56	12,18	14,25
20	15,08	13,45	11,09	16,53	11,71	11,67	10,08	12,29	11,67

*Nota: la elevada producción (mL) inicial se explica de acuerdo a la presencia del inóculo, donde las bacterias fermentativas ya estaban presentes y degradaron rápidamente el material introducido para luego comenzar a competir por este e ir desapareciendo poco a poco a medida que su alimento también lo hace.*

*Fuente: elaboración propia.*

Como se puede apreciar en la Figura 11 en los tres primeros días se obtuvo el pico de producción de biogás en todos los tratamientos. Tras esto, el volumen de biogás producido disminuyó notablemente hasta el día 10, a partir del cual la disminución fue mucho más progresiva y similar en todos los tratamientos.

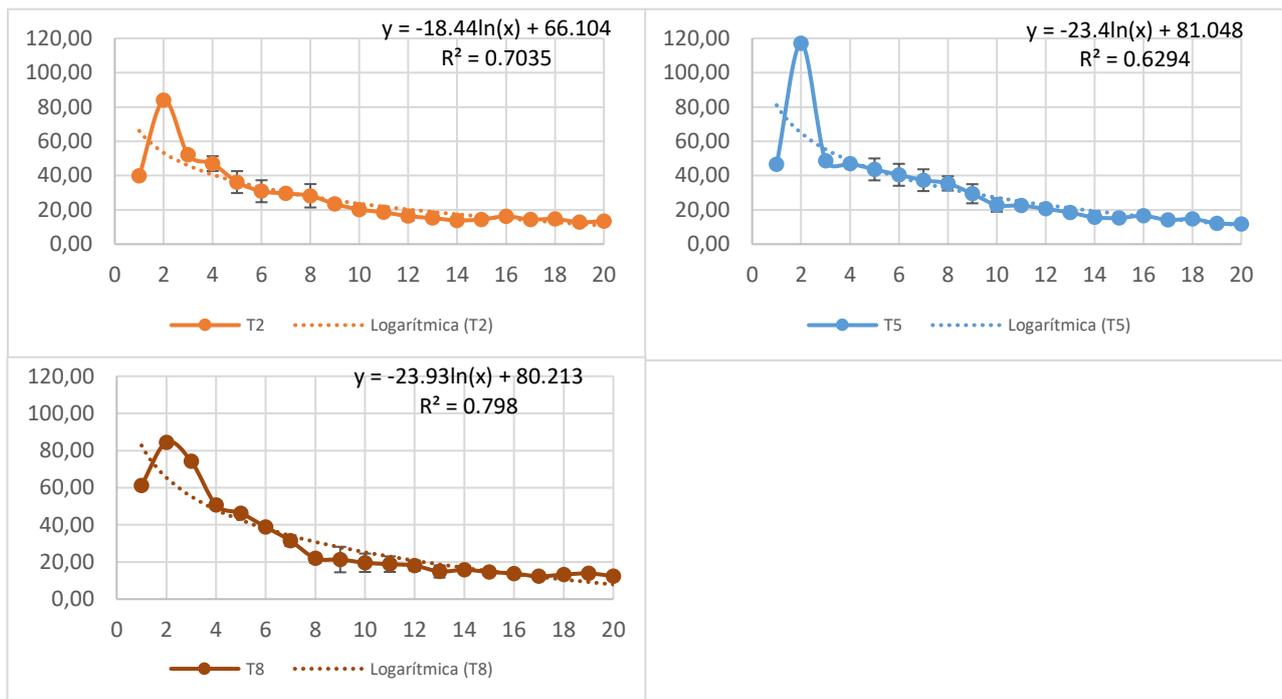


**Figura 11.**

*Producción diaria de biogás durante los 20 días.*

*Fuente: elaboración propia.*

Este parámetro fue el principal a tener en cuenta a la hora de seleccionar los tres mejores tratamientos, que serían llevados a campo. Los tratamientos que arrojaron mejores resultados fueron el T5, T2 y T8, tal y como muestran la Figura 11 y la Figura 12.



**Figura 12.**

*Producción de biogás diario (mL) de los tres mejores tratamientos*

*Nota: el volumen de biogás producido de forma diaria (mL) se comportaba de forma similar a una función exponencial, más si cabe si se tomasen valores desde el día 2, en que se alcanzó la producción máxima. Fuente: elaboración propia.*

El tratamiento T2 fue seleccionado por que tuvo una de las producciones mayores en los primeros días llegando a producir un volumen de 83,92 mL, lo que supone más de la mitad del espacio libre del biodigestor.

El tratamiento T5 obtuvo la mayor producción, llegando a obtener un volumen de 117,18 mL el segundo día, ocupando casi en su totalidad el espacio libre para la producción del biogás. Además, mantuvo una producción de casi 50 mL diarios hasta el día ocho.

El tratamiento T8 mantuvo su producción por encima de 75 mL en los dos primeros días. Por otra parte, el descenso en la producción de biogás fue menos repentino (más progresivo) que en los otros, llegándose en el día ocho a 22 mL. A partir de ahí, el descenso fue más constante hasta llegar a los 12,29 mL del último día, caso muy similar a los otros dos tratamientos.

También resulta interesante calcular el acumulado de este parámetro, tanto a la hora de realizar los análisis estadísticos explicados con anterioridad, como para dar más peso y hacer más visual la elección de los tratamientos. A continuación, en la Tabla 13 se detallan los valores obtenidos.

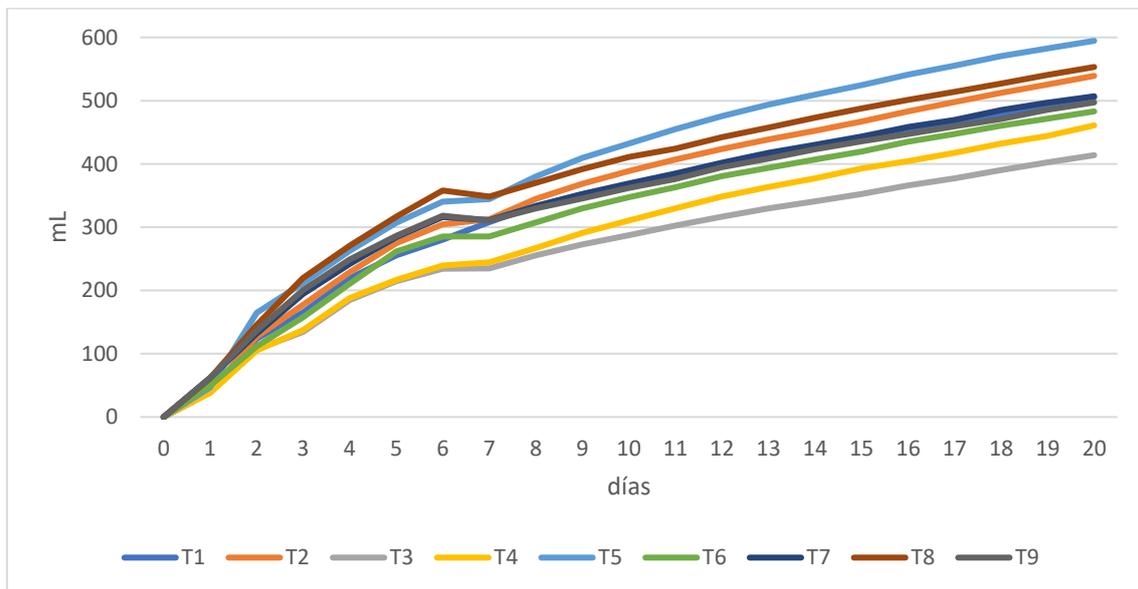
**Tabla 13.**  
Volumen acumulado de biogás (mL) durante los 20 días.

Día	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	39,61	39,80	39,80	37,84	46,62	49,74	61,75	54,36	61,75
2	123,54	123,72	107,09	105,13	163,80	111,49	127,19	138,28	134,58
3	166,24	175,86	135,31	138,53	212,50	158,85	191,57	214,16	198,96
4	202,13	222,82	163,81	167,02	259,47	209,52	239,19	264,82	238,54
5	227,25	259,04	193,66	184,76	303,08	249,43	281,50	311,05	275,90
6	253,20	289,93	214,01	208,38	337,37	274,11	314,65	353,76	309,05
7	280,65	296,92	213,84	212,64	340,40	273,04	308,07	342,48	300,40
8	306,56	329,14	234,53	235,53	375,84	295,43	330,52	364,46	319,28
9	324,92	352,60	251,64	259,15	405,25	317,31	349,70	385,79	334,95
10	340,08	372,82	266,09	278,99	428,09	335,08	366,29	405,37	351,54
11	340,08	391,41	281,21	297,98	450,59	350,94	381,81	418,45	365,55
12	355,60	407,74	295,43	316,65	471,21	368,45	399,21	436,52	384,25
13	371,04	422,96	308,37	331,91	489,65	381,42	414,70	451,42	398,03
14	383,98	436,82	319,71	345,73	505,25	394,43	427,26	467,19	412,48
15	395,69	451,23	331,43	360,92	520,55	407,22	440,42	481,83	425,23
16	410,47	467,46	345,14	372,93	537,10	422,92	455,49	495,61	436,98
17	422,33	481,87	356,11	385,86	551,22	435,15	466,69	507,92	449,18
18	433,68	496,55	369,12	400,29	565,93	448,02	481,81	520,89	460,30
19	446,11	509,34	380,98	412,07	578,11	458,50	493,37	534,49	474,55
20	461,19	522,79	392,07	428,59	589,82	470,17	503,45	546,77	486,22

*Nota: si bien todos los tratamientos tuvieron un crecimiento paulatino en su producción de biogás (mL) durante los 20 días, especialmente T5, pero también T2 y T8 mostraron resultados muy por encima de la media.*

*Fuente: elaboración propia.*

Tal y como se aprecia en la tabla anterior y en la Figura 13, los tratamientos 2 (T2), 5 (T5) y 8 (T8) fueron los que tuvieron una mayor producción acumulada de biogás, hecho que fue uno de los motivos principales para elegirlos como los tratamientos más interesantes a la hora de llevarlos a campo.



**Figura 13.**

*Producción acumulada de biogás (mL) durante los 20 días.*

*Nota: tal y como se ve en la Tabla 13, este gráfico muestra de una forma más visual cómo ha sido la producción de biogás (mL) durante este período de tiempo, como en los primeros días se concentró la mayoría de esta para después ir descendiendo paulatinamente. Fuente: elaboración propia.*

### 5.1.3 Volumen producido de CH<sub>4</sub>

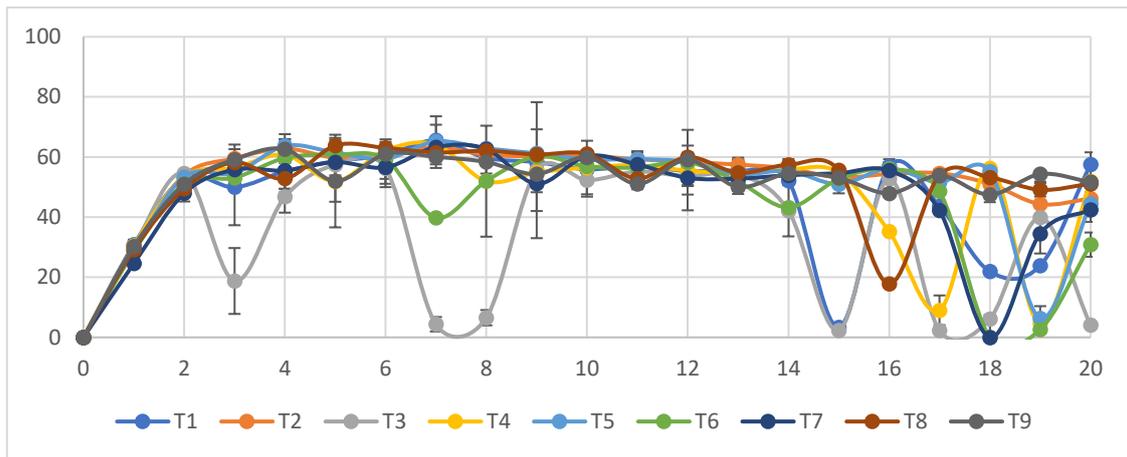
Una vez calculado el volumen de biogás generado diariamente, para conocer los ml de CH<sub>4</sub> producidos tan solo hubo que multiplicarlo por el porcentaje de este contenido en el biogás, tal y como aparece a continuación en la Tabla 14. Estos datos obtenidos posteriormente fueron utilizados para obtener el volumen acumulado.

**Tabla 14.**  
*Volumen de CH<sub>4</sub> producido diariamente (ml)*

Día	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	11,34	12,16	12,08	11,51	13,46	15,04	15,04	15,85	16,44
2	44,52	45,23	36,69	35,91	57,34	35,35	41,21	41,21	37,11
3	21,31	30,95	5,20	17,43	26,59	25,15	37,15	44,58	38,08
4	20,00	29,57	9,97	17,22	27,04	29,89	25,94	30,80	25,17
5	11,58	21,55	13,71	8,56	26,81	24,66	12,35	29,49	19,99
6	15,47	18,87	8,75	16,11	20,43	13,13	15,83	26,91	18,07
7	15,85	17,30	0,93	14,14	25,34	6,29	13,30	21,51	14,74
8	6,35	15,74	1,36	18,80	21,93	15,65	14,07	16,10	11,05
9	10,95	12,32	9,52	13,42	18,30	13,19	10,16	13,02	8,52
10	8,50	12,20	7,58	12,48	13,52	10,19	8,75	11,81	9,30
11	9,31	11,04	8,35	10,97	13,35	8,78	7,53	11,12	5,23
12	8,60	9,56	7,27	10,52	12,04	10,24	9,25	10,43	11,09
13	8,58	8,03	6,85	8,41	9,98	6,76	8,59	8,71	7,24
14	6,73	8,09	4,82	7,73	8,63	5,54	7,03	9,07	7,88
15	0,40	8,14	0,27	9,25	7,80	8,00	6,54	8,14	6,86
16	8,43	9,16	7,24	3,79	9,29	0,00	9,11	7,86	5,63
17	5,51	7,87	0,25	3,47	7,28	6,94	5,01	7,59	6,96
18	2,57	7,58	0,77	8,20	8,13	6,42	8,04	7,29	3,78
19	1,46	6,94	5,06	0,55	7,78	0,28	4,09	6,75	8,03
20	9,01	6,31	0,45	10,32	7,74	3,79	3,40	6,28	6,21

*Nota: como era esperable el contenido en metano se comporta igual que el de biogás, esto es debido, como se explicó anteriormente a la presencia de familias microbianas metanogénicas en el inóculo lo que acelera mucho el proceso. Lo normal, en un medio sin inóculo, tal y como se verá más adelante con las experiencias en campo, es que lleve un cierto tiempo a estas familias microbianas a asentarse y a poder degradar todo el sustrato que transforman en CH<sub>4</sub>. Fuente: elaboración propia.*

En la Figura 14 se muestra el porcentaje de metano producido diariamente durante el estudio, ya que el volumen de CH<sub>4</sub> tiene una evolución paralela al de biogás, tal y como se puede apreciar en la Tabla 12 y la Tabla 14, por lo que no resulta tan interesante su análisis. Como se puede ver, todos los tratamientos tuvieron un rendimiento similar hasta el día 14, excepto el tratamiento T3 ya que presentó fugas que no pudieron ser solventadas. Los últimos seis días, tal y como se vio en el punto anterior, los volúmenes obtenidos fueron muy pequeños, lo que para el equipo GEA 5000 supuso un caudal de entrada insuficiente para obtener una lectura precisa o correcta.



**Figura 14.**

Porcentaje de CH<sub>4</sub> producido durante los 20 días.

Nota: las irregularidades en los datos obtenidos se deben a la existencia de fugas que no pudieron ser selladas convenientemente, esto también dispara la desviación estándar de las repeticiones de cada tratamiento.

Fuente: elaboración propia

Si se atiende al porcentaje de CH<sub>4</sub>, los tratamientos T2, T5 y T8 tiene la misma tendencia de producción que el resto. Sin embargo, al ser los que mayor volumen de biogás produjeron, inevitablemente ocurre lo mismo con el volumen de CH<sub>4</sub>. Esto se corrobora si se analiza los datos acumulados de la producción de CH<sub>4</sub>, tal y como se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15.**

Volumen acumulado de CH<sub>4</sub> (mL) durante los 20 días.

Día	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
1	11,34	12,16	12,08	11,51	13,46	14,16	15,04	15,85	16,44
2	55,86	57,40	48,77	47,42	70,80	49,51	46,64	57,06	53,55
3	77,16	88,34	53,97	64,85	97,39	74,66	83,79	101,63	91,63
4	97,16	117,92	63,94	82,07	124,44	104,55	109,72	132,44	116,81
5	108,75	139,46	77,65	90,63	151,25	129,21	122,07	161,93	136,79
6	124,21	158,33	86,40	106,75	171,68	142,35	137,90	188,84	154,86
7	140,06	181,03	87,33	120,89	197,02	148,64	151,20	204,32	169,60
8	146,41	199,77	88,69	139,69	218,95	164,29	165,27	220,42	180,65
9	157,37	212,09	98,21	153,11	237,24	177,48	175,43	233,44	189,17
10	165,87	224,30	105,79	165,59	250,76	187,67	184,18	245,24	198,47
11	175,18	235,33	114,14	176,56	264,11	196,46	191,72	250,47	203,70
12	183,77	244,89	121,41	187,08	276,15	206,69	200,97	260,91	214,79
13	192,35	252,93	128,26	195,49	286,13	213,46	209,56	269,62	222,04
14	199,09	260,04	133,08	203,22	294,76	219,00	216,59	278,69	229,91
15	199,49	268,18	133,35	212,47	302,56	227,00	223,13	286,82	236,77
16	207,91	277,34	140,59	216,25	311,85	227,00	232,24	289,49	242,40
17	213,42	285,21	140,84	219,72	319,13	233,94	237,24	297,08	249,36
18	215,99	292,78	141,62	227,92	327,25	240,35	245,29	304,37	253,13
19	217,45	298,50	146,68	228,47	328,03	240,63	249,38	308,82	261,17
20	226,46	304,81	147,13	238,79	331,78	244,42	253,17	315,10	267,37

Nota: de nuevo, como pasaba con la producción de biogás (mL), T2, T5 y T8 son los tratamientos que mayor cantidad de CH<sub>4</sub> (mL) produjeron durante los 20 días. Fuente: elaboración propia.

#### 5.1.4 Porcentaje diario de CO<sub>2</sub> producido

Como se muestra en la Figura 15, la producción de CO<sub>2</sub> fue aumentando en todos los tratamientos hasta el día 4, a partir del cual se mantuvo constante en torno a un 50% hasta el décimo día, donde comenzó un descenso suave pero constante. Los únicos tratamientos cuya

producción fue mayor y más regular fueron T2, T5 y T8, recalando que T2 tuvo la mayor producción registrada. Los motivos de las irregularidades que aparecen en los resultados son los mismos que los explicados anteriormente, las fugas que no pudieron atajarse, especialmente en T3, así como un volumen insuficiente para obtener lecturas precisas durante los últimos días del ensayo.

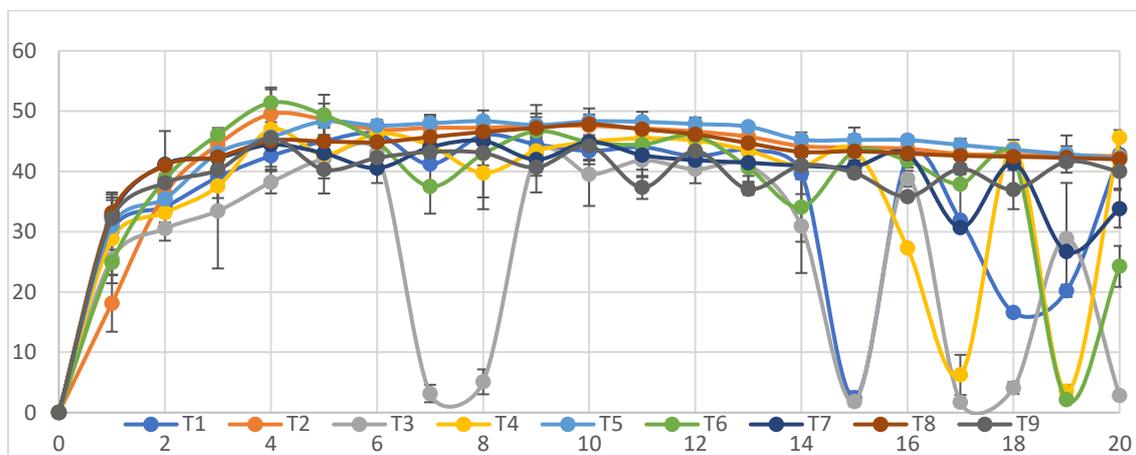


Figura 15.

Porcentaje de CO<sub>2</sub> producido durante los 20 días.

Nota: la evolución de este parámetro es similar al del porcentaje de CH<sub>4</sub> producido, existiendo los mismos errores en los resultados. También de nuevo, el hecho de que este parámetro se mantenga a un nivel constante y no experimente una evolución se debe a la existencia del inóculo, donde las familias microbianas ya estaban instauradas y eso permito una producción constante de CO<sub>2</sub>. Fuente: elaboración propia.

### 5.1.5 Análisis estadístico

Se realizó estudio de ANOVA para tres parámetros: producción de biogás acumulado (mL), producción de CH<sub>4</sub> acumulado (mL) y porcentaje de CO<sub>2</sub> diario. Debido a la gran cantidad de datos, tan solo se mostrarán y analizarán en esta memoria el estudio del primer parámetro, encontrándose los otros dos en el Anejo I. Esto se debe a que en la toma de decisiones, si bien se basó en el análisis de los tres parámetros, las conclusiones extraídas del análisis estadístico de datos del primero son más visuales y arrastran significado en los otros dos.

Además, tal y como se explicó anteriormente se han hecho dos tipos de estudios estadísticos distintos para cada parámetro.

#### 5.1.5.1 ANOVA para la producción de biogás en función de los niveles de cada factor

Los resultados arrojados por el programa "Statgraphics" en cuanto a la producción acumulada de biogás (mL) para los 20 días que duró el ensayo, se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16.**

ANOVA para la producción de biogás (mL) de los nueve tratamientos para los veinte días.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: Factor A	15.539,4	2	7.769,72	1,37	0,2798
B: Factor B	59.005,7	2	2.9502,8	5,19	0,0166
Interacciones					
AB	20.240,0	4	5.060,0	0,89	0,4894
Residuos	102.228,	18	5.679,36		
Total (corregido)	197.014,	26			

Nota: datos obtenidos del programa "Statgraphics" al analizar los valores acumulados de los veinte días de este estudio en función de los dos factores utilizados. Fuente: elaboración propia.

El análisis de varianzas o ANOVAS muestra la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre las variables analizadas, que en este caso resultan los factores utilizados en la elaboración de los distintos tratamientos, residuos lignocelulósicos (B) y ganaderos (A). Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores, ya que, cuando un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el parámetro analizado con un 95% de nivel de confianza. Además, un ANOVA añade y se complementa con una prueba de medias por mínimos cuadrados que sirve para estimar los límites de los distintos niveles de las variables estimadas (límites de Fisher o Tukey), lo que permite de una forma más visual entender qué variables o niveles de las variables presentan una relación estadísticamente significativa.

**Tabla 17.**

Prueba de medias por mínimos cuadrados con intervalos de confianza del 95,0% para la producción acumulada de biogás (mL) para los nueve tratamientos durante los veinte días.

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
<b>Media global</b>	27	505,26			
<b>Factor A</b>					
a1	9	471,463	25,1205	418,687	524,24
a2	9	524,732	25,1205	471,956	577,509
a3	9	519,586	25,1205	466,809	572,362
<b>Factor B</b>					
b1	9	495,262	25,1205	442,486	548,039
b2	9	566,856	25,1205	514,079	619,632
b3	9	453,663	25,1205	400,887	506,44
<b>Factor A por Factor B</b>					
a1, b1	3	447,463	43,51	356,052	538,875
a1, b2	3	549,51	43,51	458,099	640,921
a1, b3	3	417,417	43,51	326,005	508,828
a2, b1	3	522,177	43,51	430,765	613,588
a2, b2	3	616,73	43,51	525,319	708,141
a2, b3	3	435,29	43,51	343,879	526,701
a3, b1	3	516,147	43,51	424,735	607,558
a3, b2	3	534,327	43,51	442,915	625,738
a3, b3	3	508,283	43,51	416,872	599,695

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del programa "Statgraphics".

En la Tabla 17 se muestran los tres niveles los dos factores, así como sus respectivas combinaciones, para los que se realiza una prueba de medias por mínimos cuadrados. De las nueve combinaciones realizadas podemos observar claramente que existen tres con mayor producción de biogás, a1, b2 (T2), a2, b2 (T5) y a3, b2 (T8). A continuación, se va a analizar las relaciones estadísticamente significativas para cada nivel de cada factor y las relaciones entre estos.

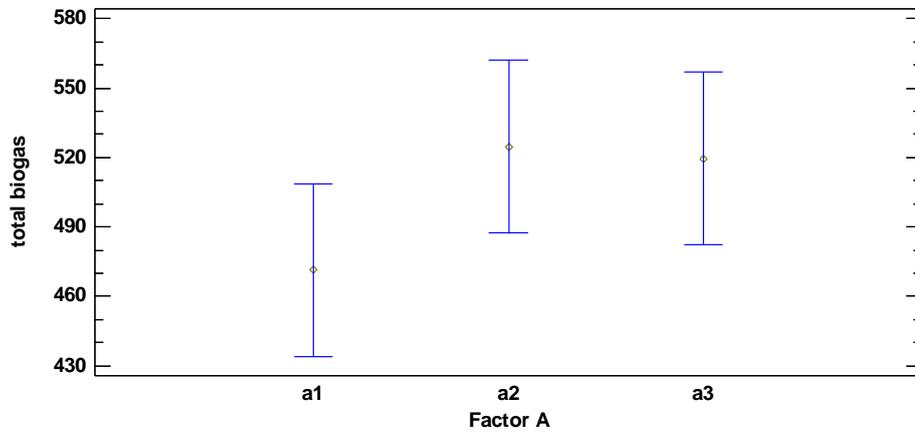
**Tabla 18.**

*Pruebas de medias por mínimos cuadrados para el factor A.*

Factor A	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
a1	9	471,463	25,1205	X
a3	9	519,586	25,1205	X
a2	9	524,732	25,1205	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	
a1 - a2		-53,2689	74,637	
a1 - a3		-48,1222	74,637	
a2 - a3		5,14667	74,637	

*Nota: \* indica una diferencia significativa. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del programa "Statgraphics".*

Tal y como muestra la Tabla 18, con un nivel de confianza del 95.0 %, se puede afirmar que para la producción de biogás (mL) no existen diferencias significativas entre usar uno u otro de los niveles del factor A (estiércol y lactosuero).



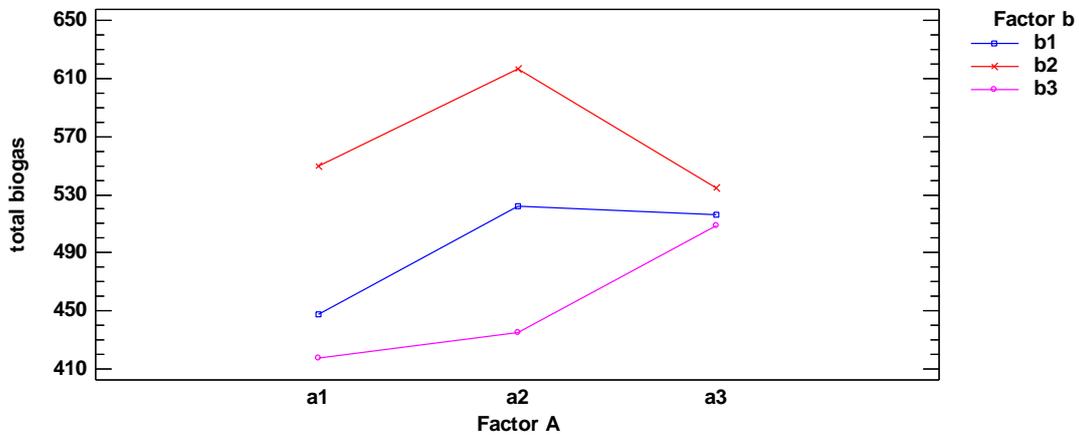
**Figura 16.**

*Gráfico LDS del factor A respecto a la producción de biogás (mL).*

*Nota: este gráfico muestra si los distintos niveles analizados están relacionados o muestran diferencias estadísticamente significativas, al existir solapamiento o no de sus intervalos LDS.*

*Fuente: "Statgraphics" con datos del proyecto.*

La Figura 16 corrobora de una manera más visual lo que se explicó anteriormente, ya que los límites superiores e inferiores para el método Fisher se superponen en los 3 niveles del factor A.



**Figura 17.**

*Interacciones de los distintos niveles del factor B sobre los niveles del factor A.*

*Nota: este gráfico muestra para los niveles de dos factores la existencia de diferencias estadísticamente*

significativas. Si las líneas son paralelas quiere decir que no hay diferencias, pero solo si se cruzan significa que las diferencias son estadísticamente significativas. Fuente: "Statgraphics" con datos del proyecto.

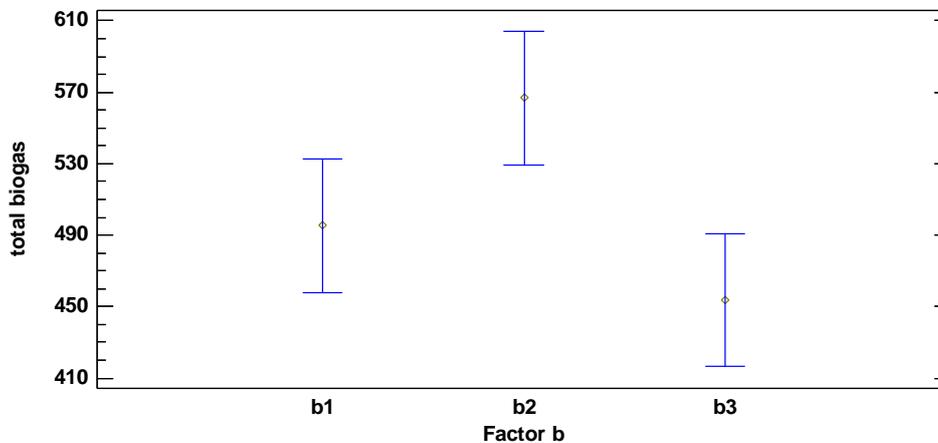
En la Figura 17 se observa que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los tres niveles del factor B sobre los de A, con un intervalo de confianza del 95%, ya que ninguna de las líneas de los niveles del factor B se cruzan, y por tanto, tienen el mismo orden en cuanto a la producción de biogás acumulado (mL) en los tres niveles del factor A ( $b_2 > b_1 > b_3$ ).

**Tabla 19.**  
Pruebas de medias por mínimos cuadrados para el factor B.

Factor B	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
b3	9	453,663	25,1205	X
b1	9	495,262	25,1205	XX
b2	9	566,856	25,1205	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	
b1 - b2		-71,5933	74,637	
b1 - b3		41,5989	74,637	
b2 - b3	*	113,192	74,637	

Nota: \* indica una diferencia significativa. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del programa "Statgraphics".

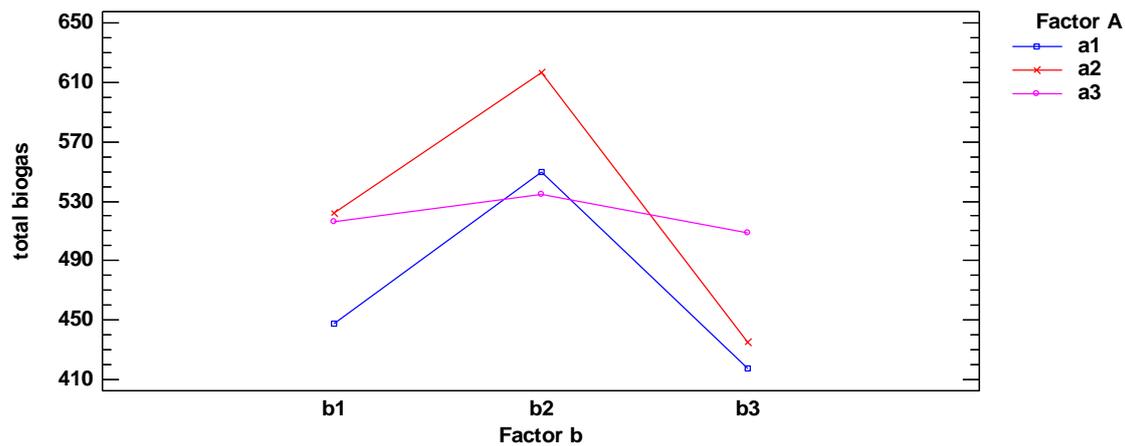
En la Tabla 19 se puede apreciar el análisis por mínimos cuadrados para el factor B, donde se observa que en este caso si existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles b2 y b3. Esto quiere decir que la diferencia entre utilizar el nivel b1 o b2, así como b1 o b3 no supone una diferencia estadísticamente significativa en cuanto a la producción de biogás (mL), sin embargo, la diferencia entre utilizar b2 o b3 si supone una diferencia estadísticamente significativa para este parámetro.



**Figura 18.**  
Gráfico LDS del factor B respecto a la producción de biogás.

Nota: este gráfico muestra si los distintos niveles analizados están relacionados o muestran diferencias estadísticamente significativas, al existir solapamiento o no de sus intervalos LDS. Fuente: "Statgraphics" con datos del proyecto.

En la Figura 18 se observa que los niveles b2 y b3 no presentan sus intervalos LDS solapados, por lo que estos dos niveles presentan diferencias estadísticamente significativas en la producción de biogás, como siempre, con un nivel de confianza de 95%.



**Figura 19.**

*Interacciones de los distintos niveles del factor A sobre los niveles del factor B. Nota: este gráfico muestra para los niveles de dos factores la existencia de diferencias estadísticamente significativas. Si las líneas son paralelas quiere decir que no hay diferencias, pero solo si se cruzan significa que las diferencias son estadísticamente significativas. Fuente: "Statgraphics" con datos del proyecto.*

En la Figura 19 se evidencia lo explicado anteriormente, para el nivel b2 el máximo de producción de biogás (mL) ocurre con el nivel a2, después a1 seguido muy de cerca por a3. Sin embargo, en el nivel b3 el orden es totalmente distinto, se obtiene mayor producción con a3, seguido por a2 y a1. De esta forma se puede decir que las diferencias estadísticamente significativas que mostraba el ANOVA entre los niveles b2 y b3, son favorables a b2, es decir la producción de biogás es significativamente mayor en b2 que en b3. Esto viene a apoyar la decisión tomada en cuanto a los mejores tratamientos, ya que los 3 (T2, T5 y T8) son las tres variaciones de los niveles del factor A sobre el nivel b2 del factor B, que cómo se puede apreciar en la gráfica anterior, son los que mayor producción tienen.

#### 5.1.5.2 ANOVA para la producción de biogás en función de cada día.

En el caso de este estudio, se realizó, tal y como se explicó anteriormente, un ANOVA para cada día hasta el día 14, ya que, como se puede apreciar en la Figura 11, a partir de este día todos los tratamientos tienen una producción muy similar, pero, sobre todo, muy reducida. Debido a la gran cantidad de información que se desprenden de todos estos ANOVAS, y ya que se explicó en el punto anterior como interpretar los resultados de estos estudios, tan solo se presentará una tabla resumen con la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas. El resto de información puede encontrarse en el Anejo II.

**Tabla 20.**

*Resumen de las relaciones estadísticamente significativas para los nueve tratamientos durante los veinte días.*

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
T1	ab	ab	ab	a	a	a	a	a	a	a	ab	a	ab	ab
T2	ab	ab	ac	a	a	a	a	a	ab	a	ab	a	ab	ab
T3	ab	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
T4	a	ab	ac	a	a	a	a	a	ab	a	ab	a	ab	ab
T5	ac	b	ac	a	a	a	a	a	b	a	b	a	b	ab
T6	ac	ab	a	a	a	a	a	a	ab	a	ab	a	a	ab
T7	c	a	ac	a	a	a	a	a	a	a	ab	a	ab	ab
T8	bc	ab	c	a	a	a	a	a	ab	a	a	a	ab	b
T9	bc	ab	bc	a	a	a	a	a	a	a	a	a	ab	ab

*Nota: en esta tabla, al igual que se mostraba en los ANOVA explicados anteriormente, se muestra el estudio de homogeneidad realizado para cada ANOVA diario de los nueve tratamientos. El significado es sencillo, los*

*tratamientos que presentan la misma letra en un día, no muestran diferencias estadísticamente significativas ( $p$ -valor $>0,05$ ), mientras que las que no comparten la misma letra sí las muestran ( $p$ -valor $<0,05$ ), para un nivel de confianza del 95%. Fuente elaboración propia con datos obtenidos del programa estadístico "R".*

Así pues, la información que aporta la Tabla 20, viene a apoyar y corroborar las suposiciones sobre los tres tratamientos escogidos. Si se atiende a los datos de los días 2 y 3, que corresponden a los de máxima producción de biogás (mL), se puede observar como en el primero de estos días T2, T5 y T8 no muestran diferencias estadísticamente significativas respecto a este parámetro (los tres están en el grupo de homogeneidad b), pero sí con otros tratamientos. En el tercer día, volvemos a encontrar la misma situación, los tres tratamientos no muestran diferencias estadísticamente significativas respecto a este parámetro, pero sí respecto al resto de tratamientos, la mayoría de ellos los que no mostraban diferencias el día anterior. Tan solo con T4, T7 y T9 no muestran diferencias estadísticamente significativas en cuanto a este parámetro, pero si bien se comportan de la misma forma, no han sido igual de productivos que T2, T5 y T8, tal y como muestra la Tabla 13.

#### 5.1.6 Cinética microbiana

Como se explicó en el marco teórico, se ha analizado la producción de CH<sub>4</sub> acumulada según el modelo modificado de Gompertz. Para la obtención de los parámetros deseados (" $M_e$ ", " $v_{Mmáx}$ " y " $t_{lag}$ ") se utilizó el programa "Statistica", ya que es capaz de resolver funciones no lineales, como la del modelo.

Para desarrollar este modelo se tomó como variables conocidas "M" (cantidad de metano acumulado producido) y "t" (tiempos estimados). En cuanto a M se tomaron los valores de la molaridad acumulada del CH<sub>4</sub> producido. Estos datos se obtuvieron mediante la ecuación de los gases ideales ( $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ), con la que se puede obtener fácilmente los números de moles producidos para cada volumen de CH<sub>4</sub> (n/V), ya que el resto de parámetros son conocidos. Este valor es conocido también como molalidad. Una vez conocida la molalidad, multiplicando por la masa molecular del metano se obtienen los gramos contenidos en dichos moles (Masa molecular = masa en gramos/número de moles). De esta forma, se obtiene la producción de metano acumulado en g/L, es decir, se obtiene la molaridad acumulada de metano durante los días que dura el ensayo de laboratorio.

Como se puede apreciar en la Tabla 21, el programa no solo calcula los parámetros estimados en la fórmula introducida, sino que calcula distintos valores estadísticos para poder asegurar que los valores obtenidos tienen coherencia matemática. Estos valores son el error estándar, el t y el p valor y los límites superiores e inferiores para los parámetros calculados.

**Tabla 21.**

Resultados de la molaridad acumulada de metano para el modelo modificado de Gompertz.

Tratamiento	Parámetro	Estimación	Error st	T valor	P valor	LI	LS
T1	$M_e$	6,4715	0,1425	45,4104	0,0000	6,1708	6,7721
	$v_{Mmáx}$	1,0935	0,0322	33,9218	0,0000	1,0255	1,1615
	$t_{lag}$	0,5658	0,2017	2,8044	0,0122	0,1401	0,9914
T2	$M_e$	8,0408	0,2873	27,9914	0,0000	7,4347	8,6468
	$v_{Mmáx}$	1,1664	0,0391	29,8115	0,0000	1,0839	1,2490
	$t_{lag}$	0,5197	0,2529	2,0551	0,0556	-0,0138	1,0531
T3	$M_e$	4,9132	0,2260	21,7427	0,0000	4,4365	5,3900
	$v_{Mmáx}$	0,7370	0,0369	19,9911	0,0000	0,6592	0,8147
	$t_{lag}$	0,1164	0,3730	0,3120	0,7588	-0,6706	0,9034
T4	$M_e$	6,7652	0,1544	43,8099	0,0000	6,4394	7,0910
	$v_{Mmáx}$	1,1284	0,0334	33,7881	0,0000	1,0579	1,1988
	$t_{lag}$	0,5854	0,2041	2,8686	0,0106	0,1548	1,0159
T5	$M_e$	7,8482	0,2165	36,2474	0,0000	7,3914	8,3050
	$v_{Mmáx}$	1,2143	0,0369	32,8799	0,0000	1,1364	1,2922
	$t_{lag}$	0,5035	0,2202	2,2862	0,0353	0,0389	0,9682
T6	$M_e$	6,9777	0,2342	29,7927	0,0000	6,4835	7,4718
	$v_{Mmáx}$	1,0310	0,0338	30,5184	0,0000	0,9598	1,1023
	$t_{lag}$	0,5640	0,2439	2,3127	0,0335	0,0495	1,0786
T7	$M_e$	7,3929	0,2563	28,8442	0,0000	6,8521	7,9336
	$v_{Mmáx}$	1,0675	0,0336	31,7943	0,0000	0,9967	1,1384
	$t_{lag}$	0,6597	0,2371	2,7823	0,0128	0,1595	1,1600
T8	$M_e$	7,5054	0,2562	29,2993	0,0000	6,9649	8,0458
	$v_{Mmáx}$	1,1434	0,0421	27,1394	0,0000	1,0545	1,2323
	$t_{lag}$	0,4008	0,2701	1,4838	0,1562	-0,1691	0,9707
T9	$M_e$	7,7073	0,3616	21,3153	0,0000	6,9444	8,4701
	$v_{Mmáx}$	1,0750	0,0454	23,6660	0,0000	0,9791	1,1708
	$t_{lag}$	0,1606	0,3293	0,4877	0,6320	-0,5341	0,8553

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del programa "Statistica".

El primer hecho que cabe destacar de los resultados arrojados por el modelo modificado de Gompertz, es en relación a la  $v_{Mmáx}$  o velocidad máxima de producción de  $CH_4$ , donde si bien podemos ver que los resultados obtenidos para los nueve tratamientos son significativamente similares, los tres tratamientos que fueron elegidos para extrapolar en campo se encuentran por encima del resto. Esto quiere decir que el T2, T5 y T8 producen metano a una velocidad mayor que el resto de tratamientos, lo que refuerza la elección de los mismos.

Por otro lado, cabe destacar la existencia de unos  $t_{lag}$ , o tiempos de latencia, muy pequeños. Esto es debido a la planificación del ensayo de laboratorio, en el que se escogieron las condiciones de funcionamiento más óptimas posibles, lo que junto a la elección de introducir el inóculo (lodo activo) en una proporción 2:1 con respecto al sustrato o tratamiento, hizo que en menos de un día todos los tratamientos comenzasen a producir  $CH_4$ . De hecho, el tratamiento que ha tenido un tiempo de latencia mayor, ha resultado T7, pero este ha sido de tan solo 0,66 días.

Por último, tal y como aparece en la Tabla 22, se comparó los datos obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz con los que se obtuvieron en el ensayo llevado a cabo en el laboratorio.

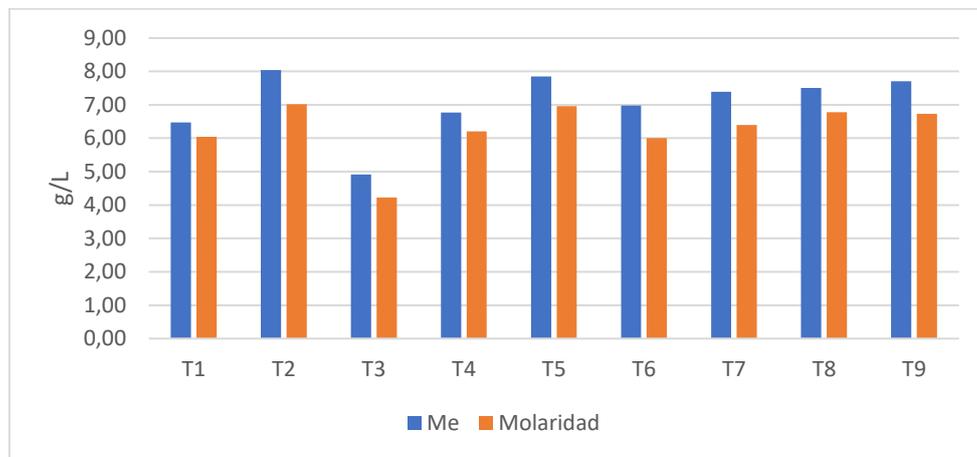
**Tabla 22.**

Comparación datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$M_e$ (g/L CH <sub>4</sub> )	6,47	8,04	4,91	6,77	7,85	6,98	7,39	7,51	7,71
Molaridad (g/L CH <sub>4</sub> )	6,05	7,02	4,23	6,21	6,96	6,01	6,39	6,78	6,73
Diferencia	0,43	1,02	0,69	0,56	0,89	0,97	1,00	0,72	0,98
Diferencia (%)	6,57	12,67	13,95	8,22	11,30	13,93	13,54	9,64	12,67

Nota: tal y como puede apreciarse, los resultados obtenidos en las experiencias de laboratorio fueron menores que el potencial producible, pero con diferencias en todos los tratamientos de menos del 14%.

Los resultados obtenidos para el CH<sub>4</sub> acumulado han estado por debajo del  $M_e$ , o potencial de metano producible. Esto resulta lógico, principalmente debido a la enorme complejidad que existe tras un proceso de codigestión anaerobia, lo que hace difícil que los resultados sigan al cien por cien a lo estimado por el modelo matemático.



**Figura 20.**

Diferencias de los datos obtenidos en laboratorio con los obtenidos mediante el modelo modificado de Gompertz. Nota: como puede apreciarse el dato obtenido en las experiencias de laboratorio siempre fue menor que el potencial producible extraíble del modelo matemático.

Aun así, tal y como se desprende de la Figura 20, así como de los datos ya presentados en la Tabla 21 y en la Tabla 22, las diferencias no han sido muy grandes, siendo en el mayor de los casos, el del T3, con casi un 14% de diferencia respecto al potencial esperable. Este porcentaje de diferencia entre los datos potenciales según el modelo matemático y los datos obtenidos en laboratorio se encuentra a un nivel similar al de estudios realizados comparando con el mismo modelo (Gu *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2020; Varsha *et al.*, 2020).

De esta forma, se puede concluir que los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio, analizados en función de la molaridad acumulada del CH<sub>4</sub> producido, se comportan de acuerdo al modelo matemático estudiado, estando sus valores acumulados obtenidos levemente por debajo de los valores potenciales que el modelo arroja.

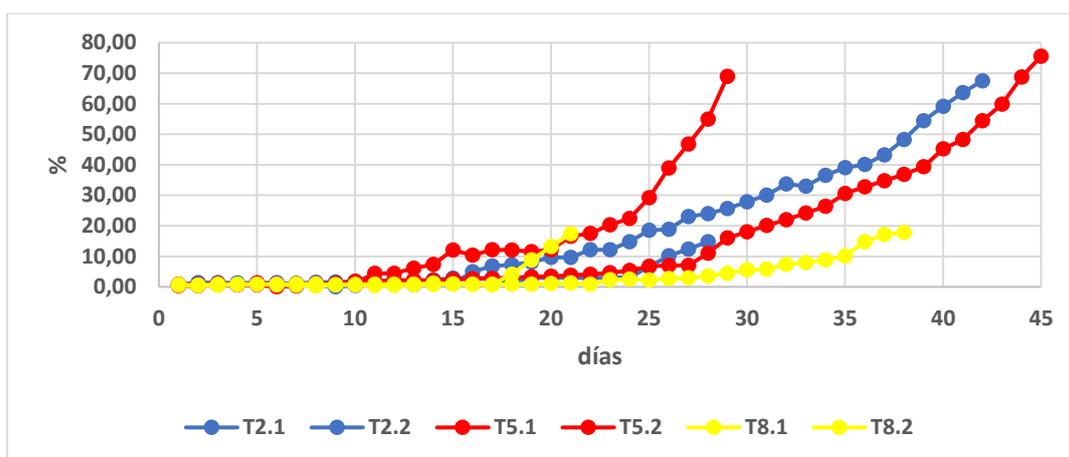
## 5.2 A nivel de campo

En cuanto a la parte de implementación del proyecto, la única propiedad que pudo ser medida para evaluar el proceso de codigestión anaerobia fue la caracterización del biogás producido. Aun así, conociendo los porcentajes de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> diarios se puede estimar en qué punto o fase del proceso de digestión anaerobia se encuentra cada digester.

### 5.2.1 Porcentaje diario de producción de CH<sub>4</sub>

Tal y como se puede apreciar en la Figura 21, la producción de biogás se demoró considerablemente, llegando en la primera repetición del tratamiento 8 (T8.1) a tardar casi un mes en empezar a producir un porcentaje mínimamente significativo de CH<sub>4</sub>. Esta diferencia en la entrada a producción se achaca principalmente a las diferentes ubicaciones de los digestores, lo que hace que cada proceso de codigestión anaerobia ocurrido en cada digestor esté sujeto a condiciones distintas. En el caso del T8.1, el digestor se encuentra ubicado en el fondo de un valle, por lo que las horas de sol directo que recibe son mucho menores que las del resto de digestores, lo que afecta evidentemente a la temperatura del proceso.

Otro factor tremendamente determinante para poder entender las diferencias en cuanto a la entrada en producción en los seis digestores es el hecho de que el proceso de codigestión anaerobia no comenzase al mismo tiempo. Esto se debió a que, hubo que negociar con seis familias distintas, unido al hecho de que los propios tesisistas tuvieron que encargarse de la supervisión y/o construcción de la mayoría de casetas, así como de la instalación y carga de los propios digestores. Esto supuso que el proceso de codigestión anaeróbica comenzase antes en unas repeticiones que, en otras, lo que hizo que los primeros digestores en ser cargados estuviesen sujetos a condiciones climáticas más adversas. Esto se evidencia en la pendiente de las repeticiones que tienen menos datos, siendo considerablemente mayor que en los otros casos. En el tratamiento 5 es en el que se más se evidencia este hecho, ya que en la segunda repetición (T5.2) el día 29 se alcanzan porcentajes de metano que en la primera repetición (T5.1) no son alcanzados hasta el día 44 de muestreo.

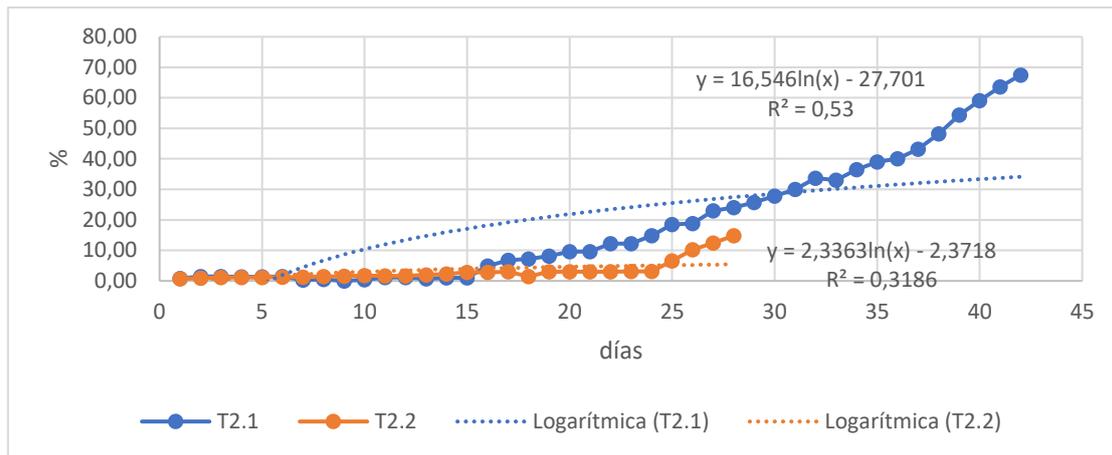


**Figura 21.**

*Porcentaje de CH<sub>4</sub> producido diariamente en los seis digestores en campo.*

*Nota: cuando los digestores llegaban a porcentajes en torno al 60% de producción de CH<sub>4</sub>, se puede decir que ya entraban en fase productiva y ya era posible utilizarlo en las cocinas. Fuente: elaboración propia.*

En el tratamiento 2, tal y como muestra la Figura 22, la primera repetición ha alcanzado mayores niveles de CH<sub>4</sub>. La diferencia existente entre las dos repeticiones se debe principalmente a que T2.1 está ubicado en el digestor que absorbe mayor cantidad de radiación, por lo que los microorganismos involucrados en la codigestión anaerobia ocurrida en este digestor estuvieron sometidos a unas temperaturas mayores, lo que propició que trabajasen a mayor ritmo, permitiendo a T2.1 entrar antes que a T2.2 en la fase metanogénica. Esto se refleja en que la pendiente de T2.1 es mayor que la de T2.2, pero sobre todo en que T2.1 empezó a tener una producción de metano significativa ocho días antes que T2.2.

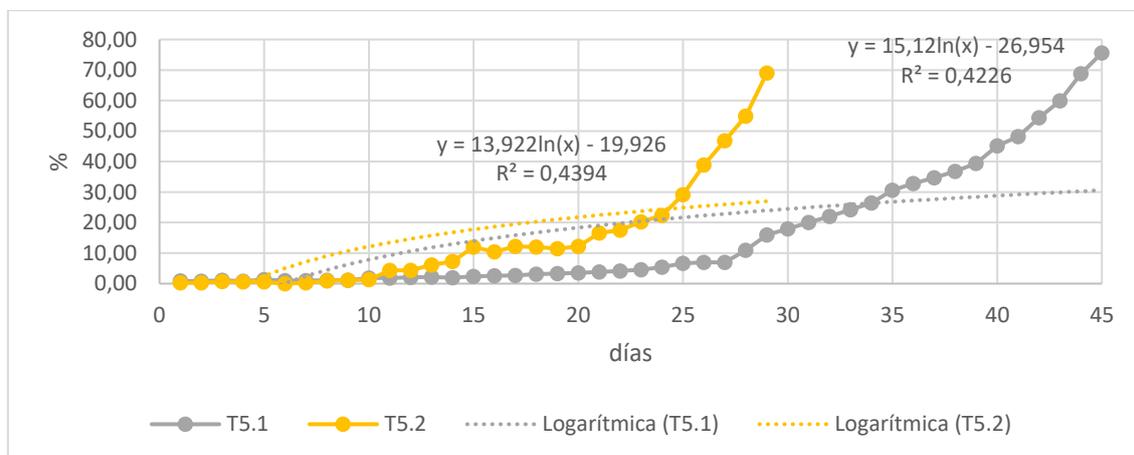


**Figura 22.**

Porcentaje de  $CH_4$  producido diariamente para el tratamiento 2.

*Nota: en este tratamiento se evidencia el problema comentado previamente sobre la diferencia en cuanto a condiciones climáticas existentes entre los distintos digestores, ya que, si bien T2.2 fue cargado más tarde, la cantidad de radiación que absorbe es mucho menor, lo que hace que tengan una diferencia de casi un 10% al cabo de 28 días, en cuanto al porcentaje de  $CH_4$  producido. Fuente: elaboración propia.*

En cuanto al tratamiento 5, las diferencias entre repeticiones son mucho más significativas que en el caso anterior. Como muestra la Figura 23, el T5.2 ha tenido una producción de metano más temprana, así como una pendiente en su mucho más acentuada que la del T5.1. Esto se debe a la gran diferencia en cuanto a las condiciones que han existido en los procesos de digestión anaerobia en las dos repeticiones. El T5.1 fue el primero en ser cargado en los digestores, y, por tanto, fue el que sufrió condiciones climáticas más adversas al estar empezando el proceso de digestión anaerobia mucho más alejado del verano que en el resto de repeticiones.

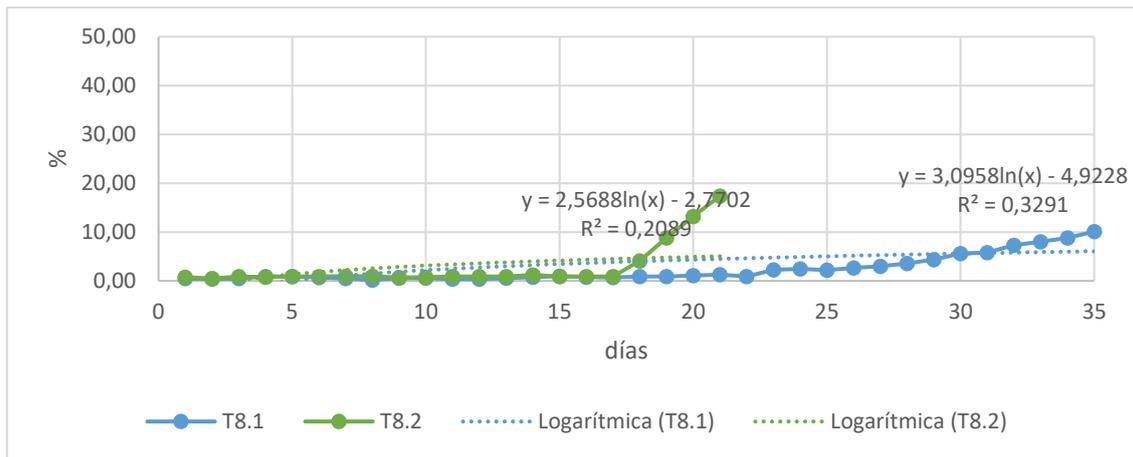


**Figura 23.**

Porcentaje de  $CH_4$  producido diariamente para el tratamiento 5.

*Nota: en este tratamiento afectó el otro problema expuesto al principio de este punto. Fuente: elaboración propia.*

En la Figura 24 puede verse cómo ha sido el comportamiento del último tratamiento para este parámetro. Como resultó evidente en la Figura 21, este tratamiento es el que ha tenido peores resultados. Aun así, vemos como la segunda repetición (T2.8), al haber comenzado el proceso de digestión anaerobia 14 días más tarde, ha estado bajo unas condiciones mejores para el desarrollo de los microorganismos responsables de la producción de  $CH_4$ .



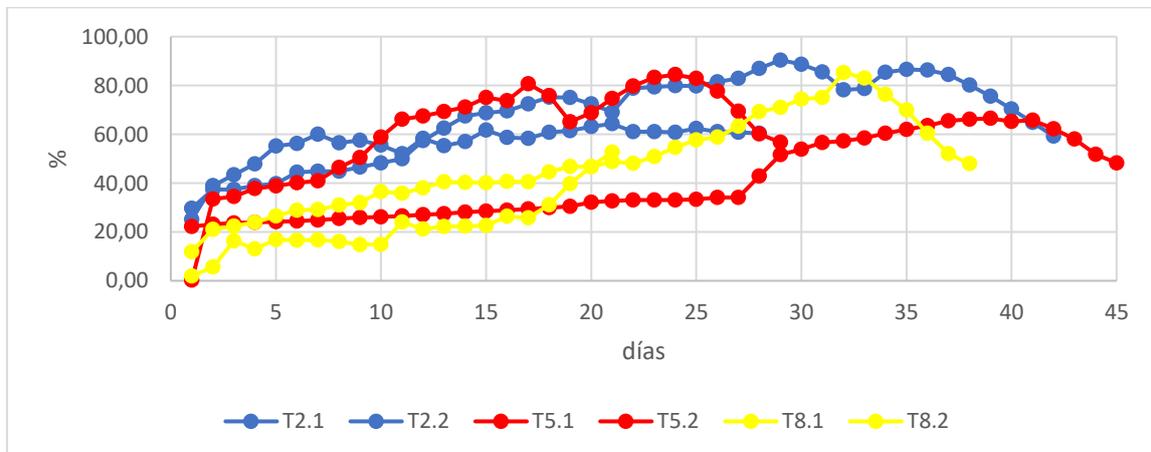
**Figura 24.**

Porcentaje de CH<sub>4</sub> producido diariamente para el tratamiento 8.

*Nota: aún con porcentajes de CH<sub>4</sub> tan bajos en el biogás producido, en ambos digestores prendió, lo que resulta muy interesante en cuanto a su uso y la perduración del proyecto. Fuente: elaboración propia.*

### 5.2.2 Porcentaje diario producido de CO<sub>2</sub>

Tal y como puede apreciarse en la Figura 25, al tercer día todos los tratamientos tuvieron una producción de alrededor del 30%, pero del tercer día en adelante las dos repeticiones del T2, así como T5.2 fueron los que mayor producción de CO<sub>2</sub> mostraron, llegando a alcanzar una producción de alrededor de un 80%. Los otros tres tratamientos mostraron una producción de CO<sub>2</sub> menor pero constante.



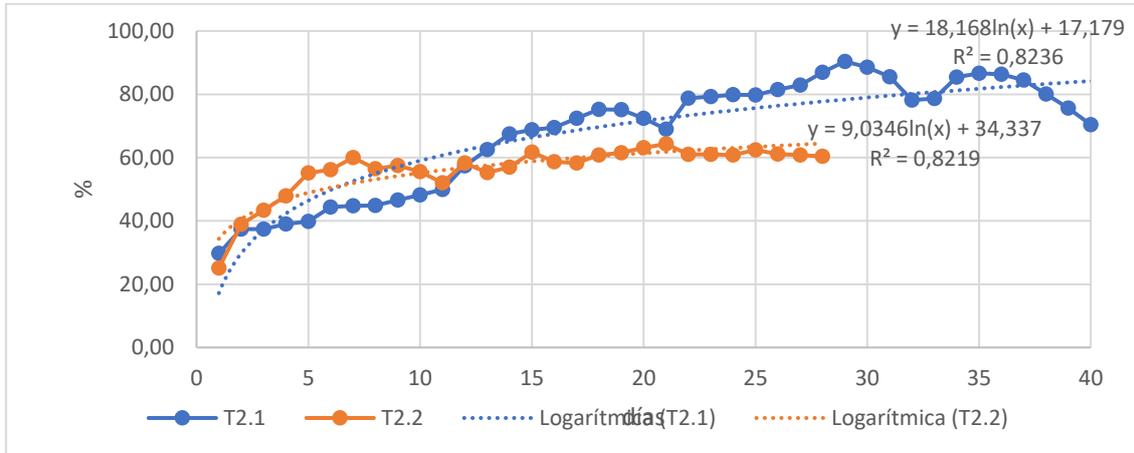
**Figura 25.**

Porcentaje de CO<sub>2</sub> producido diariamente en los seis digestores en campo.

*Nota: como se ha explicado anteriormente, conociendo la evolución en los niveles de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se puede estimar el punto en que se encuentra un digestor en el proceso de digestión anaerobia. Esto se debe a que en las primeras fases el contenido de CO<sub>2</sub> aumenta, pero cuando se llega a la fase metanogénica del proceso, este producto es utilizado como materia prima para la producción de CH<sub>4</sub>, lo que resulta en un descenso en los niveles del primero y un aumento en los del segundo. Fuente: elaboración propia.*

Como se puede observar en la Figura 26, la producción de CO<sub>2</sub> en el T2.1 los primeros días fue reducida, ya que las condiciones climáticas no fueron muy favorables, lo que supuso que la producción de dióxido de carbono fuese aumentando lentamente, hasta llegar a su máximo en el día 29 (90,40%), tras lo que la producción de CO<sub>2</sub> comenzó a descender, dando paso a la producción de CH<sub>4</sub>, como se puede comprobar consultando la Figura 22. En cambio, en el T2,2 si bien en los primeros días el contenido en CO<sub>2</sub> fue mayor que en el T2.1, ya que las condiciones

climáticas fueron más favorables, no siguió un incremento tan marcado como en el de la primera repetición, por lo que tampoco se ha llegado en este digestor a una fase de producción de CH<sub>4</sub> significativa.

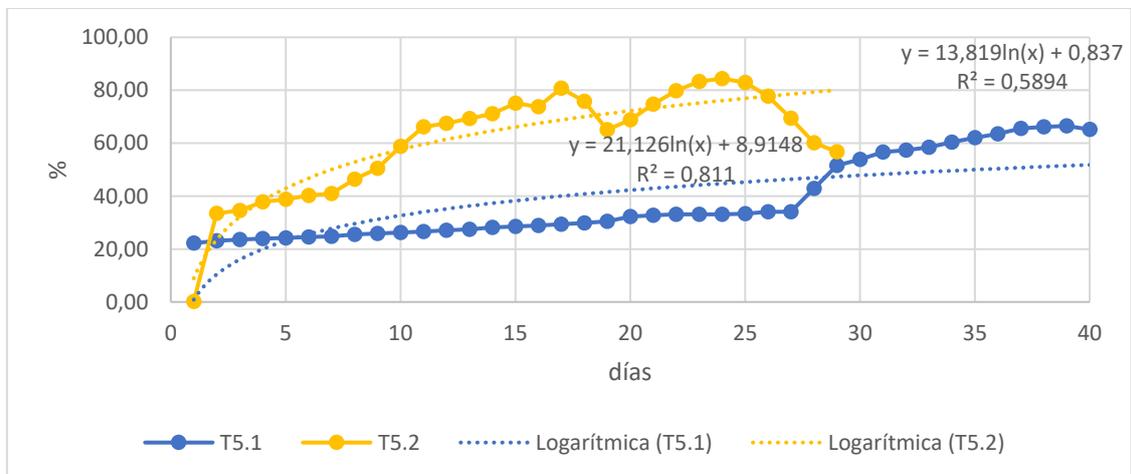


**Figura 26.**

Porcentaje de CO<sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 2.

Nota: comparando este gráfico con el de la Figura 22, se puede confirmar lo comentado previamente en cuanto a la evolución del CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> en este proceso. Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 27, el tratamiento T5.2 tuvo una mayor y más rápida producción de CO<sub>2</sub>, llegando a su pico en el día 25, mientras que en el tratamiento T5.1 la producción de este elemento se dio a un ritmo más lento. De nuevo, comparando esta gráfica con su homóloga en cuanto a la producción de CH<sub>4</sub> (Figura 23), se puede apreciar la relación entre estos compuestos.

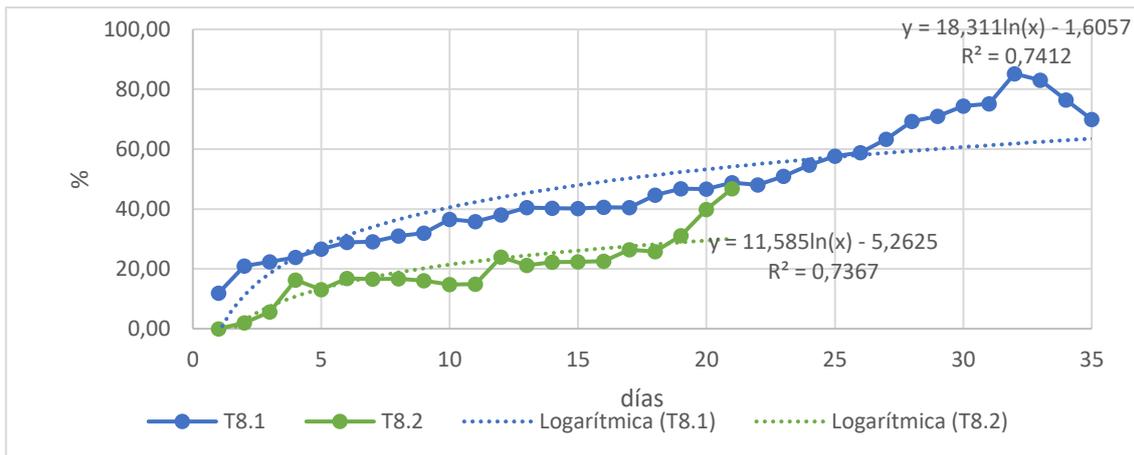


**Figura 27.**

Porcentaje de CO<sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 5.

Nota: las condiciones meteorológicas adversas existentes durante los primeros 15 – 20 días de cargar el digestor con T5.2, propiciaron que la producción de este elemento fuese muy lenta, y que, durante las primeras semanas fuese prácticamente estable. Fuente: elaboración propia.

Como muestra la Figura 28, el T8.1 ha seguido una evolución, en cuanto al CO<sub>2</sub>, esperable en cuanto a entrar en fase productiva de CH<sub>4</sub>. Sin embargo, al no tener unos porcentajes de CH<sub>4</sub> significativos en esta repetición, aún no puede determinarse que este descenso en la proporción de CO<sub>2</sub> existente en el biogás producido sea por una entrada en fases más avanzadas de la digestión anaerobia, o a unas condiciones adversas para el proceso. En el caso de T8.2 ha seguido una evolución similar a lo esperable, apreciándose en los últimos días de toma de datos un aumento significativo en la cantidad de CO<sub>2</sub> producido, lo que augura que el proceso de digestión anaerobia pronto comenzará a producir CH<sub>4</sub> de forma significativa.



**Figura 28.**

*Porcentaje de CO<sub>2</sub> producido diariamente para el tratamiento 8.*

*Nota: el desfase existente en T8.1 en cuanto al porcentaje de CH<sub>4</sub> producido (Figura 24), se puede deber a múltiples causas, desde fugas en alguna de las partes del digestor y/o sus conexiones, hasta microorganismos que compitan con los metanogénicos impidiendo su desarrollo. Fuente: elaboración propia.*

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

En primer lugar, en cuanto a la caracterización de las materias primas es importante considerar que la materia prima a utilizar es preferible que esté completamente seca, por dos razones. La primera por la optimización de tiempo, al ahorrar el pretratamiento de secado, así como en el momento de los análisis (humedad, cenizas y volátiles). La segunda porque estando la materia prima completamente seca tiene una relación C/N mucho más alta.

En segundo lugar, se definieron las condiciones óptimas de la digestión anaerobia combinando los residuos agropecuarios en 9 tratamientos distintos. Siendo para un TRH de 20 días y una temperatura constante de 35°C, el máximo de biogás acumulado obtenido el del tratamiento T5 con 589,82 mL, seguido por el tratamiento T2 que alcanzó 522,79 mL y, por último, el T5 que obtuvo 546,77 mL. Este biogás tuvo niveles muy similares en cuanto a CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub>, estabilizándose el primero entorno al 50 % y el segundo al 60 %.

Cabe destacar que, al momento de realizar las mediciones de algunos parámetros, hubo ciertos problemas con las lecturas. En el caso de la presión, el problema fue que las sondas disponibles solo median con precisión de tres decimales hasta un límite de 1,2 bares, por lo tanto, pasado este valor había que utilizar una sonda de 100 bares que media los valores con un solo decimal. Esto dificultó enormemente poder evaluar los tratamientos en función de este parámetro, teniéndose que utilizar métodos de estimación de decimales. Por último, cuando los volúmenes de biogás producidos son muy pequeños (en torno a 15 mL), supone un caudal de entrada insuficiente para que el GEA 500 pueda dar lecturas que se ajustasen a lo esperado. Por tanto, se recomienda utilizar aparatos diseñados netamente para este tipo de análisis que se ajusten a las necesidades de la investigación.

Sin embargo, al replicar las experiencias con los mejores tratamientos en campo, la situación cambió considerablemente. Fue evidente que al modificar los parámetros óptimos de funcionamiento se ralentiza el proceso de la digestión anaerobia en los biodigestores, alcanzándose valores similares de producción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en un tiempo más de 10 veces mayor, lo que evidencia una actividad mucho más lenta de las bacterias involucradas en las distintas etapas de la codigestión anaerobia. Aun así, aunque ocurre más despacio, la digestión anaerobia a más de 3.200 msnm queda probada como una forma eficiente de obtención de energía a partir de materia orgánica, y en el caso concreto de este estudio, de residuos agropecuarios. Si bien

gracias a la bibliografía ya era conocido que tanto el estiércol de vaca, como la paja de cebada y los restos de maíz son buenos materiales para la producción de biogás, gracias a este proyecto de investigación queda probado que el lactosuero también es un buen producto para la producción de biogás mediante el proceso de codigestión anaerobia.

Por último, para resumir los datos obtenidos en función de cada tratamiento, el tratamiento 8 tuvo rendimientos de CH<sub>4</sub> considerablemente menores a los de los tratamientos 2 y 5. Entre los tratamientos 2 y 5 es más complicado discernir cuál ha tenido mayor éxito, ya que la primera repetición del tratamiento 2 (T2.1) ha tenido una mayor proporción de CH<sub>4</sub> en el biogás producido que el T5.1. Sin embargo, T5.2 presenta una concentración de CH<sub>4</sub> mucho mayor que cualquiera de las repeticiones del tratamiento. Por todo ello, aún con lo explicado anteriormente sobre las diferentes condiciones que han existido en los digestores, y, por tanto, lo complicado de compararlas entre sí, se puede concluir que el tratamiento 5 es el que ha tenido mejores resultados en cuanto a la producción de CH<sub>4</sub>. Una última consideración en cuanto a la parte de campo de este trabajo, es que se utilizaron biodigestores en forma de cojín lo que complicó la manipulación y carga. Además, el material utilizado (HDPE) era muy rígido y se rompía con facilidad, ocasionando fugas durante la producción de biogás. Por tal motivo se recomienda utilizar biodigestores de forma cilíndrica y de materiales flexibles y manipulables.

Para concluir, este trabajo prueba que la producción de biogás con características suficientes como para poder ser utilizado en cocinas, en zonas rurales andinas o de alta montaña, es una alternativa energética viable. Además, el hecho de producir esta energía mediante residuos agropecuarios, supone una valorización de los mismos mediante un proceso de digestión anaerobia, lo que la convierte en una alternativa a tener en cuenta debido al impacto tan positivo que genera en el medio. Por último, cabe destacar el carácter social que esta forma de obtener energía, ya que dota a zonas rurales alejadas de las zonas urbanas de mayor independencia energética, y por tanto, de una forma de desarrollo propio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi, Tasneem, Tauseef, S., & Abbasi, S. (2012). Biogas Energy. In Springer (Ed.), *SpringerBriefs in Environmental Science*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1040-9>
- Babae, Azadeh & Shayegan, Jalal (2011). Effect of Organic Loading Rates (OLR) on Production of Methane from Anaerobic Digestion of Vegetables Waste. *World Renewable Energy Congress*, 57, 411–417. <https://doi.org/10.3384/ecp11057411>
- Comino, Elena, Rosso, Maurizio & Riggio, Vincenzo (2010). Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*, 101(9), 3013–3019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.025>
- Córdoba, Verónica (2016). *Estudio de la cinética de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos y agroindustriales*. Universidad Nacional de San Martín.
- Córdoba, Verónica, Fernández, Mónica & Santalla, Estela (2018). The effect of substrate/inoculum ratio on the kinetics of methane production in swine wastewater anaerobic digestion. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21308–21317. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0039-6>
- Flotats, X., Campos, E. & Bonmatí, X. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y co-digestión con residuos de la industria alimentaria. *Monografías de Actualidad*, 65, 51–65.
- Garfí, Marianna, Martí Herrero, Jaime, Garwood, Anna & Ferrer, Ivet (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599–614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
- Gu, Juan, Liu, Rui, Cheng, Yi, Stanislavljevic, Nemanja, Li, Lei, Djatkov, Djordje & Wang, Xuya (2020). Anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge under mesophilic and thermophilic conditions: Focusing on synergistic effects on methane production. *Bioresource Technology*, 301(November 2019), 122765. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122765>
- Guo, Hai-Gang, Chen, Qing-Lin, Hu, Hang-Wei, & He, Ji-Zheng (2020). High-solid anaerobic co-digestion of pig manure with lignite promotes methane production. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120695>
- Jeong, Tae-Young, Cha, Gi-Cheol, Choi, Suk-Soon, & Jeon, Choong (2007). Evaluation of methane production by the thermal pretreatment of waste activated sludge in an anaerobic digester. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 856–863.
- Kapoor, Rimika, Ghosh, Pooja, Kumar, Madan, Sengupta, Subhanjan, Gupta, Asmita, Kumar, Smita S. & Pant, Deepak (2020). Valorization of agricultural waste for biogas based circular economy in India: A research outlook. *Bioresource Technology*, 304(December 2019), 123036. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123036>
- Labatut, Rodrigo A. & Pronto, Jennifer L. (2018). Sustainable waste-to-energy technologies: Anaerobic digestion. In *Sustainable Food Waste-to-Energy Systems*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811157-4.00004-8>
- Lytras, George, Lytras, Chris, Mathioudakis, Dimitrios, Papadopoulou, Konstantina & Lyberatos, Gerasimos (2021). Food Waste Valorization Based on Anaerobic Digestion. *Waste and Biomass Valorization*, 12(4), 1677–1697. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01108-z>
- Meneses Quelal, Orlando, Velázquez Martí, Borja, Gaibor Chávez, Juan & Niño Ruiz, Zulay (2021).

- Effect of the co-digestion of agricultural lignocellulosic residues with manure from South American camelids. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(2), 525–544. <https://doi.org/10.1002/bbb.2177>
- Nagao, Norio, Tajima, Nobuyuki, Kawai, Minako, Niwa, Chiaki, Kurosawa, Norio, Matsuyama, Tatsushi, Yusoff, Fatimah Md. & Toda, Tatsuki (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 118, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.045>
- Navarro, Natalia (2017). Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia. *Facultad de Ciencias Forestales y de La Conservación de La Naturaleza*, 72.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Ramírez, Valeria, Martí Herrero, Jaime, Romero, Michelle & Rivadeneira, Daniel (2019). Energy use of Jatropha oil extraction wastes: Pellets from biochar and Jatropha shell blends. *Journal of Cleaner Production*, 215, 1095–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.132>
- Ramos, Fernando Daniel & Villar, Marcelo Armando (2016). *¿De qué se trata? ¿Qué son los biocombustibles y qué lugar ocupan en el panorama energético argentino y mundial?* 69–73.
- Sanabria, C. (2018). Biodigestores de escala a 50 litros, una solución para la producción de gas, abono y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. *Tesis*, 25.
- UNE-EN 15104. (2011). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno.*
- UNE-EN ISO 18123. (2016). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil.*
- UNE-EN ISO 1822. (2016). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en ceniza.*
- UNE -EN ISO 18134-3. (2016). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.*
- Varsha, S. S. V., Soomro, Abdul F., Baig, Zenab T., Vuppaladadiyam, Arun K., Murugavelh, S., & Antunes, Elsa (2020). Methane production from anaerobic mono- and co-digestion of kitchen waste and sewage sludge: synergy study on cumulative methane production and biodegradability. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00884-x>
- Velázquez Martí, Borja, Meneses Quelal, Orlando, Gaibor Chávez, Juan & Niño Ruiz, Zulay (2016). Review of Mathematical Models for the Anaerobic Digestion Process. *IntechOpen*, 13. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80815>
- Villavicencio Mora, Mario Iván & Ruiz Cedeño, Monserrate (2019). Efecto de eliminar subsidio al gas para uso doméstico en el Ecuador. *RECUS*, 4(3), 29–34.
- Ziemiński, Krzysztof & Frac, Magdalena (2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 11(18), 4127–4139. <https://doi.org/10.5897/ajbx11.054>