



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

Grado en Ingeniería Química Industrial

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

Trabajo Fin de Grado

**APORTACIÓN AL MIX ENERGÉTICO DE RESIDUOS
SANDACH VÍA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN LA ISLA DE
TENERIFE**

Autor: Mora Hernández, Daniel

Tutores: Escalante Ayala, Douglas Jimmy

Pérez Remedios, José Aythami

San Cristóbal de La Laguna, Julio 2024

Daniel Mora Hernández

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a D. José Aythami Pérez Remedios por su invaluable apoyo, atención, orientación y paciencia durante todo el proceso de este trabajo. Su experiencia y consejos han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

También quiero agradecer a D. Douglas J. Escalante Ayala por aceptarme y guiar en este proyecto fin de carrera.

Quiero agradecer profundamente a mi familia, especialmente a mis padres, quienes no tuvieron la oportunidad de estudiar, pero han trabajado día y noche para que yo pudiera seguir mi sueño de ser ingeniero. Su sacrificio y apoyo incondicional han sido la base de mi éxito.

Finalmente, quiero agradecer el apoyo de mis amigos durante toda mi trayectoria universitaria. La compañía, ánimo y comprensión de todos ellos han sido esenciales para alcanzar esta meta.

Daniel Mora Hernández

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. Cambio Climático en España. | 3 |
| 1.2. Dependencia Energética de España. | 4 |
| 1.3. Las energías renovables como alternativa sostenible. | 5 |
| 1.4. Bioenergía..... | 7 |
| 1.4.1. Biocombustibles | 7 |
| 1.4.2. Clasificación de los biocombustibles | 8 |
| 1.4.3. Biogás | 9 |
| 1.5. El biogás en España..... | 10 |
| 1.5.1. Situación del biogás en Canarias. | 11 |
| 1.6. Fundamentos de la digestión anaerobia..... | 13 |
| 1.6.1. Fases de la digestión..... | 13 |
| 1.6.1.1. Etapa hidrolítica..... | 14 |
| 1.6.1.2. Etapa acidogénica. | 15 |
| 1.6.1.3. Etapa acetogénica. | 15 |
| 1.6.1.4. Etapa metanogénica..... | 15 |
| 1.6.2. Parámetros de operación y control. | 16 |
| 1.6.2.1. Temperatura..... | 16 |
| 1.6.2.2. <i>pH</i> | 17 |
| 1.6.2.3. Relación carbono/nitrógeno (<i>C/N</i>) | 18 |
| 1.6.2.4. Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad..... | 19 |
| 1.6.2.5. Agitación. | 20 |
| 1.6.3. La tecnología de la co-digestión anaerobia. | 20 |
| 2. OBJETIVOS..... | 22 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| 3.1. Materias primas. | 23 |
| 3.2. Material de laboratorio. | 24 |
| 3.3. Instalación experimental..... | 24 |
| 3.4. Preparación de la materia prima | 26 |
| 3.4.1. Preparación de los reactores. | 26 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.4.2. | Montaje de reactor para digestión anaerobia en una etapa. | 27 |
| 3.4.3. | Montaje de reactor para digestión anaerobia en dos etapas. | 28 |
| 3.5. | Análisis de la composición de gas. | 28 |
| 3.6. | Análisis de la composición en sólidos volátiles, sólidos totales y sólidos fijos. | 30 |
| 3.7. | Análisis elemental. | 31 |
| 3.8. | Determinación ácidos grasos volátiles (AGV). | 32 |
| 3.9. | Determinación de la alcalinidad total (AT), alcalinidad parcial (AP) y alcalinidad intermedia (AI). | 33 |
| 3.10. | Estimación energética a partir de los residuos SANDACH utilizados. | 33 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN. | 35 |
| 4.1. | Estudio de la ganadería en Tenerife y cuantificación de residuos. | 35 |
| 4.2. | Producción de gas en las muestras analizadas. | 38 |
| 4.2.1. | Composición en CH_4 del gas producido por las muestras analizadas. | 40 |
| 4.2.2. | Composición en H_2 del gas producido por las muestras analizadas. | 41 |
| 4.3. | Comportamiento del pH | 41 |
| 4.4. | Análisis de las alcalinidades y la concentración de ácidos grasos volátiles. | 44 |
| 4.5. | Análisis del contenido en sólidos de los experimentos realizados. | 45 |
| 4.6. | Análisis elemental de los experimentos realizados. | 46 |
| 4.7. | Estimación de la generación energética a partir de SANDACH producidos en la isla de Tenerife. | 47 |
| 5. | CONCLUSIONES. | 49 |
| 5.1. | Conclusiones. | 49 |
| 5.2. | Conclusions. | 50 |
| 6. | RECOMENDACIONES. | 51 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA. | 53 |

RESUMEN

La isla de Tenerife enfrenta una problemática medioambiental significativa en relación con la gestión de residuos SANDACH (Subproductos Animales No Destinados al Consumo Humano). Estos residuos, generados principalmente por la industria agroalimentaria y ganadera, no reciben un tratamiento adecuado, lo que genera preocupaciones ambientales y de salud pública. La gestión ineficaz de los residuos SANDACH contribuye a la contaminación del suelo y del agua, incrementa el riesgo de transmisión de enfermedades de animales hacia las personas, emite gases de efecto invernadero y provoca olores desagradables que afectan la calidad de vida de los residentes y visitantes de la isla.

La implementación de la digestión anaerobia para el tratamiento de residuos SANDACH en Tenerife no solo mejoraría la gestión de estos residuos, sino que también contribuiría al mix energético de la isla apostando por la diversificación de fuentes de energías renovables. Al producir biogás mediante un proceso biológico en ausencia de oxígeno, se reduciría la dependencia de combustibles fósiles, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzando hacia una mayor sostenibilidad energética.

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo evaluar el potencial de los flujos de residuos SANDACH disponibles en Tenerife y optimizar las condiciones del proceso de digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás. Para ello, se realizarán una serie de ensayos experimentales en los que se analizará la influencia de diversos parámetros, con el fin de identificar indicadores fiables del potencial de estos residuos. Las muestras de SANDACH generadas en la isla, así como sus combinaciones, serán sometidas a digestión anaerobia en discontinuo bajo condiciones mesofílicas. Se determinará la producción de gas y su composición en CH_4 . Además, se analizarán el contenido de sólidos, la concentración de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad para conocer el comportamiento de la digestión con el transcurso de los días.

Daniel Mora Hernández

ABSTRACT

The island of Tenerife faces a significant environmental problem in relation to SANDACH waste management (Animal by-products Not Intended for Human Consumption). This waste, generated mainly by the agri-food and livestock industry, does not receive adequate treatment, which generates environmental and public health concerns. The ineffective management of SANDACH waste contributes to soil and water pollution, increases the risk of transmitting diseases from animals to people, emits greenhouse gases and causes unpleasant odors that affect the quality of life of residents and visitors to the island.

The implementation of anaerobic digestion for the treatment of SANDACH waste in Tenerife would not only improve the management of this waste but would also contribute to the island's energy mix by promoting the diversification of renewable energy sources. By producing biogas through a biological process in the absence of oxygen, dependence on fossil fuels would be reduced, decreasing greenhouse gas emissions and moving towards greater energy sustainability.

This Final Degree Work aims to evaluate the potential of the SANDACH waste flows available in Tenerife and optimize the conditions of the anaerobic digestion process to maximize the production of biogas. To do this, a series of experimental tests will be carried out in which the influence of various parameters will be analyzed, to identify reliable indicators of the potential of these residues. SANDACH samples generated on the island, as well as their combinations, will be subjected to discontinuous anaerobic digestion under mesophilic conditions. The production of gas and its composition in CH_4 will be determined. In addition, the content of solids, the concentration of volatile fatty acids and alkalinity will be analyzed to know the behavior of digestion over the course of the days.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Cambio Climático en España.

España enfrenta una serie de desafíos significativos debido al cambio climático, evidenciado por un aumento progresivo en las temperaturas medias y un calentamiento más acusado durante los meses de verano en comparación con el invierno. Este fenómeno se acentúa aún más en el interior que en las costas e islas, lo que contribuye a una mayor frecuencia de anomalías térmicas, especialmente durante el verano. Los modelos climáticos aplicados a la península ibérica anticipan un agravamiento de estas condiciones y sugieren un aumento en la irregularidad climática a futuro. Esto plantea serias preocupaciones sobre la adaptabilidad y la resiliencia de las regiones afectadas (Cantos, J., 2009).

Además, los efectos del cambio climático no se limitan sólo a la temperatura, sino que también incluyen alteraciones significativas en los patrones pluviométricos. Se espera un aumento en la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, como inundaciones, sequías y olas de calor, lo cual incrementará los riesgos y la peligrosidad asociada a estos fenómenos. La reducción en la disponibilidad de agua, un recurso ya escaso, se ve agravada por este cambio en los patrones de precipitación, lo que impacta directamente en la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la vida cotidiana de la población (Cantos et al., 2016).

Estas anomalías están marcadas principalmente por la acumulación de grandes concentraciones de gases de efecto invernadero, CO_2 , CH_4 y NO_x , en la atmósfera. Estos gases, concentrados en exceso en la atmósfera, atrapan el calor emitido por la Tierra, aumentando la temperatura promedio del planeta y dando lugar al calentamiento global. Los procesos naturales, pero sobre todo la actividad humana son los principales provocadores de estos gases. La quema de combustibles como el petróleo para el uso del transporte, el uso de gas natural para la calefacción o la generación de electricidad, la agricultura, la ganadería, las industrias o la acumulación de residuos en los vertederos son actividades que se caracterizan por generar los gases mencionados anteriormente. Las grandes masas forestales y los océanos son conocidos como sumideros de CO_2 , capaces de retirar el CO_2 de la atmósfera y almacenarlo en su interior. Sin embargo, las actividades antropogénicas relacionadas con la deforestación y la emisión de aguas residuales a través de emisarios hacia el mar afectan negativamente a la degradación de los suelos y a la acción que desempeñan los sumideros, siendo únicamente capaces de almacenar aproximadamente la mitad del CO_2 que hay en la atmósfera.

Daniel Mora Hernández

En respuesta a estos desafíos, España ha implementado medidas de adaptación y mitigación, como el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) iniciado en 2006. Este plan busca desarrollar escenarios climáticos regionales y evaluar los impactos y la adaptabilidad a través de diferentes sectores (Cantos et al., 1970). Aunque se han logrado avances, la magnitud del cambio climático exige una acción continua y coordinada a nivel nacional e internacional para minimizar los riesgos y maximizar la resiliencia frente a este fenómeno global.

1.2. Dependencia Energética de España.

España presenta una alta dependencia de energía importada, especialmente de combustibles fósiles. En 2019, tal y como se recoge en la Figura 1.1, el país dependía en gran medida del petróleo y el gas natural, con un porcentaje que supera el 80% para estos productos energéticos provenientes de terceros países (Balteanu et al., 2023). Esta dependencia es significativamente más alta en comparación con otros países de la Unión Europea, donde la media se sitúa en torno al 55% (Jiménez et al., 2020). La alta dependencia de España se debe, en parte, a la falta de recursos energéticos en su geografía, lo que la obliga a importar una gran parte de su energía (Segura et al., 2021).

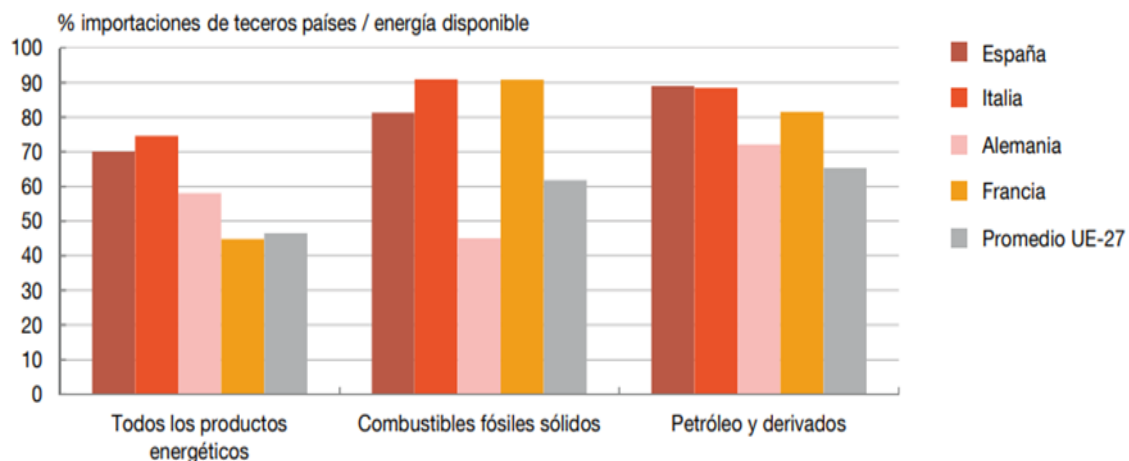


Figura 1.1. “Importaciones de productos energéticos de terceros países en 2019”
(Balteanu, 2023)

El consumo energético de España está relacionado con el tamaño de la población y su nivel de desarrollo económico. En 2022, España alcanzó una población de 47,78 millones tal como se puede observar en la Figura 1.2, caracterizada con altos estándares de vida y una economía diversificada por lo que requiere una cantidad significativa de energía para cubrir sus necesidades de electricidad, calefacción, transporte y otros usos. La dependencia energética de

España se ve influenciada por la cantidad de energía que su población consume por persona. Por tanto, la relación proporcional entre la población y el consumo de energía se traduce en una mayor generación de gases de efecto invernadero.

En respuesta a esta vulnerabilidad, España ha tomado medidas para reducir su dependencia mediante la promoción de las energías renovables. Desde los años noventa, ha habido un esfuerzo significativo para aumentar la producción de energías renovables como la eólica y la solar, que son más sostenibles y pueden ser producidas localmente, aportando positivamente a la matriz energética del país (Jiménez et al., 2020). Sin embargo, la falta de competitividad por parte de las fuentes renovables frente a las fuentes convencionales ha supuesto un desafío difícil que ha hecho que el crecimiento de las energías renovables sea lento.

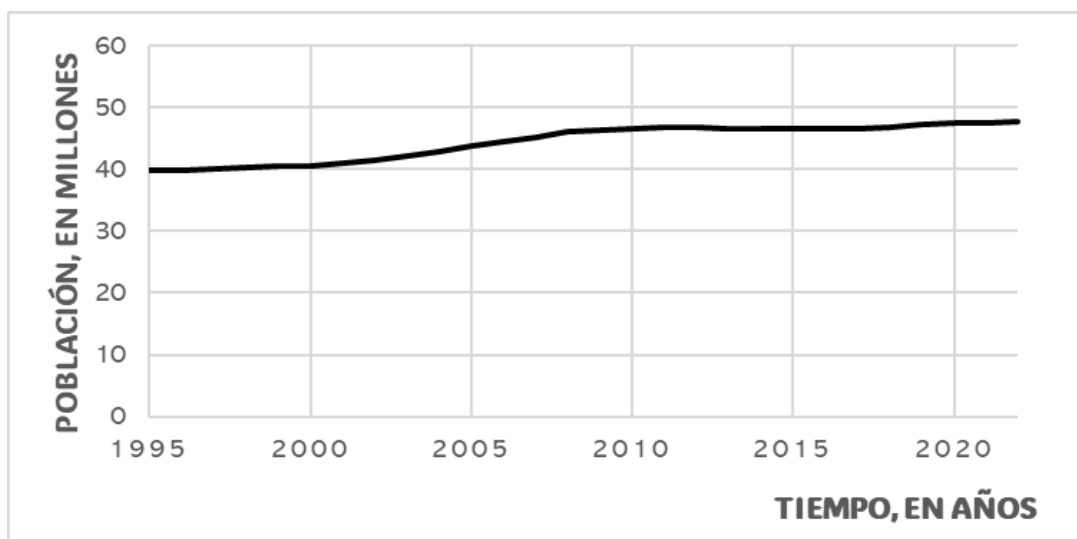


Figura 1.2. “Evolución de la población española desde 1995 hasta 2022” (Banco Mundial, 2023)

1.3. Las energías renovables como alternativa sostenible.

A pesar de esta dependencia, el año 2022 también mostró avances en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. España ha realizado esfuerzos significativos para aumentar la participación de las energías renovables en su mix energético, alcanzando un porcentaje importante de producción eléctrica a partir de fuentes renovables.

En 2022, la aportación de las energías renovables al consumo de energía primaria supuso un 15,6% del total, tal y como se recoge en la Figura 1.3. Tanto los productos petrolíferos como el gas natural son las principales fuentes convencionales para la obtención de energía, con

Daniel Mora Hernández

aproximadamente un 70% (ver Figura 1.3). No obstante, el valor de porcentaje del carbón refleja un pequeño paso a la sostenibilidad, con el objetivo puesto en la obtención de energías limpias.

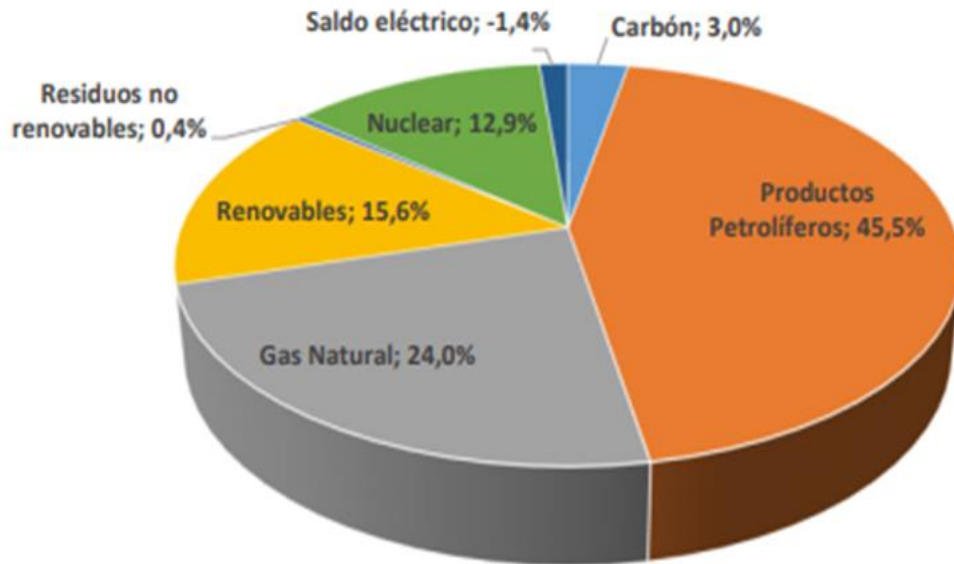


Figura 1.3. “Desglose del consumo de energía primaria en España 2022” (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

Como se indica en la Tabla 1.1, la energía eólica, la solar fotovoltaica y la energía del mar han aumentado su contribución al consumo de energía primaria a través de tecnologías renovables gracias a la instalación de nuevas infraestructuras en toda la geografía nacional. Sin embargo, la hidráulica y la solar térmica han experimentado un descenso. La primera se debe por la falta de precipitaciones en la geografía peninsular e insular, siendo considerado uno de los años más secos y cálidos, y la segunda con la disminución de horas de radiación solar anuales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

| Tecnología | $\Delta 2022/2021$ |
|--------------------------|--------------------|
| Hidráulica | -40,6 |
| Eólica | +1,2 |
| Solar fotovoltaica | +42,3 |
| Solar Térmica | -9,5 |
| Energía del mar | +21,1 |
| Geotérmica | 0 |
| Biomasa | +0,4 |
| Biogases | +2,3 |
| Residuos Sólidos Urbanos | +0,3 |
| Biocombustibles | -3,2 |

Tabla 1.1. “Consumo de energía primaria en España en 2021-2022 por tecnología renovable” (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

El uso de la biomasa para la obtención de combustibles semejantes a combustibles fósiles experimentó un pequeño aumento, marcado principalmente por la producción de biogás, aprovechando los residuos que genera el país. Sin embargo, en los biocombustibles se refleja una reducción. Esta reducción se debe a la vuelta a la normalidad del transporte y la aviación después de las restricciones del COVID19 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

1.4. Bioenergía

La bioenergía se deriva de materiales biológicos y es una de las formas más prometedoras y sostenibles de energía renovable. Las fuentes de bioenergía incluyen una amplia gama de materiales orgánicos como restos de plantas, residuos agrícolas y desechos animales. Estos recursos, al ser procesados, generan energía eléctrica y biocombustibles de manera eficiente y sostenible. Esta energía limpia es una gran alternativa para la dependencia de combustibles fósiles tradicionales y contribuir en la disminución de la generación de gases de efecto invernadero (Flórez, 2015).

Una de las ventajas significativas de la bioenergía es su capacidad para contribuir a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. El uso de biomasa, por ejemplo, permite la generación de energía eléctrica y térmica mediante procesos de combustión, gasificación o digestión anaeróbica, adaptándose así a diferentes necesidades y escalas de producción. Este tipo de energía no solo es renovable, sino también capaz de proporcionar un suministro energético constante y controlable, lo cual es vital para la estabilidad de las redes eléctricas (Pinto et al., 2022).

Otro aspecto relevante de la bioenergía es su impacto social y económico. La implementación de tecnologías de bioenergía puede fomentar el desarrollo local al crear empleos en áreas rurales y disminuir la migración hacia zonas urbanas. Además, al utilizar residuos que de otra manera serían desechados en los vertederos, se contribuye a la limpieza y mejora del entorno ambiental (Manrique et al., 2023). Con la implementación de una economía circular se consigue dejar atrás la economía tradicional basada en un esquema lineal “tomar, hacer y desechar” para adoptar un enfoque que maximiza la reutilización, reducción y reciclaje de los recursos.

1.4.1. Biocombustibles

Una de las ventajas significativas de los biocombustibles es que pueden ser producidos localmente en diversas regiones, lo que ayuda a reducir la dependencia de los combustibles

Daniel Mora Hernández

importados y promueve el desarrollo de economías locales. Por ejemplo, el bioetanol se puede obtener de cultivos como maíz, caña de azúcar y sorgo, el biodiésel se produce a partir de aceites vegetales como la canola y la soya, o el biogás se produce a partir de residuos orgánicos, tales como los Subproductos No Destinados Al Consumo Humano (SANDACH) generados en mataderos. Este aspecto no solo fomenta la seguridad energética, sino que también impulsa el desarrollo rural al proporcionar nuevas oportunidades de empleo y mercados para los productos agrícolas.

1.4.2. Clasificación de los biocombustibles

Los biocombustibles se clasifican generalmente en dos grupos: primario y secundario. En el primario se incluye por la naturaleza de la biomasa, mientras que el secundario destaca por el tipo de materia prima y tecnología utilizada.

Los biocombustibles primarios son aquellos que se producen a partir de la biomasa, sin necesidad del uso de tecnologías de refinamiento. En la Tabla 1.2 se muestran algunos de los principales biocombustibles según su naturaleza:

| Biocombustibles Primarios | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| Sólidos | Leña, carbón, pellets de madera. |
| Líquidos | Bioetanol, biodiesel, bioaceites. |
| Gaseosos | Biogás, biometano, biohidrógeno. |

Tabla 1.2. “Tipos de biocombustibles primarios” (Flórez, 2015).

Sin embargo, los biocombustibles secundarios destacan por el uso de tecnologías basadas en refinamientos complejos, lo que supone un mayor coste para la instalación de este tipo de infraestructuras, formados por tres generaciones:

Los biocombustibles de primera generación se producen principalmente a partir de alimentos como el maíz, la caña de azúcar y el aceite de soja, mediante procesos de fermentación y transesterificación (Flórez, 2015).

Los biocombustibles de segunda generación ofrecen ventajas significativas sobre los de primera generación, ya que se fabrican a partir de biomasa lignocelulósica, como residuos agrícolas y forestales, que no compiten directamente con los cultivos alimentarios. Esto aumenta la sostenibilidad del proceso al utilizar residuos que de otro modo no tendrían un valor económico significativo (Vargas, R.C., 2013).

Por último, existen los biocombustibles de tercera generación, que se obtienen a partir de algas. Estos biocombustibles están todavía en gran medida en fase de investigación y desarrollo. Las algas pueden producir cantidades significativas de aceites biodegradables en un espacio pequeño y con un ciclo de crecimiento rápido, lo que potencialmente puede conducir a rendimientos energéticos mucho más altos en comparación con las materias primas tradicionales (Goldraj, A., 2023).

1.4.3. Biogás

La obtención del biogás se lleva a cabo mediante un proceso conocido como digestión anaeróbica, que implica la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso se realiza generalmente en cuatro etapas bajo unas condiciones óptimas de *pH* y temperatura: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Durante la hidrólisis, las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica en moléculas más pequeñas. Posteriormente, en la acidogénesis y la acetogénesis, se convierten en ácidos y finalmente en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) durante la metanogénesis (Veana et al., 2019).

El biogás producido es principalmente una mezcla de metano y dióxido de carbono, pero también puede contener otros componentes como monóxido de carbono, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Estos componentes pueden variar dependiendo de la composición del material orgánico que se utilice y las condiciones específicas del proceso de digestión anaeróbica. La calidad y la composición del biogás son cruciales para determinar su potencial de uso y la necesidad de procesos de purificación adicionales antes de su utilización (Veana et al., 2019). Dicho esto, para que el gas sea considerado biogás su contenido debe ser el siguiente (ver Tabla 2.3):

| Gas | | Contenido |
|----------------------|--------|---------------|
| Metano | CH_4 | 54,00 – 70,00 |
| Dióxido de carbono | CO_2 | 27,00 – 45,00 |
| Nitrógeno | N_2 | 0,50 – 3,00 |
| Hidrógeno | H_2 | 1,00 – 10,00 |
| Monóxido de carbono | CO | 0,10 |
| Oxígeno | O_2 | 0,10 |
| Sulfuro de hidrógeno | H_2S | 0,15 |

Tabla 2.3. “Composición del biogás” (Lugones, 2001)

La purificación del biogás es esencial para mejorar su calidad y eficiencia energética. Los procesos involucrados en la purificación incluyen la eliminación de dióxido de carbono, sulfuro

Daniel Mora Hernández

de hidrógeno y otros contaminantes. Estos procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos, y su elección depende de factores como la composición del biogás y los requisitos de calidad para su uso final. Los métodos biológicos, por ejemplo, utilizan microorganismos para eliminar el sulfuro de hidrógeno, ofreciendo una alternativa menos contaminante y más sostenible que los métodos químicos (Varnero et al., 2012).

Finalmente, el biogás purificado puede ser utilizado como fuente de energía renovable en diversas aplicaciones, siendo la única energía renovable que se puede utilizar para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica o como carburante. Puede convertirse en electricidad y calor mediante el uso de motores de combustión interna o turbinas, o puede ser actualizado a biometano, que es comparable al gas natural y puede ser inyectado en redes de gas o utilizado como combustible para vehículos. Esta flexibilidad en la aplicación hace del biogás una alternativa atractiva y viable a los combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de una economía circular basada en el aprovechamiento de residuos (Bermeo et al., 2022).

1.5. El biogás en España.

A pesar de su potencial, el biogás enfrenta varios desafíos en España. Uno de los principales retos es la falta de medios necesarios para superar las barreras que presenta este sector. Aunque Europa ha intentado favorecer el sector de la biomasa desde 2005, España no ha contado con los recursos necesarios para superar estos obstáculos, lo que representa una oportunidad perdida desde el punto de vista energético y económico (Marquina et al., 2021). Es crucial que en los futuros planes energéticos nacionales y regionales se consideren medidas adecuadas para aumentar el uso de la biomasa, tanto para usos térmicos como eléctricos, dependiendo de la cadena de valor de cada uno de estos usos.

En Europa, hay alrededor de 19.000 plantas de producción de biogás, de las cuales 725 tienen la capacidad de inyectar biometano en la red de gas debido a su similitud con el gas natural. En España, por otro lado, hay 146 instalaciones de biogás distribuidas en varios sectores, con énfasis en vertederos y estaciones de aguas residuales. De estas, solo una planta puede inyectar biometano en la red de gas, mientras que las demás se utilizan principalmente para autoconsumo.

A pesar del bajo número de instalaciones en España, el potencial para generar biogás es considerable debido a la abundancia de materia prima. Sectores como el ganadero o el agrícola,

las industrias alimentarias y los residuos domésticos generan un elevado número de residuos orgánicos.

Se concluye, por tanto, que España ha dedicado sus recursos económicos a seguir fomentando la dependencia energética de combustibles fósiles. Un claro ejemplo es el gas natural, que presenta unas propiedades similares al biogás, se ha optado por mejorar la red gasista en el territorio peninsular y construir nuevas infraestructuras que permitan el flujo continuo de gas. Si analizamos las propiedades principales de cada uno de los gases mencionados con anterioridad a través de la Tabla 1.4, la densidad y la temperatura de encendido es similar. Hay que destacar que, tras un proceso de purificación del biogás, se alcanza un producto con un poder calorífico igual que el del gas natural.

| Valores | Biogás | Gas Natural | Gas Propano |
|--|--------|-------------|-------------|
| Poder Calorífico (Kwh/m^3) | 7 | 10 | 26 |
| Densidad (t/m^3) | 1,08 | 0,7 | 2,01 |
| Densidad respecto al aire | 0,81 | 0,54 | 1,51 |
| Límite de explosión (% de gas en el aire) | 6 – 12 | 5 - 15 | 2 - 10 |
| Temperatura de encendido | 687 | 650 | 470 |
| Máx. velocidad de encendido en el aire (m/s) | 0,31 | 0,39 | 0,42 |
| Requerimiento teórico de aire (m^3/m^2) | 6,6 | 9,5 | 23,9 |

Tabla 1.4. “Valores energéticos del biogás frente a otras fuentes energéticas” (Gene y Owen, 1986)

1.5.1. Situación del biogás en Canarias.

Debido al carácter insular de las Islas Canarias, la obtención de gas natural no es posible, lo que lleva a depender de fuentes energéticas importadas como los hidrocarburos líquidos o el gas licuado de petróleo (GLP), butano y propano, para satisfacer sus necesidades energéticas. El GLP se importa debido a su funcionalidad y propiedades similares al gas natural. Tenerife y Gran Canaria, en conjunto, son responsables del suministro del 80% del GLP utilizado en las Islas Canarias, tal como se registra en la Figura 1.4.

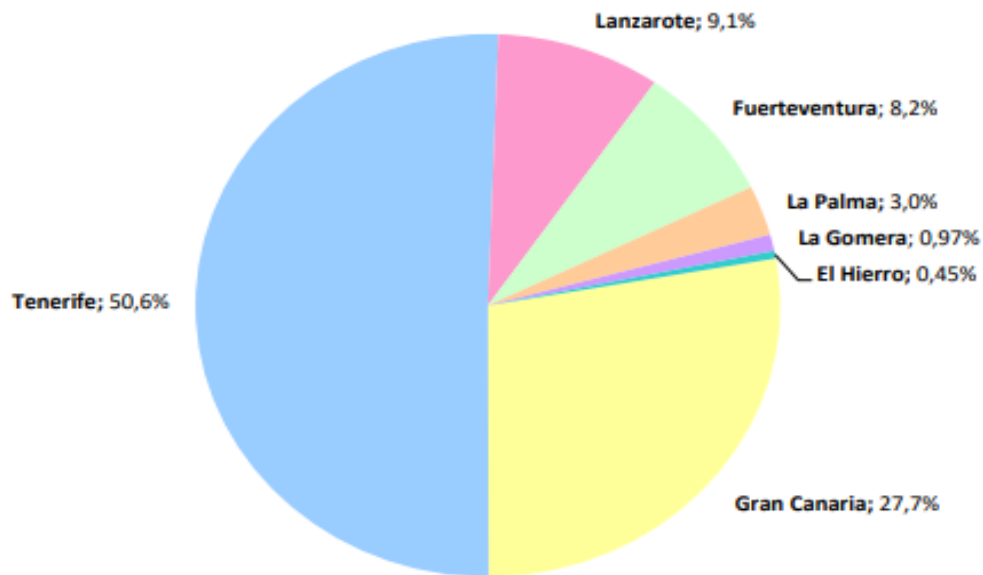


Figura 1.4. “Suministro de GLP en las islas Canarias” (Anuario Energético de Canarias, 2023)

A pesar de estar ubicadas en un archipiélago distante del territorio peninsular, las Islas Canarias tienen el potencial para la producción de biogás y poder eliminar las importaciones de GLP debido a que el biogás posee unas propiedades similares al GLP. A través de sus pequeñas industrias ganaderas y agrícolas, se generan grandes cantidades de residuos orgánicos que actualmente no se están aprovechando energéticamente. Específicamente, la industria cárnica produce una considerable cantidad de subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH), como partes o cuerpos enteros de animales que, por razones de seguridad e higiene alimentaria, no son aptos para el mercado. Actualmente, la isla de La Gomera es la única que cuenta con una planta de producción de biogás, ubicada en su matadero insular, donde se valorizan energéticamente los residuos SANDACH para su propio autoconsumo.

En el resto de las islas, los residuos SANDACH generados por los mataderos se envían a plantas de tratamiento intermedio en Tenerife y Gran Canaria para su reducción e inertización, antes de ser eliminados en complejos ambientales. Anteriormente, hasta el año 2010, estos residuos se transportaban al territorio peninsular para su procesamiento, con los costos de transporte cubiertos por los establecimientos que los generaban. La condición de "Zona Remota" otorgada a las islas permitió que los SANDACH generados pudieran ser eliminados en los complejos ambientales locales, dadas las limitadas alternativas de gestión en todo el archipiélago. Sin embargo, esto ha llevado a la acumulación de residuos en los vertederos, causando contaminación del suelo y del ambiente debido a la generación de toxinas y gases como el metano.

En la actualidad, con las nuevas opciones sostenibles disponibles, es necesario poner fin a estas prácticas y promover la instalación de plantas de biogás. Esto permitiría convertir los residuos orgánicos en una fuente de energía, evitando así su impacto negativo en el medio ambiente. Es crucial adoptar soluciones más ecológicas para asegurar la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

1.6. Fundamentos de la digestión anaerobia

“La digestión anaerobia es la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno produciéndose biogás cuyos componentes mayoritarios son el metano y el dióxido de carbono. La formación de metano no tiene lugar en ambientes donde se encuentran presentes aceptores de electrones como oxígeno, sulfatos o nitratos” (Ward et al., 2008). Esta fermentación consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Este fenómeno se ha destacado como un método altamente eficaz para el tratamiento de una amplia gama de efluentes, entre los cuales se incluyen aguas residuales, lodos de depuradora, residuos de la industria agroalimentaria, etc. En respuesta a esta necesidad, se han desarrollado diversas tecnologías de biometanización para adaptarse a las características específicas de los efluentes tratados, con el fin de simplificar el proceso, minimizar los costos y optimizar la producción de biogás, con el objetivo de obtener un gas con un alto poder calorífico.

1.6.1. Fases de la digestión.

Durante la digestión anaerobia ocurren una serie de reacciones llevadas a cabo por una serie de microorganismos en la que se diferencian cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la Figura 1.5 se recoge la ruta metabólica de la digestión con los microorganismos que intervienen en cada fase.

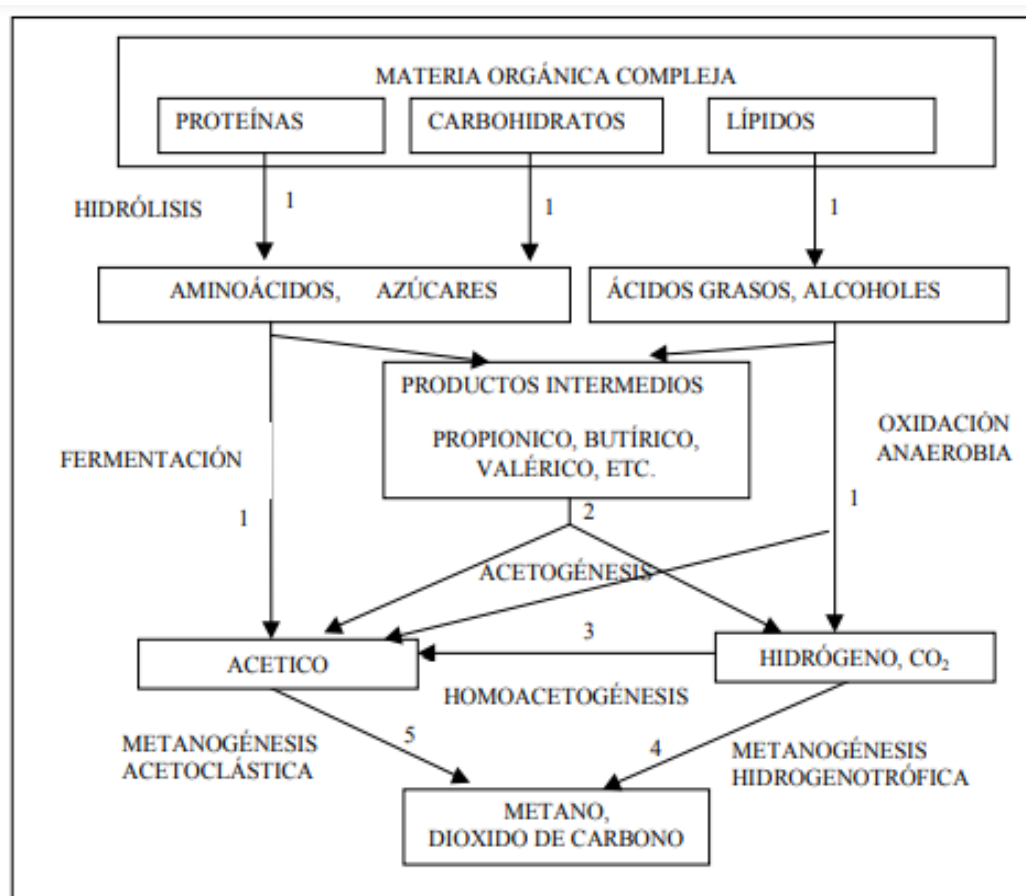


Figura 1.5. “Ruta metabólica del proceso de la digestión anaerobia” (Pavlostathis et al, 1991)

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

1.6.1.1. Etapa hidrolítica.

La hidrólisis es la primera etapa del proceso de digestión anaerobia donde se descomponen las moléculas complejas tales como carbohidratos, proteínas y lípidos, en compuestos más simples y solubles (azúcares, alcoholes, aminoácidos, ácidos grasos, etc....) para que puedan ser utilizados por las bacterias de las siguientes etapas. Este proceso es llevado a cabo por enzimas extracelulares, las cuales poseen características similares a bacterias hidrolíticas (Pavlostathis et al, 1991).

La hidrólisis es una fase que depende de la temperatura y *pH* del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la concentración de NH_4^+ y de la composición del sustrato (Peece, 1983).

1.6.1.2. Etapa acidogénica.

Las moléculas orgánicas solubles que han sido hidrolizadas en la primera etapa ahora son fermentadas por varios microorganismos fermentativos formando compuestos como el ácido acético, fórmico e hidrógeno. Estos compuestos pueden ser utilizados por las bacterias metanogénicas para la producción de metano. Estos microorganismos también generan compuestos orgánicos como el ácido láctico, propiónico, butírico y etanol, que necesitan ser oxidados por bacterias acetogénicas (Pavlostathis et al, 1991).

El hidrógeno desempeña un papel fundamental en esta etapa. Una presión parcial baja de H_2 es un indicador de que no hay acumulación de H_2 en el medio ya que este se elimina mediante oxidación con el CO_2 bajo la acción de las bacterias metanogénicas de manera eficiente, y, por tanto, las bacterias fermentativas pueden seguir desempeñando su labor de degradación. Un aumento en la presión parcial de H_2 indica una mayor concentración de compuestos como el ácido láctico, propiónico y butírico, inhibiendo la acción de las bacterias fermentativas y de las bacterias que intervienen en la etapa siguiente (Boone y Xun, 1987).

1.6.1.3. Etapa acetogénica.

En esta fase, los compuestos como el ácido láctico, propiónico y butírico, que previamente no han podido ser transformados por las bacterias acidogénicas en ácido acético e hidrógeno, ahora sí serán transformados por las bacterias acetogénicas. Estas bacterias destacan por ser consumidores de hidrógeno y dióxido de carbono para transformar los compuestos mencionados anteriormente en ácido acético e hidrógeno (Boone y Xun, 1987).

Por consiguiente, para que la acetogénesis se desarrolle eficientemente en los digestores anaerobios, es necesario que el hidrógeno generado durante este proceso sea consumido a una velocidad equiparable a la de su producción. Esto asegura un equilibrio adecuado en la concentración de hidrógeno, facilitando así el desarrollo óptimo de la acetogénesis dentro del sistema anaerobio.

1.6.1.4. Etapa metanogénica.

En esta última fase se produce la conversión de acetato en metano por las bacterias metanogénicas acetoclástica y la formación de metano a partir del CO_2 y H_2 por las bacterias metanogénicas homoacetogénicas.

Daniel Mora Hernández

Durante este proceso, el acetato se descompone a través de un proceso de descarboxilación, donde el grupo metilo se convierte en metano y dióxido de carbono, sin modificar la estructura molecular del acetato ni afectar la cantidad de H_2 en el gas resultante.

La síntesis de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno juega un papel vital en la gestión del equilibrio redox durante la fermentación en el digestor. Esta acción ayuda a evitar la pérdida de hidrógeno y dióxido de carbono durante el crecimiento microbiano en sustratos con múltiples carbonos, lo que a su vez contribuye significativamente a mejorar la eficiencia termodinámica del proceso (Zeikus, 1979).

Alrededor del 70% del metano producido surge de la descomposición del ácido acético (Gerardi, 2003). Además, una proporción significativa del acetato que contribuye a la generación de metano proviene del ácido propiónico y butírico, representando aproximadamente el 23% del total. Estos resultados destacan la importancia de cómo diferentes sustratos orgánicos interactúan con la actividad microbiana en la formación de metano en sistemas de digestión anaerobia (Zeikus, 1979).

1.6.2. Parámetros de operación y control.

La digestión anaerobia es un proceso que depende de microorganismos, lo que provoca que las condiciones del sistema siempre tienen que estar lo más estables posibles con el objetivo de favorecer el crecimiento de estos para que realicen su actividad, aumentando la eficiencia de cada una de las etapas. Por tanto, es necesario tener un control de los siguientes parámetros:

1.6.2.1. Temperatura

La temperatura es una de las variables más importantes en la degradación de la materia orgánica. Afecta directamente en la cinética de los microorganismos y en la tasa de crecimiento de las bacterias encargadas de la degradación. En el proceso de digestión anaerobia, los microorganismos involucrados muestran una preferencia por ciertos rangos de temperatura, divididos en psicrófilos ($< 20^{\circ}C$), mesófilos ($20 - 40^{\circ}C$) y termófilos ($45 - 70^{\circ}C$). (Wellinger et al, 2013). La Figura 1.6 indica el crecimiento de bacterias metanogénicas según el rango del sistema establecido donde la producción de biogás en el rango psicrófilos son muy bajas, siendo comúnmente las más utilizadas el rango mesofílico y termófilos. Sin embargo, es crucial tener presente que un aumento excesivo de la temperatura puede provocar desequilibrios en la producción de biogás. Esto se debe a que el dióxido de carbono, más soluble

que el metano, tiende a salir del líquido en mayor cantidad a temperaturas elevadas, lo que podría resultar en una proporción desfavorable de gases en el biogás final y, por ende, afectar la eficiencia del proceso. (Batstone, 2006).

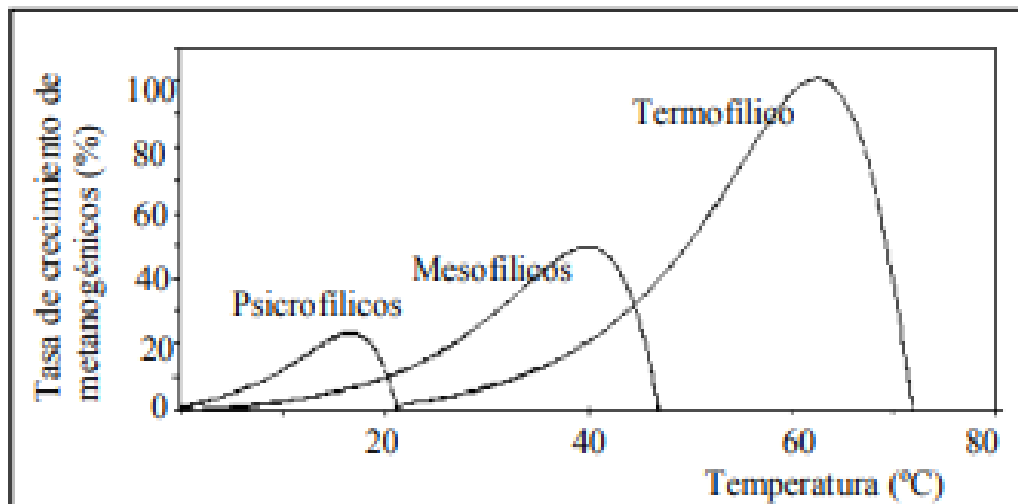


Figura 1.6. "Crecimiento de los microorganismos metanogénicos bajo la influencia de la temperatura" (Van Lier et al., 1993)

1.6.2.2. *pH*

La estabilidad del proceso depende crucialmente de mantener el *pH* en niveles adecuados, al igual que ocurre con la temperatura. Durante las fases iniciales de la digestión, un *pH* entre 5,5 y 6,5 promueve la actividad de las bacterias hidrolíticas y acetogénicas, mientras que un *pH* entre 7,5 y 8,2 favorece a las bacterias metanogénicas. Tanto niveles bajos como altos de *pH* pueden desencadenar respuestas adversas (Varnero, 2013).

Con valores bajos de *pH* se produce una mayor producción de ácido acético e hidrógeno porque la actividad de los microorganismos metanogénicos se ve reducida. Esto provoca un aumento en la presión parcial de hidrógeno provocando la inhibición de los microorganismos acetogénicos. Como consecuencia, la acumulación de los ácidos grasos volátiles (AGV) que no han sido convertidos en ácido acético terminan por inhibir los microorganismos metanogénicos (Franchescolet, 2017).

A niveles de *pH* elevados, hay una mayor producción de amoníaco, afectando al crecimiento de los microorganismos (Franchescolet, 2017).

No obstante, al mantener el *pH* dentro de los rangos óptimos, el proceso se encuentra bajo el control de la alcalinidad del sistema. Esta alcalinidad se origina a partir de la descomposición

Daniel Mora Hernández

de proteínas las cuales poseen un alto porcentaje de nitrógeno, este se convierte en amoníaco que reacciona con el dióxido de carbono formando el bicarbonato de amonio, contribuyendo así al equilibrio del sistema (Franchescolet, 2017).

En la Figura 1.7 se puede ver cómo evoluciona el crecimiento bacteriano en la etapa de la metanogénesis siendo este crecimiento máximo cuando las condiciones del sistema se encuentran en torno a un pH de 7 - 8.

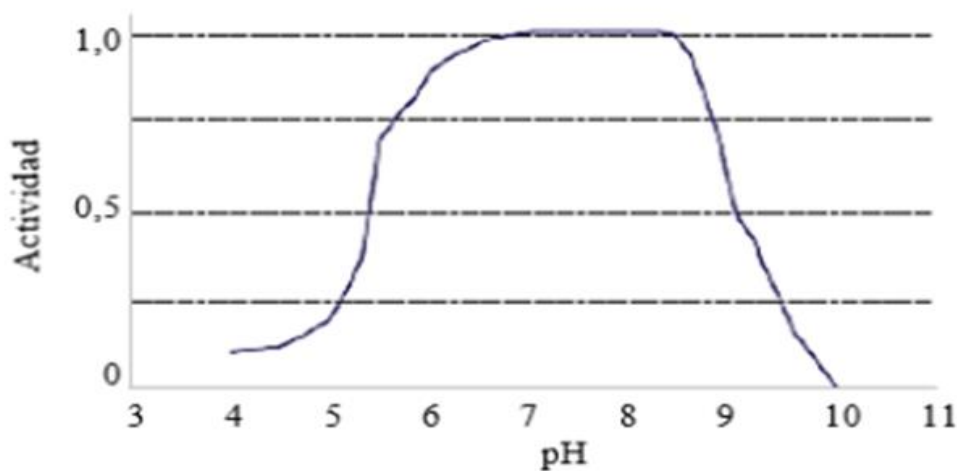


Figura 1.7. "Crecimiento de las bacterias metanogénicas bajo la influencia de condiciones de pH" (Speece, 1996)

1.6.2.3. Relación carbono/nitrógeno (C/N)

La relación carbono/nitrógeno (C/N) de la materia prima es un factor crítico en el proceso de digestión anaerobia, debido a su influencia directa en el balance metabólico de los microorganismos involucrados. Un equilibrio adecuado en la relación C/N permite una actividad microbiológica óptima, facilitando la producción de metano. Estudios han demostrado que valores óptimos de relación C/N oscilan entre 20 y 35, ya que proporcionan el balance necesario para evitar la acumulación de amoníaco, que podría inhibir el proceso anaeróbico (Arrieche, 2022; Palavecino et al., 2019).

El amoníaco generado a partir de un desequilibrio en la relación C/N puede resultar tóxico para las bacterias metanogénicas, desacelerando o incluso deteniendo la producción de biogás. Cuando la relación C/N es demasiado baja, hay un exceso de nitrógeno, lo que conduce a la formación de altas concentraciones de amoníaco. Por el contrario, una relación C/N alta implica un exceso de carbono, lo que puede llevar a una acidificación excesiva del medio,

también perjudicial para los microorganismos (Palavecino et al., 2019). En la Tabla 1.5 se recogen los valores medios aproximados de diferentes residuos de cabezas de ganado:

| Residuos Animales | %C | %N | C/N |
|--------------------------|-----------|-----------|------------|
| Porcino | 25 | 1,5 | 16:1 |
| Bovino | 30 | 1,30 | 25:1 |
| Caprino | 40 | 1 | 40:1 |
| Cunícola | 35 | 1,50 | 23:1 |
| Avícola | 35 | 1,50 | 23:1 |

Tabla 1.5. “Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos ganaderos”

1.6.2.4. Ácidos Grasos Volátiles y Alcalinidad.

La relación entre los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad en la digestión anaerobia es fundamental para entender los procesos biológicos y químicos en los digestores anaeróbicos. Los AGV, como productos intermedios de la descomposición de la materia orgánica, son esenciales para la producción de biogás. No obstante, su acumulación excesiva puede causar un desequilibrio en el sistema, reduciendo la eficiencia de la digestión anaerobia. La alcalinidad funciona como un amortiguador que neutraliza los ácidos y estabiliza el *pH*, creando un ambiente adecuado para los microorganismos metanogénicos que convierten los AGV en metano (Molina et al., 2009).

Un aumento en la concentración de AGV puede reducir el *pH* y causar la acidificación del digestor. Esto ocurre porque los AGV acumulados exceden la capacidad de los microorganismos metanogénicos para consumirlos, resultando en una producción rápida de biogás y un mayor riesgo de formación de espuma (Siebels & Long, 2013). La acidificación no solo inhibe la actividad metanogénica, sino que también fomenta la proliferación de bacterias acidogénicas que producen más AGV, perpetuando el ciclo de desequilibrio (Hori et al., 2014).

La alcalinidad está inversamente relacionada con la tensión superficial de los líquidos en el digestor. Un aumento de la alcalinidad disminuye la tensión superficial, lo que puede aumentar el riesgo de formación de espuma, afectando la eficiencia del digestor y requiriendo intervenciones adicionales (Siebels & Long, 2013). Además, la variabilidad en las concentraciones de AGV y alcalinidad puede indicar una menor estabilidad del proceso, especialmente en digestores termofílicos más sensibles a cambios ambientales (Siebels & Long, 2013).

Daniel Mora Hernández

Para controlar la capacidad tamponadora de las fermentaciones anaeróbicas existen diferentes ratios para tener en cuenta. La alcalinidad parcial (AP) se asocia con la presencia de bicarbonatos, la alcalinidad intermedia (AI) está relacionada con la presencia de AGV y la alcalinidad total (AT) representa todos los iones de carbonato, bicarbonato e hidróxido. Una alcalinidad intermedia con un rango próximo a $2.000 \text{ mg CaCO}_3/L$ indica un correcto consumo de AGV por parte de las bacterias metanogénicas (Pérez y Torres, 2008). La ratio AI/AP con valores superiores a 0,3 indican la desestabilización del proceso (Pérez y Torres, 2011). Una relación AGV/AT menor que 0,5 indica estabilidad en el proceso, y una relación mayor que 0,8 supone que el proceso en estado crítico y hay riesgo de acidificación (Pérez y Torres, 2011).

1.6.2.5. Agitación.

Es esencial mantener un nivel adecuado de agitación para promover el contacto entre el sustrato y las bacterias, así como para homogeneizar la temperatura dentro del digester. Sin embargo, un exceso de agitación puede llevar a una disminución en la producción de biogás. Estudios han demostrado que condiciones de baja velocidad de mezcla permiten al digester adaptarse mejor a las variaciones en la alimentación en comparación con velocidades de agitación más altas. Además, la agitación excesiva puede provocar la desintegración de la estructura granular y reducir la velocidad de oxidación de ácidos grasos, lo que podría resultar en la inestabilidad del digester. La agitación puede lograrse mediante métodos mecánicos o mediante la recirculación de gas. La eficacia de un digester y su proceso de agitación pueden evaluarse mediante estudios hidrodinámicos para determinar si el reactor está operando al máximo de su capacidad (Gómez et al., 2006).

1.6.3. La tecnología de la co-digestión anaerobia.

La digestión anaerobia presenta un inconveniente para tener en cuenta relacionado con la carga orgánica que se introduce en el digester. Existen cargas orgánicas con bajas concentraciones de amonio o altas concentraciones de nitrógeno que actúan como inhibidores en la digestión anaerobia. Por ello, la co-digestión se presenta como una solución efectiva. Esta técnica permite mezclar sustratos para alcanzar una relación C/N más equilibrada. En la Tabla 1.6 se recogen los principales inconvenientes que presentan ciertos residuos capaces de producir biogás.

Gracias a esta técnica, por ejemplo, se pueden mezclar dos tipos de residuos: lodos de depuradora y residuos de matadero. Los lodos son sustratos con baja carga orgánica, mientras

que los residuos del matadero poseen una alta carga orgánica y altas concentraciones de amonio, lo que favorece una buena relación de C/N .

| Residuos | Inconvenientes |
|--|---|
| Lodo de depuradora | Baja carga orgánica |
| Estiércol de animales | Baja carga orgánica Altas concentraciones de amonio |
| FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos) | Concentraciones elevadas de metales pesados |
| Residuos agrícolas y agroindustriales | Estacionales Carencia de amonio |
| Residuos de mataderos y de la industria pesquera | Altas concentraciones de N y/o ácidos grasos de cadena larga (AGCL) |

Tabla 1.6. “Inconvenientes de ciertos residuos capaces de producir inhibiciones en el proceso”
(Mata-Álvarez et al., 2014)

Además de los lodos, también destaca la utilización de glicerina como sustrato. La glicerina, o más conocido como glicerol, es un compuesto que se encuentra ampliamente en la naturaleza, pero también se obtiene como producto secundario en la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales o grasas animales. Según fuentes bibliográficas, la utilización de glicerina como sustrato en la digestión anaerobia de residuos SANDACH debe contener al menos un 70 – 80%, mientras que los SANDACH deben suponer un 20 – 30% del total (Nuchdang & Phalakornkule, 2012).

Esta tecnología se puede realizar en una etapa (one stage) o en dos etapas (two stages). En el sistema de una etapa todas las fases metabólicas de la fermentación ocurren de manera conjunta, con la única condición de mantener un pH estable que oscile entre 7 – 7,5. Por otro lado, en el sistema de dos etapas, se busca la optimización de las condiciones para cada uno de los microorganismos que intervienen en la ruta metabólica. En la primera etapa se busca favorecer la hidrólisis y la acidogénesis para la producción de ácidos grasos volátiles con unas condiciones de pH que oscilan entre 5,5 – 6,2 (Moestedt et al, 2020). En la segunda etapa, la actividad acetogénica y metanogénica se ven claramente beneficiadas con una mayor estabilidad y producción de metano gracias a condiciones de pH en el medio que oscilan entre 7 – 8,2 (Moestedt et al, 2020).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la viabilidad de la valorización energética de residuos SANDACH (Subproductos Animales No Destinados a Consumo Humano) en la isla de Tenerife para que en un futuro aporte energía renovable capaz de contribuir al mix energético insular. La cantidad de estos residuos ha ido en aumento debido al crecimiento de la industria ganadera y la población. La gestión adecuada de estos residuos es esencial para prevenir problemas ambientales y de salud pública. Por lo tanto, es crucial explorar soluciones sostenibles que puedan convertir estos desechos en una fuente útil de energía como es el biogás, el único recurso renovable capaz de poder utilizarse en cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas.

Para cumplir con el objetivo del proyecto, es necesario contar con información sobre las propiedades de estos residuos y su efecto sobre su digestión anaerobia. Por ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la efectividad de la co-digestión anaerobia como método de tratamiento y eliminación de SANDACH generados en la isla de Tenerife.
- Cuantificar los flujos de generación anuales de SANDACH en la isla y estimar la cantidad de energía que puede obtenerse a partir de estos flujos.
- Determinar la capacidad de generación de gas y la composición del gas generado por la tecnología de la digestión anaerobia.
- Caracterización de las muestras SANDACH utilizadas con la determinación del contenido en fracciones sólidas, la composición elemental, la concentración de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad de las muestras SANDACH utilizadas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado, se detallan las diversas materias primas, reactivos, materiales y equipos empleados a lo largo del desarrollo de este trabajo, junto con los procedimientos utilizados para obtener los resultados necesarios y cumplir con los objetivos planteados.

3.1. Materias primas.

Las materias primas empleadas en la realización experimental de este proyecto han sido las siguientes:

- Residuos de ganado porcino
- Residuos de ganado bovino
- Residuos de ganado ovino
- Residuos de ganado avícola
- Residuos de ganado caprino
- Residuos de ganado cunícola
- Lodos de depuradora

Los residuos de ganaderías han sido facilitados por los dos mataderos de la isla de Tenerife. Hay que destacar que los residuos seleccionados para este proyecto son los residuos SANDACH de categoría III. Además, los lodos de depuradora también han sido cedidos por los propios mataderos, al disponer de unas EDARI para el tratamiento del agua previo a su vertido a la red de saneamiento.

En cuanto a los productos químicos utilizados son los siguientes:

- Agua Destilada
- Cloruro de Amonio (NH_4Cl)
- Carbonato Cálcico ($CaCO_3$)
- Ácido Sulfúrico al 97% (H_2SO_4)
- Hidróxido Sódico ($NaOH$)
- Disolución Buffer de PO_3^{-4}
- Gas Nitrógeno (N_2)

Daniel Mora Hernández

3.2. Material de laboratorio.

Para poder realizar la parte práctica del proyecto se ha contado con el siguiente material de laboratorio:

- Un reactor discontinuo tanque agitado de 3 litros de capacidad (Scharlau)
- Cromatógrafo de Gases (Agilent 7820A)
- Baño Térmico (Selecta)
- Espectrómetro de Masas
- Liofilizador
- Bomba tipo pistón para dosificar *NaOH* o *HCl* (Marca SEL)
- Jeringuilla para gas de 1 mililitro
- Estufa (Heraeus)
- Mufla (Heraeus)
- Crisoles de cerámica
- Centrifugadora (Mega Star 600)
- Baño de ultrasonido (Selecta)
- Frasco de vidrio de 1 litro
- Termómetro de Laboratorio
- *pH* -metro
- Vasos de Precipitado de 100, 250, 500 y 1000 mililitros.
- Probetas de 500, 1000 y 2000 mililitros.
- Triturador de cocina

3.3. Instalación experimental.

La configuración experimental incluía un reactor discontinuo de 3 litros de capacidad, sellado herméticamente con una tapa que disponía de unos orificios para colocar la siguiente instrumentación: medidor de *pH*, medidor de temperatura, un dosificador para la disolución de *NaOH* o *HCl*, y un accesorio en *T* que permitía la extracción de gases, por un lado, y por el otro permitía medir el volumen de gas.

Además, el reactor está dotado de una camisa calefactora que mantiene una temperatura constante de 31,5°C al circular agua destilada, con el propósito de promover la etapa metanogénica del proceso de fermentación. También cuenta con un sistema de agitación que está conectado a un motor que mantiene una velocidad constante de 60 *rpm*.

Para medir los volúmenes de gas producidos, se empleó un frasco de vidrio de 1 litro conectado al reactor, graduado con una escala en centímetros que permitía la cuantificación del volumen por desplazamiento de agua acidulada para cuantificar la producción de gas. Con el fin de obtener un valor exacto del volumen producido, la cuantificación se realizó teniendo en cuenta el volumen del frasco y su desplazamiento diariamente:

$$V(mL) = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times H \quad (1)$$

siendo D (cm) conocido y H (cm) el desplazamiento diario.

El control de las variables de pH y temperatura se realiza mediante un panel de control que marca en todo momento los valores correspondientes a cada variable.

La monitorización de la producción de gas se realiza mediante una hoja de Excel, cargada previamente con un algoritmo que permite obtener la cantidad de gas producida. Por otro lado, el monitoreo de pH y temperatura se realiza a través de un software.

A continuación, se muestra una imagen de la configuración experimental utilizada (Figura 3.1) durante los ensayos:



Figura 3.1. “Configuración experimental utilizada durante los ensayos”

3.4. Preparación de la materia prima

En primer lugar, se trituraron cada tipo de residuo por separado utilizando un triturador de cocina. Posteriormente, el material triturado se sometió a una deshidratación en una estufa a una temperatura de 105°C durante un período de 15 horas con el fin de eliminar la humedad de las muestras (Arrieche, 2022). Finalmente, se preparó una mezcla de residuos de 1 kilogramo con las siguientes composiciones (Tabla 3.1):

| Tipo de residuo | Proporción (%) |
|---------------------|----------------|
| Vísceras de Bovino | 3,87 |
| Vísceras de Porcino | 3,72 |
| Vísceras de Caprino | 1,30 |
| Vísceras Avícolas | 83,3 |
| Vísceras Cunícolas | 0,5 |
| Sangre | 2,6 |
| Lodo MIT | 3,4 |
| Lodo Avícola | 1,3 |

Tabla 3.1. “Composición de cada tipo de residuo para la obtención de una muestra homogenizada”

Es importante destacar que las proporciones de cada residuo han sido calculadas de acuerdo con la cantidad de residuos que se generan en los mataderos de la isla de Tenerife, de ahí que la cantidad de vísceras avícolas sea la predominante. El ganado avícola es con diferencia el que más sacrificios tiene diariamente.

Cada carga en el reactor contiene un total de 360 gramos de la mezcla preparada, a la cual se le agregan las siguientes relaciones de reactivos:

- 0,080 g NH_4Cl /g residuo
- 9,000 mg $CaCO_3$ /g residuo
- 0,167 mL Búfer/g residuo
- 4,830 mL H_2O /g residuo

3.4.1. Preparación de los reactores.

En total, se realizaron cinco ensayos, de los cuales tres se fundamentaron mediante la digestión en una etapa, y los otros dos restantes a través de la digestión en dos etapas (ver tablas 3.2):

| | Masa Residuos (g) | Masa Lodos (g) | Masa Glicerina (g) | Etapas |
|--|----------------------|-------------------|-----------------------|--------|
|--|----------------------|-------------------|-----------------------|--------|

| | | | | |
|----|--------|-------|--------|---|
| E1 | 344,56 | 16,92 | - | 1 |
| E2 | 344,66 | 16,92 | - | 1 |
| E3 | 343,10 | 16,92 | - | 2 |
| E4 | 343,20 | 16,92 | - | 2 |
| E5 | 109,92 | 5,42 | 244,66 | 1 |

Tabla 3.2. “Identificación de cada uno de los experimentos”

3.4.2. Montaje de reactor para digestión anaerobia en una etapa.

El montaje para llevar a cabo el experimento de digestión anaerobia en una etapa se desarrolló mediante una serie de pasos específicos. Inicialmente, se encendió el baño térmico para garantizar un suministro constante de agua a una temperatura de 31,5°C hacia la camisa calefactora del reactor. Acto seguido, se introdujo la carga de residuos en el reactor, acompañado del registro del *pH* inicial de la mezcla. Se procedió entonces a añadir 1740 mL de agua destilada y los reactivos correspondientes.

Tras finalizar esta fase inicial, se cerró herméticamente el reactor y se aplicó vacío dentro del mismo durante 5 minutos mediante una bomba conectada a la válvula de salida de gases. Posteriormente, se llevó a cabo la inyección de gas nitrógeno a una presión de 0,5 Kg/cm² en intervalos de 5 minutos, repitiendo este procedimiento cinco veces. Después de cada intervalo, se abrió la válvula de salida de gas del reactor para permitir que el gas nitrógeno saliera y para verificar la estanqueidad del reactor.

Una vez completados estos pasos, se tomó nota del *pH* estabilizado tras la adición de los reactivos. En caso de que el valor del *pH* no se aproximara a la neutralidad, se procedía a bombear NaOH 4M a través del dosificador de manera manual. Finalmente, se estableció un punto de ajuste de *pH* en el panel de control, de modo que, si el *pH* descendía por debajo de ese valor, se activaba automáticamente el dosificador de NaOH, garantizando así las condiciones óptimas para la etapa metanogénica del proceso. Los puntos de ajustes de *pH* establecidos para cada ensayo se recogen en la Tabla 3.3:

| | Duración (Días) | Ajuste de <i>pH</i> |
|----|------------------------|----------------------------|
| E1 | 48 | 7 |
| E2 | 30 | 7 |
| E5 | 15 | 7,5 |

Tabla 3.3. “Duración y ajustes de *pH* para los ensayos en una etapa”

3.4.3. Montaje de reactor para digestión anaerobia en dos etapas.

Para comenzar el proceso de digestión anaerobia en dos etapas, se llevó a cabo un procedimiento que implicó varios pasos clave. Inicialmente, se activó el baño térmico para calentar el agua a una temperatura de 31,5°C, la cual luego se suministró al reactor a través de su camisa calefactora. Posteriormente, se introdujo la carga de residuos en el reactor, seguido de la adición de 1740 mL de agua destilada y el registro del *pH* inicial de la mezcla estabilizada. Se estableció un *pH* óptimo cercano a 5,5 para esta etapa inicial, asegurando condiciones favorables para la hidrólisis. Para mantener este *pH* constante, se configuró un sistema automático en el panel de control que activaba el dosificador de *HCl* 1M según fuera necesario. Para esta primera etapa, no se añaden los reactivos.

Una vez completada esta fase, el reactor se selló herméticamente y se sometió a un vacío durante un tiempo determinado utilizando una bomba conectada a la válvula de salida de gases. Después, se procedió a inyectar gas nitrógeno a una presión de 0,5 Kg/cm² en el reactor a intervalos regulares de 5 minutos, seguido de la apertura periódica de la válvula de salida de gas para verificar la hermeticidad del sistema.

Tras una serie de intervalos que se recogen en la Tabla 3.4, se inició la segunda etapa de la fermentación introduciendo los reactivos necesarios. Se llevó a cabo una limpieza del dosificador utilizando *NaOH* 4M para eliminar cualquier residuo de *HCl* presente. A partir de este momento, el proceso continuó de acuerdo con el procedimiento estándar para la digestión anaerobia en una sola etapa, descrito anteriormente.

| | Duración 1º Etapa (h) | Ajuste de <i>pH</i> | Duración 2º Etapa (Días) | Ajuste de <i>pH</i> |
|----|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| E3 | 73 | 5,55 | 23 | 7 |
| E4 | 120 | 5,55 | 21 | 7 |

Tabla 3.4. “Duración y ajustes de *pH* para los ensayos en dos etapas”

3.5. Análisis de la composición de gas.

El cromatógrafo Agilent 7820A (ver Figura 3.3) ha sido seleccionado como el equipo principal para analizar la composición del gas obtenido en cada uno de los experimentos de esta investigación. Reconocido por su alto rendimiento confiable y eficiente, este cromatógrafo ofrece una tecnología avanzada que garantiza resultados precisos y reproducibles.

Este equipo utiliza dos columnas de alta eficiencia y detectores sensibles para llevar a cabo el análisis de la muestra de gas inyectada. La primera columna se encarga de separar los

componentes como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono y metano, mientras que la segunda columna se enfoca en hidrógeno, metano y dióxido de carbono. Estos analitos generan señales de picos agudos que coinciden con sus respectivos tiempos de retención (ver Tabla 3.5), y generan el siguiente cromatograma donde se observa cada analito:

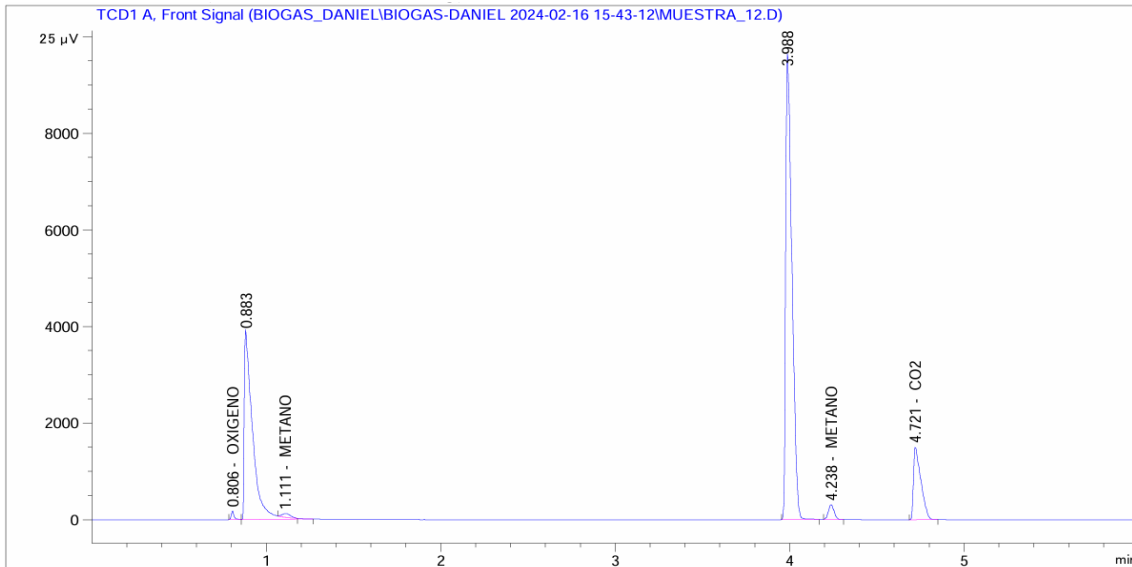


Figura 3.2. “Ejemplo de cromatograma obtenido durante uno de los ensayos donde se obtuvo metano”

| Parámetros | Componentes | t_r (min) |
|------------|--------------------|-------------|
| 1ª Columna | Hidrógeno | 0,70 |
| | Oxígeno | 0,80 |
| | Nitrógeno | 0,90 |
| | Metano | 1,10 |
| 2ª Columna | Aire | 3,95 |
| | Metano | 4,20 |
| | Dióxido de carbono | 4,70 |

Tabla 3.5. “Tiempos de retención de cada analito para el método utilizado”

Los resultados de los análisis realizados con el cromatógrafo Agilent 7820A se registran y almacenan en un ordenador de sobremesa. Este ordenador está conectado directamente al cromatógrafo y cuenta con el software OpenLab CDS instalado, lo que facilita la gestión y análisis de los datos obtenidos durante el proceso. En la Tabla 3.6 se recogen los principales valores de cada parámetro, los cuales están vinculados al método de análisis utilizado.

| Parámetros | Valor |
|-----------------------------|-----------|
| Componente de la fase móvil | Helio |
| Temperatura del inyector | 178°C |
| Presión del inyector | 9 psi |
| Temperatura del detector | 180°C |
| Caudal de referencia | 36 mL/min |
| Caudal de make up | 2mL/min |
| Temperatura del horno | 40°C |

Tabla 3.6. “Parámetros del método de análisis”

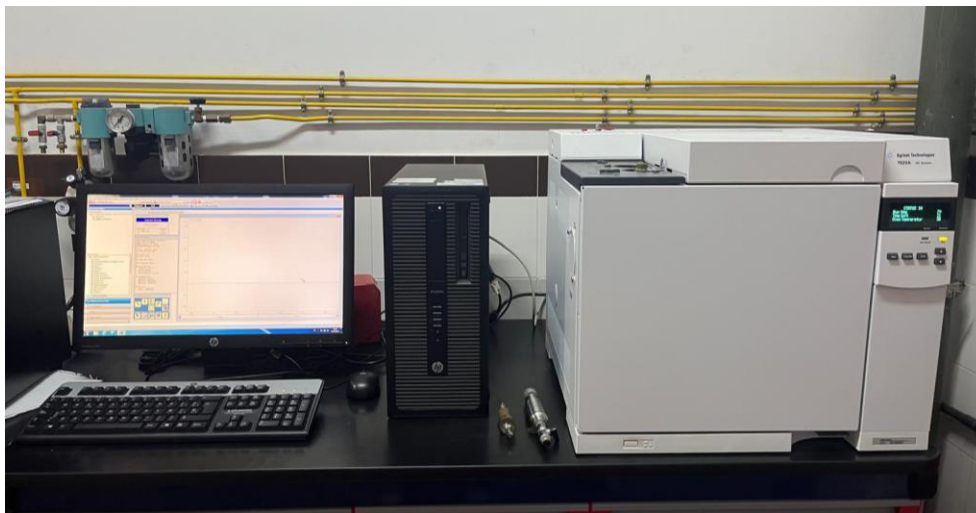


Figura 3.3. “Cromatógrafo de gases utilizado para el análisis de la composición del gas”

3.6. Análisis de la composición en sólidos volátiles, sólidos totales y sólidos fijos.

En los experimentos de digestión anaerobia, se analiza la cantidad de sólidos volátiles, totales y fijos al inicio y al final del proceso para evaluar la eficiencia. Una disminución en los sólidos totales y volátiles indica una mayor descomposición de la materia orgánica, lo que sugiere una mayor producción de biogás. Es importante considerar que, cuanto mayor sea el porcentaje de sólidos volátiles al inicio de la digestión, mayor será la capacidad de biodegradabilidad. El estudio de estos sólidos proporciona información sobre la evolución de la materia orgánica durante la digestión y facilita la comprensión de su conversión en gases como el metano y el dióxido de carbono, entre otros. El análisis de los sólidos sigue un procedimiento visto en trabajos anteriores (Peces et al., 2014) y se desarrolla a continuación:

Para el análisis de la composición, se comenzó pesando los crisoles y registrando su peso inicial. A continuación, para el análisis de los residuos previos a la digestión, se pesaron 1 gramo de residuos en cada crisol. Para el análisis posterior a la digestión, la muestra se centrifugó para separar el residuo sólido, del cual se pesó 1 gramo para cada crisol. Posteriormente, los crisoles

se colocaron en una estufa a 105°C durante 24 horas, se enfriaron y se pesaron nuevamente para registrar su peso. Luego, se sometieron a una temperatura de 550°C en una mufla durante 1 hora, se enfriaron y se pesaron una vez más para obtener su peso final.

Cálculos:

$$\%ST = \frac{B-A}{M} \times 100 \quad (2)$$

$$\%SV = \frac{B-C}{B-A} \times 100 \quad (3)$$

$$\%SF = \frac{C-A}{B-A} \times 100 \quad (4)$$

A; Peso del crisol vacío.

B; Peso del crisol con la mezcla después de la estufa a 105°C.

C; Peso del crisol con la mezcla después de la mufla a 550°C.

M; Peso de la muestra sólida inicial.

3.7. Análisis elemental.

El análisis de carbono, nitrógeno e hidrógeno en las muestras, tanto antes como después de la digestión, se llevó a cabo en los laboratorios del Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) de la Universidad de La Laguna, situada en el Campus de Anchieta. Inicialmente, las muestras fueron preparadas mediante un proceso de deshidratación de 24 horas utilizando liofilización. Luego, se enviaron a los laboratorios del SEGAI, donde se determinó el contenido de carbono, nitrógeno e hidrógeno usando el espectrómetro de masas Analizador Elemental Flash EA 1112 (ver Figura 3.5). Esta técnica microanalítica implica la oxidación completa de 2 mg de muestra, convirtiendo sus compuestos en productos de combustión. Estos productos fueron transportados en un tubo de reducción con helio (*He*) como gas portador, separados en columnas específicas mediante adsorción/desorción térmica y finalmente analizados con un detector TCD para medir la concentración de los elementos presentes en la muestra original. Este procedimiento se repitió tres veces para cada muestra.

La Figura 3.4 muestra un ejemplo del cromatograma obtenido en uno de los análisis de una determinada muestra realizada por el Servicio de Espectrometría de Masas y Análisis Elemental del SEGAI:

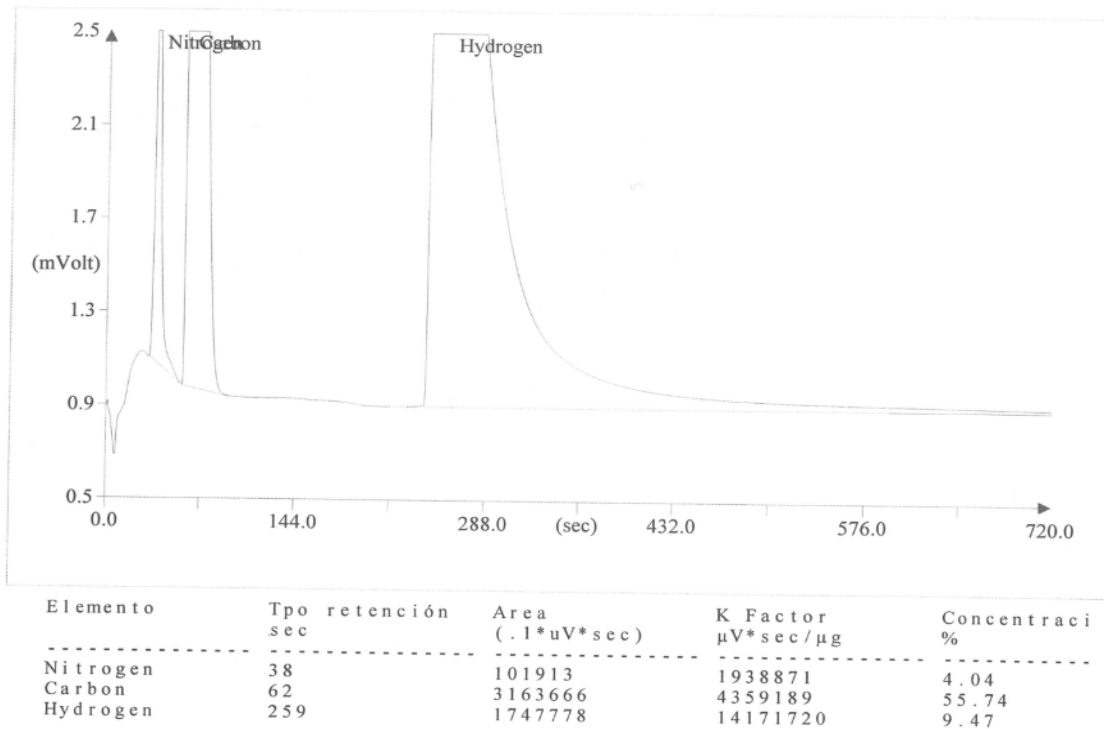


Figura 3.4. “Cromatograma obtenido tras la realización del análisis de una determinada muestra”



Figura 3.5. “Espectrómetro de masas utilizado para el análisis elemental”

3.8. Determinación ácidos grasos volátiles (AGV).

Estos parámetros son utilizados para controlar el proceso de la digestión y conocer las posibles inhibiciones que se han producido. Se realizaron mediante una valoración con una metodología que se describe a continuación (Callaghan et al., 2002):

1. Se centrifugan 100 mL de muestra a 4350 rpm durante 15 minutos.
2. Se separa el sobrenadante en un vaso y se miden 20 mL para analizar.
3. Medir y anotar el pH y temperatura inicial de la muestra con un pH -metro.
4. Se agita el líquido con un agitador magnético y se valora con ácido sulfúrico 0,1 N hasta pH = 4. Anotar el volumen de ácido sulfúrico gastado.
5. Se somete el líquido a ultrasonido durante 10 minutos para eliminar el CO₂.
6. Se ajusta el pH de la muestra con NaOH 0,1 N hasta un pH = 7,0. Se anota el volumen de sosa gastado.

Cálculos:

$$AGV \left(\frac{mg \text{ CH}_3\text{COOH}}{L} \right) = \frac{vol. \text{ NaOH}_{pH 4 a 7} \times N \text{ NaOH} \times 50 \times 1000}{vol. \text{ muestra}} \times F \quad (F = 1.41) \quad (5)$$

siendo N la normalidad del ácido sulfúrico y 50 el peso equivalente del CaCO₃.

3.9. Determinación de la alcalinidad total (AT), alcalinidad parcial (AP) y alcalinidad intermedia (AI).

Para determinar las alcalinidades se realiza mediante valoración siguiendo el método de Astals et al. (2012). El análisis se realiza a través del sobrenadante en exceso del análisis de los AGV. Se miden 20 mL de sobrenadante y se valora mediante la adición de ácido sulfúrico 0,1 N desde pH inicial hasta pH de 5,75 (AP) y pH entre 5,75 a 4,3 (AI). La suma de los volúmenes de ambas valoraciones representa la AT.

Cálculos:

$$AP \left(\frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right) = \frac{vol. \text{ H}_2 \text{ SO}_4_{pH \text{ inicial a } 5,75} \times N \text{ H}_2 \text{ SO}_4 \times 50 \times 1000}{vol. \text{ muestra}} \quad (6)$$

$$AI \left(\frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right) = \frac{vol. \text{ H}_2 \text{ SO}_4_{pH 5,75 a 4,3} \times N \text{ H}_2 \text{ SO}_4 \times 50 \times 1000}{vol. \text{ muestra}} \quad (7)$$

$$AT \left(\frac{mg \text{ CaCO}_3}{L} \right) = \frac{vol. \text{ H}_2 \text{ SO}_4_{pH \text{ inicial a } 4,3} \times N \text{ H}_2 \text{ SO}_4 \times 50 \times 1000}{vol. \text{ muestra}} \quad (8)$$

siendo N la normalidad del ácido sulfúrico y 50 el peso equivalente del CaCO₃.

3.10. Estimación energética a partir de los residuos SANDACH utilizados.

La estimación energética nos indica el potencial energético que tiene el biogás que se obtiene tras los procesos anaerobios de residuos SANDACH. Para ello se calculará la energía total (ET) a partir del gas obtenido y posteriormente se calculará la ET que producen los residuos

Daniel Mora Hernández

SANDACH en la isla teóricamente tras el estudio previo de los flujos de residuos que se generan en la isla.

Cálculos para obtener la ET a partir del volumen de CH_4 obtenido en los ensayos:

$$VT_{CH_4PRODUCIDO}(m^3) = Prod. Esp. CH_4 \left(\frac{Nm^3}{kg SV} \right) \times M_{SANDACH}(kg) \times SV_{RS} \quad (9)$$

$$ET (KWh) = VT_{CH_4PRODUCIDO}(m^3) \times PC (KWh) \quad (10)$$

Cálculos para obtener la ET teórica a partir de los flujos de residuos anuales:

$$V_{CH_4}(m^3) = M_{SANDACH}(kg) \times SV_{RS} (\%) \times Q_{BIOGAS} \left(\frac{m^3 Biogás}{kg} \right) \times CH_{4/BIOGÁS} (\%) \quad (11)$$

$$ET_{TEÓRICA}(KWh) = V_{CH_4}(m^3) \times PC (KWh) \quad (12)$$

En la Tabla 3.7 se recogen ciertos parámetros necesarios para el cálculo de ET y $ET_{TEÓRICA}$ obtenidas a partir de fuentes bibliográficas:

| Parámetros | Acrónimo | Valor |
|--|-----------------|-------|
| SV Residuos SANDACH, % | SV_{RS} | * |
| Poder Calorífico, KWh/m ³ | PC | 10,84 |
| Prod. Biogás, m ³ Biogás/kg | $Q_{BIOGÁS}$ | 0,6 |
| Contenido en CH_4 del biogás, % | $CH_4 (BIOGÁS)$ | 60 |

*El valor de SV_{RS} será el valor medio de SV de las muestras que se analizan antes de la digestión y así contar con un valor real del contenido de los residuos SANDACH.

Tabla 3.7. “Parámetros con sus respectivos valores para el cálculo de ET y $ET_{TEÓRICA}$ ”

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En 2022 se hizo pública una resolución oficial de la Dirección General de Ganadería, fechada el 11 de mayo de 2022, que concierne la prórroga de la declaración de la Comunidad Autónoma de Canarias como Zona Remota. Esta declaración es específica para la eliminación de ciertos subproductos animales no destinados al consumo humano (SANDACH) en vertederos autorizados. La gestión de SANDACH en Canarias se organiza debido a las peculiaridades del territorio, como su orografía e insularidad, que complican la retirada, transporte, manipulación y almacenamiento de estos subproductos.

Inicialmente, en 2010, estas actividades se estructuraron mediante una colaboración con el Ministerio de Agricultura, donde el material retirado se destinaba a plantas de transformación en territorio peninsular, dado que en Canarias no existían plantas de tratamiento adecuado. Sin embargo, debido a las condiciones antes mencionadas, se realizó una declaración en 2012 que consideró a Canarias como Zona Remota, permitiendo la eliminación de estos subproductos en vertederos locales autorizados hasta 2015. Esta declaración ha sido prorrogada varias veces, con las últimas prórrogas permitiendo la continuación de esta práctica hasta 2023, siempre que los Complejos Ambientales Insulares mantengan vigentes las correspondientes autorizaciones ambientales.

La gestión actual involucra además tratamiento intermedio en plantas que permiten una mejor inertización y manejo del SANDACH antes de su eliminación final, ofreciendo una solución más eficiente y adaptada a las limitaciones geográficas y logísticas del archipiélago canario.

Debido a este problema medioambiental, es necesario un estudio de la generación anual de residuos SANDACH que se generan en la isla de Tenerife y proponer una solución para la valorización de estos residuos, los cuales poseen un gran potencial energético.

4.1. Estudio de la ganadería en Tenerife y cuantificación de residuos.

En el año 2024, el Instituto Canario de Estadística (ISTAC) publicó el número de efectivos de ganado según especies en Tenerife en el año 2023, que cuenta con una cultura ganadera activa.

Estos datos reflejan un claro predominio del ganado avícola, seguido del ganado caprino y porcino. El censo pecuario del ganado cunícola ha ido disminuyendo con el paso de los años debido a la mixomatosis, una enfermedad que se propaga rápidamente entre estos pequeños mamíferos. Esto ha provocado que los ganaderos pierdan el interés con este tipo de ganado. Lo

mismo ocurre con el ganado bovino, pero este incentivado por los elevados costes que supone la alimentación de estos mamíferos, debido a la falta de prados para poder alimentarlos con el pastoreo.

| Tipo de Ganado | N.º de cabezas de ganado |
|-----------------------|---------------------------------|
| Avícola | 1.844.523 |
| Bovino | 4.409 |
| Porcino | 23.744 |
| Caprino | 32.222 |
| Cunícula | 8.824 |

Tabla 4.1. “Datos de efectivos de ganado según especies en Tenerife” (Instituto Canario de Estadística, 2024)

La industria ganadera tiene como objetivo satisfacer la demanda de productos cárnicos y lácteos de la población. Este objetivo implica no solo la producción de alimentos de alta calidad, sino también la optimización de recursos y la sostenibilidad ambiental. Para satisfacer la demanda, hay que recurrir al sacrificio de los animales en los mataderos, donde se generan grandes cantidades de SANDACH.

En los dos mataderos de Tenerife, según datos del Gobierno de Canarias, en el año 2023 se sacrificaron mensualmente las siguientes cantidades de cabezas (ver Tabla 4.2):

| | Bovino | Porcino | Caprino | Avícola | Cunícula |
|-------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Enero | 428 | 2.541 | 210 | 391.860 | 2.388 |
| Febrero | 498 | 2.490 | 235 | 337.984 | 1.256 |
| Marzo | 418 | 2.705 | 911 | 374.793 | 1.665 |
| Abril | 410 | 2.309 | 294 | 345.378 | 1.097 |
| Mayo | 432 | 2.965 | 318 | 410.115 | 1.502 |
| Junio | 369 | 2.589 | 398 | 389.047 | 1.154 |
| Julio | 324 | 2.421 | 165 | 353.477 | 1.455 |
| Agosto | 343 | 2.818 | 293 | 353.477 | 1.065 |
| Septiembre | 345 | 2.514 | 307 | 353.872 | 884 |
| Octubre | 334 | 2.639 | 255 | 433.706 | 1.061 |
| Noviembre | 349 | 2.470 | 730 | 435.197 | 676 |
| Diciembre | 430 | 3.314 | 1.528 | 385.843 | 1.052 |
| TOTAL | 4.680 | 31.775 | 5.644 | 4.564.749 | 15.255 |

Tabla 4.2. “Datos de sacrificios según especies de ganado en la isla de Tenerife” (Gobierno de Canarias, 2024)

El ganado avícola es, con diferencia, el que más sacrificios tiene, por lo que genera una mayor cantidad de residuos. En la Figura 4.1 se pueden observar los % de cabezas de ganado sacrificados en Tenerife en comparación con el resto de las islas. En Tenerife predominan

los sacrificios del ganado porcino y avícola, mientras que, en el resto de las islas, mayoritariamente Gran Canaria, predominan el resto de los ganados sacrificados:

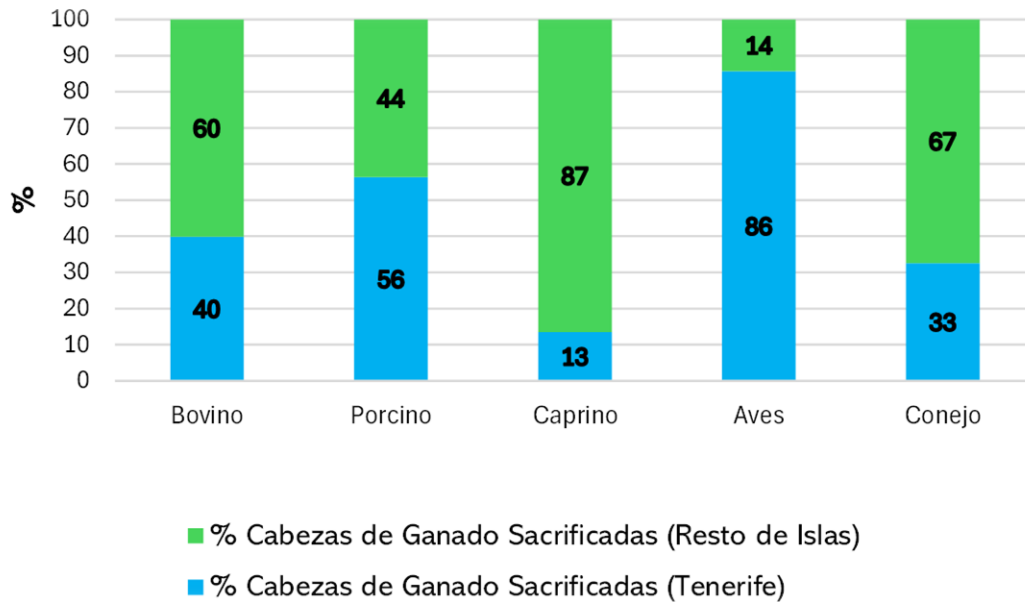


Figura 4.1. “Datos de sacrificios según especies de ganado en Canarias” (Gobierno de Canarias, 2024)

A su vez, estos sacrificios generan grandes cantidades de residuos, mayoritariamente vísceras y lodos. Estas cantidades se traducen en los siguientes datos (ver tablas 4.3) mensualmente facilitados por los mataderos:

| | Vísceras (t) | Lodos (t) |
|-------------------|--------------|-----------|
| Enero | 549 | 30 |
| Febrero | 482 | 30 |
| Marzo | 588 | 38 |
| Abril | 438 | 23 |
| Mayo | 470 | 38 |
| Junio | 495 | 45 |
| Julio | 437 | 30 |
| Agosto | 481 | 38 |
| Septiembre | 446 | 30 |
| Octubre | 448 | 38 |
| Noviembre | 421 | 30 |
| Diciembre | 478 | 53 |
| TOTAL | 5.733 | 420 |

Tabla 4.3. “Residuos generados en los mataderos de la isla de Tenerife” (Datos facilitados por los mataderos insulares de la isla)

En total, se generaron 6.153 t de residuos que tras un proceso de tratamiento intermedio acabaron en el Complejo Ambiental de Arico enterrados.

Daniel Mora Hernández

Por ello, de ahora en adelante se estudia la eficiencia de la co-digestión anaerobia como proceso para la obtención de energía renovable, tomando como punto de partido la cantidad de residuos que se generaron en 2023 en los mataderos de Tenerife y teniendo en cuenta cuál es el ganado que más predomina en la isla.

Las muestras SANDACH se sometieron a los ensayos descritos en la sección de Materiales y Métodos, cuyos resultados se muestran a continuación.

4.2. Producción de gas en las muestras analizadas.

La producción de gas de cada muestra analizada se determinó sumando todas sus medidas individuales de producción, obtenidas siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.3 de la sección de Materiales y Métodos, estos resultados se muestran en la tabla 4.4.

| | Producción de Gas (Ncm³) | Tiempo de Digestión (días) |
|------------|--|---------------------------------------|
| E1* | 1901,22 | 49 |
| E2 | 1758,95 | 30 |
| E3 | 6626,91 | 29 |
| E4 | 7444,73 | 27 |
| E5 | 10139,73 | 15 |

**No se incluyen en la comparación*

Tabla 4.4. “Producción de gas máxima obtenida en Ncm3 en los experimentos realizados”

En el ensayo E1, se detectaron problemas con el medidor inicial de producción de gas, que fue reemplazado por un nuevo sistema de medición. Además, el baño térmico que mantiene la temperatura constante en el interior del reactor se quedó sin agua. Debido a estos inconvenientes, los datos de E1 no se incluirán en la comparación con las otras muestras. El ensayo E5 tuvo que finalizarse prematuramente debido a restricciones de tiempo. Sin embargo, se monitorearon todos los datos hasta el momento de la finalización, por lo que se incluirán en el análisis.

Tal y como se recoge en la Tabla 3.3 y 3.4, E2 y E5 corresponden con ensayos en una sola etapa mientras que el E3 y E4 corresponden con ensayos en dos etapas.

La comparación de los volúmenes de gas producidos en los ensayos de co-digestión anaerobia de E2, E3 y E4 revela diferencias significativas en la eficiencia del proceso a pesar de haberlos realizado bajo las mismas condiciones de *pH* y temperatura, una vez finalizada la primera etapa de los ensayos realizados en dos etapas, y habiendo utilizado como sustrato lodos (ver Tabla

4.4). Los resultados más altos indican la posibilidad de optimizar los parámetros del proceso para maximizar la producción de gas. Estos resultados coinciden con los ensayos desarrollados en dos etapas, donde se observa un aumento de la eficiencia de los microorganismos en la degradación de la materia orgánica, sobre todo en la primera etapa donde se produce la hidrólisis y la acidogénesis.

Ahora bien, el E5 muestra una mejora considerable en cuanto a la producción de gas se refiere gracias a la incorporación de un nuevo sustrato como es la glicerina, además de lodos que si se venía utilizando en experimentos anteriores. También se modificó el ajuste de *pH* a 7,5. En el día nº15 de digestión, la producción acumulada está en 10.139,73 *Ncm*³, lo que supone el valor más alto de los ensayos realizados con un tiempo de digestión mucho menor en comparación con los anteriores. Este aumento está marcado principalmente por el aumento de la eficiencia de las bacterias hidrolíticas para la degradación de materia orgánica.

A continuación, se muestra la evolución de cada uno de los ensayos en la Figura 4.2. En ella se puede ver que las producciones para los experimentos en dos etapas, E3 y E4, tienen un comportamiento similar. E2 presento un comportamiento diferente a los ensayos en dos etapas, mostrando una eficiencia reducida por parte de las bacterias. La adición de un nuevo sustrato en el E5 aumentó la eficiencia de las bacterias, y por tanto este aumento en la eficiencia se vio reflejado en la producción.

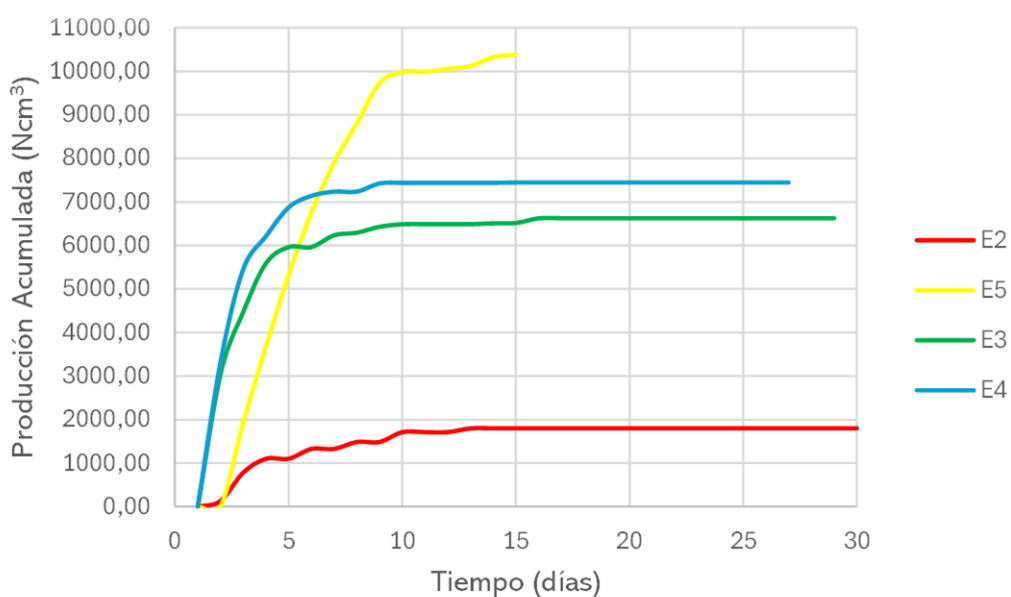


Figura 4.2. “Producción normalizada acumulada en *Ncm*³ para cada uno de los experimentos realizados”

4.2.1. Composición en CH_4 del gas producido por las muestras analizadas.

La determinación de la composición en CH_4 del gas producido se llevó a cabo mediante la cromatografía de gases, tal y como se recoge en el apartado 3.5 de la sección de Materiales y Métodos.

| | CH_4 (%) |
|-----------|------------|
| E2 | 1,58 |
| E3 | 1,31 |
| E4 | - |
| E5 | - |

Tabla 4.5. “Composición en CH_4 del gas producido”

Los ensayos que han sido capaces de obtener CH_4 en la composición del gas producido son el E2 y E3, tal y como se muestra en la Tabla 4.5. Un 1,58% es el porcentaje de CH_4 más alto entre los experimentos realizados correspondiente al E2. Con el ensayo E3 también se obtuvo CH_4 , pero en concentraciones inferiores. Sin embargo, estos porcentajes de metano en el biogás son relativamente bajos en comparación con valores típicos que suelen estar entre el 50% y 70%.

Las bajas concentraciones de metano observadas (1,58% y 1,31%) pueden deberse a varios factores: la composición del sustrato, la presencia de materiales no fácilmente degradables, la falta de nutrientes esenciales o la alcalinidad del medio puede limitar la actividad de los metanógenos. La presencia de inhibidores, como compuestos tóxicos de amoníaco, ácidos grasos volátiles en exceso o metales pesados, pueden inhibir la actividad microbiana responsable de la metanogénesis. Un desequilibrio en la comunidad microbiana, con una insuficiencia de metanógenos, puede resultar en bajas producciones de metano.

Es necesario comentar que en todos los experimentos se obtuvo CO_2 , lo que hace suponer que las poblaciones de bacterias biológicas mayoritarias se deben a bacterias acetogénicas y no metanogénicas. Hay que recordar que estas últimas son las encargadas de la producción de biogás.

A partir de estos resultados obtenidos se va a realizar una evaluación detallada de algunos de los factores mencionados anteriormente para tratar de identificar y corregir las causas de la baja producción de metano, optimizando así el proceso para mejorar la eficiencia y la calidad del biogás producido.

4.2.2. Composición en H_2 del gas producido por las muestras analizadas.

Además de la composición de metano, también se analiza la composición de hidrógeno a través de la misma técnica empleada para conocer la composición del metano, tal y como se recoge en el apartado 3,5 de la sección de Materiales y Métodos.

| | H_2 (%) |
|-----------|-----------|
| E2 | - |
| E3 | 0,18 |
| E4 | 0,23 |
| E5 | 2,23 |

Tabla 4.6. “Composición en H_2 del gas producido”

El estudio de la composición de H_2 del gas producido es importante conocerlo debido a que se apostó por realizar ensayos en dos etapas, cuyo principal objetivo es favorecer en una primera etapa a las bacterias hidrolíticas y en una segunda etapa a las bacterias metanogénicas. En la Tabla 4.6 se muestra la composición de H_2 obtenida cuyo valor más alto para ensayos en dos etapas es de 0,23%, siendo CO_2 la composición resultante del gas obtenido. El % de H_2 obtenido en E3 y E4 se debe principalmente al desarrollo de la primera etapa.

No obstante, con el E5 y teniendo en cuenta las condiciones de partida para este ensayo (ver Tabla 3.3), desde el día nº3 de digestión, la composición del gas estudiada tiene H_2 , alcanzando en el día nº5 de digestión un valor de 2,23%. Este aumento significativo puede deberse al aumento en la eficiencia de las bacterias hidrolíticas gracias al nuevo sustrato añadido. También se debe tener en cuenta la posible acción de las bacterias reductoras de sulfatos en las etapas finales de la digestión. Estas bacterias utilizan sulfatos SO_4^{2-} como aceptor final de electrones en lugar de oxígeno. En ambientes donde hay una presencia significativa de sulfatos, estas bacterias pueden reducir el sulfato a sulfuro de hidrógeno. Es por ello por lo que el aumento de H_2 se debe a esta acción por parte de las bacterias.

4.3. Comportamiento del pH .

Los valores del monitoreo de pH son una representación media de todos los valores de pH correspondientes a un día. La medición de pH se ha realizado según lo establecido en el apartado 3.3 de la sección de Materiales y Métodos.

Con los ensayos E2 y E3 son los únicos en los que hubo producción de metano. En la Figura 4.3 se muestra la comparativa del comportamiento de pH frente a la composición de metano del ensayo E2. En él se observa que la producción comienza en el día nº18 de la digestión con

Daniel Mora Hernández

un *pH* cercano a 7,10. En el día n°22 de digestión se alcanzó el máximo de producción de metano con un valor de $0,40 \text{ Ncm}^3/\text{gSV}$ con un *pH* de 7,6. A partir de este día, la composición de metano en el gas obtenido comenzó a disminuir con unidades de *pH* cercanos a 7,8.

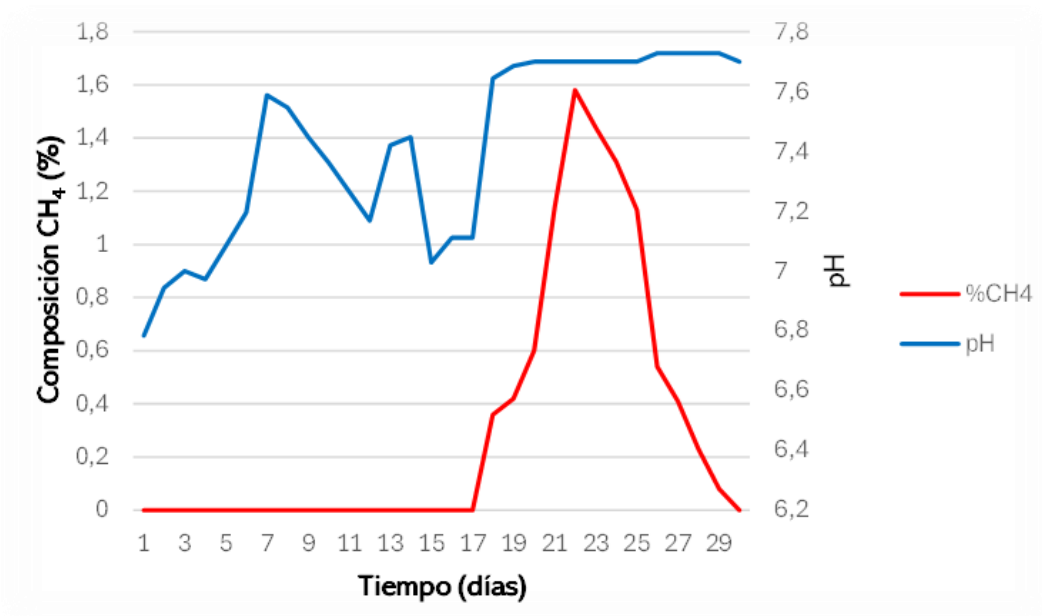


Figura 4.3. “Comparativa del comportamiento de *pH* frente a la composición de metano del ensayo E2”

A continuación, se muestra el comportamiento de *pH* frente a la producción específica de metano del ensayo E3 en la Figura 4.4. La aparición de metano en la composición del gas obtenido comienza a obtenerse a partir del día n°14 de digestión alcanzando una composición máxima de metano en el día n°20 de digestión con un valor de $1,26 \text{ Ncm}^3/\text{gSV}$. El *pH* en este último día de producción máxima de metano estaba en torno 7,5.

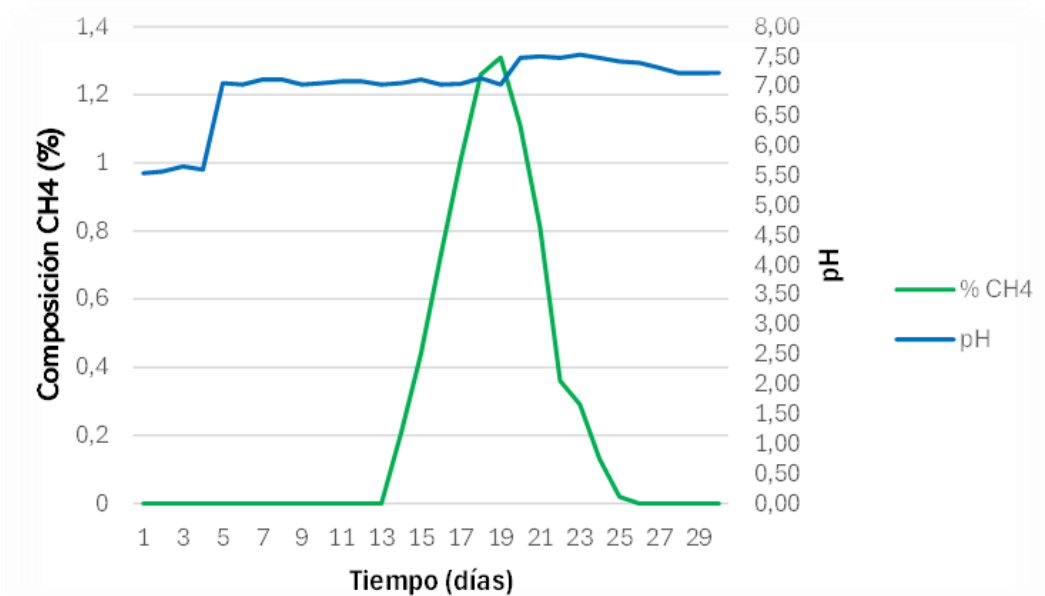


Figura 4.4. “Comparativa del comportamiento de *pH* frente a la producción específica de metano del ensayo E3”

Por tanto, si tenemos en cuenta lo estudiado hasta ahora, se fijan valores de *pH* entre 7,5 y 7,6 en los que hay producción de metano y en los que la eficiencia de las bacterias metanogénicas se ven beneficiadas. Sin embargo, con una variación de *pH* de 0,20 unidades por encima de los valores previamente establecidos, la eficiencia de las bacterias se ven influenciadas negativamente disminuyendo su eficiencia.

En la Figura 4.5 se muestra una comparativa de *pH* entre los ensayos E3 y E4, ambos desarrollados en dos etapas, pero con el inconveniente de que el ensayo E4 no se obtuvo metano en la composición del gas obtenido. El hecho de no haber producción de metano puede deberse a la variación de *pH* que se produce en el cambio de la primera etapa a la segunda etapa donde se alcanzan valores de *pH* superiores a 7,6. Estos valores, después de lo estudiado anteriormente demuestran baja eficiencia por parte de las bacterias metanogénicas.

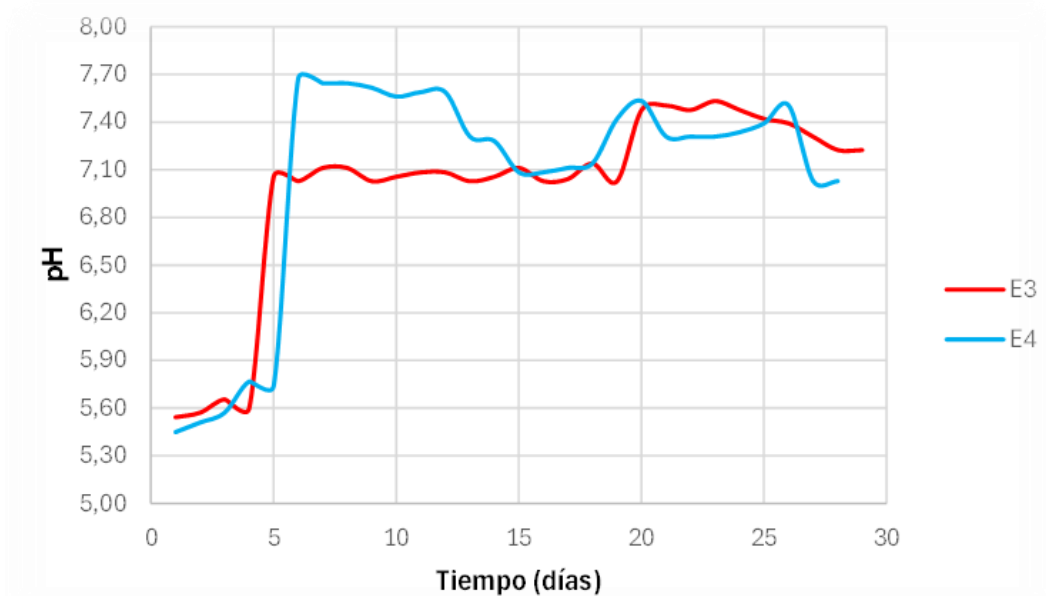


Figura 4.5. “Comparativa del comportamiento de pH del ensayo E3 y E4”

4.4. Análisis de las alcalinidades y la concentración de ácidos grasos volátiles.

El análisis de las diferentes alcalinidades y las concentraciones de ácidos grasos volátiles se establecieron bajo el criterio establecido en los apartados 3.8 y 3.9 de la sección de Materiales y Métodos. Los valores de la titulación de las muestras de cada uno de los ensayos después de la digestión se muestran a continuación:

| | $\frac{\text{AGV}}{\text{mg AGV}}$ | $\frac{\text{AP}}{\text{mg CaCO}_3}$ | $\frac{\text{AI}}{\text{mg CaCO}_3}$ | $\frac{\text{AT}}{\text{mg CaCO}_3}$ | AGV/AT | AI/AP |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|-------|
| | L | L | L | L | | |
| E2 | 14065 | 10425 | 6900 | 17325 | 0,81 | 0,66 |
| E3 | 11527 | 8425 | 4900 | 13325 | 0,87 | 0,58 |
| E4 | 11139 | 9025 | 5025 | 14050 | 0,79 | 0,56 |
| E5 | 9729 | 9375 | 4725 | 14100 | 0,69 | 0,50 |

Tabla 4.7. “Valores obtenidos de alcalinidades y AGV, así como determinadas ratios después del análisis de las muestras”

La ratio AGV/AT del E2, E3 y E4 de la Tabla 4.7 muestra que el proceso es inestable debido a que la capacidad amortiguación está casi equilibrada con la carga ácida. Los valores del E5 demuestran que el cambio de pH y la incorporación de un nuevo sustrato en la digestión indican una mejora en el proceso, aunque todavía no es un proceso seguro. La alta concentración de AGV sugiere que la actividad de las bacterias acidogénicas es elevada, mientras que las bacterias metanogénicas pueden estar inhibidas o no estar trabajando al ritmo necesario para

convertir esos ácidos en metano. A pesar de la alta alcalinidad, la acumulación de AGV muestra que el sistema está en el límite de su capacidad amortiguadora.

La relación Al/AP también demuestra que los ensayos presentan cierta inestabilidad debido a sus valores superiores a 0,3. Lo dicho anteriormente del E5 se reafirma con el estudio de esta relación.

Así pues, la alcalinidad intermedia que está relacionada con la concentración de AGV acumulada comenzó con un valor de $6.900 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ con la digestión en una etapa, mientras que con la digestión en dos etapas se obtuvieron valores entre $4.900 - 5.100 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$, confirmando una mejora en comparación con una digestión en una etapa. Aunque la AI para el E5 no varía en relación con los E3 y E4, es necesario mencionar la mejoría significativa que hay si se compara con el E2 con una reducción aproximada de un 32%.

4.5. Análisis del contenido en sólidos de los experimentos realizados.

El análisis de la composición del sustrato implica una comparación visual que permite observar el comportamiento de la fermentación al inicio y al final del proceso. Para este análisis, se siguieron los criterios establecidos en el apartado 3.6 de la sección de Materiales y Métodos.

La Tabla 4.8 muestra los valores correspondientes a cada uno de los ensayos realizados, así como los valores de sólidos volátiles, que son teóricamente los transformados en CH_4 y CO_2 . Utilizando los datos obtenidos, se calcularon las reducciones de estos sólidos para determinar su evolución durante el proceso de digestión.

| | Antes de la digestión | | | Después de la digestión | | | |
|-----------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|--------|--------|---------------|
| | ST (%) | SV (%) | SF (%) | ST (%) | SV (%) | SF (%) | Reducción (%) |
| E2 | 31,61 | 91,93 | 8 | 9,64 | 76,16 | 23,84 | 17,15 |
| E3 | 35,30 | 94,44 | 5,56 | 7,21 | 76,39 | 18,06 | 19,11 |
| E4 | 35,30 | 94,44 | 5,56 | 7,85 | 75 | 25 | 20,58 |
| E5 | 55,57 | 97,89 | 2,12 | 23,85 | 72,25 | 27,75 | 26,19 |

Tabla 4.8. “Contenido en sólidos de las muestras analizadas antes y después de la digestión”

Según los datos obtenidos, E5 debe ser el que mayor producción de gas obtuvo, seguido del E4 y E3, siendo el E2 el que menor producción se obtuvo. Estos datos se confirman con la Tabla 4.4. Teniendo en cuenta las reducciones que se han producido en cada uno de los ensayos y comparándolas con las composiciones de CH_4 en los E2 y E3, el componente predominante en la composición del gas es el CO_2 .

Los altos porcentajes de sólidos volátiles antes de la digestión confirman que las muestras son altamente biodegradables, según diferentes fuentes bibliográficas consultadas.

| | Prod. Específica Gas (Ncm^3 / gSV) | Prod. Específica CH_4 (Ncm^3 / gSV) | Prod. Específica H_2 (Ncm^3 / gSV) |
|-----------|--|--|---|
| E2 | 25,45 | 2,35 | - |
| E3 | 96,30 | 7,39 | 0,22 |
| E4 | 100,43 | - | 0,59 |
| E5 | 107,53 | - | 15,99 |

Tabla 4.9. “Producciones específicas del gas obtenido, así como las producciones específicas de metano e hidrógeno”

La Tabla 4.9 muestra la producción normalizada (Ncm^3) en relación con los gramos de sólidos volátiles consumidos (gSV). Es relevante destacar que las producciones específicas de CH_4 obtenidas en este estudio son notablemente bajas, en relación con las registradas en la bibliografía para SANDACH similares. Esto es especialmente evidente en las muestras de SANDACH ganaderos, cuyas producciones específicas de CH_4 varían entre $2 cm^3/gSV$ y $8 Ncm^3 / gSV$, en contraste con las producciones reportadas de $600 Ncm^3 / gSV$ a $900 Ncm^3 / gSV$ para SANDACH porcinos y vísceras avícolas obtenidas bajo condiciones mesofílicas (Hejnfelt & Angelidaki, 2009; Salminen & Rintala, 2002).

4.6. Análisis elemental de los experimentos realizados.

El análisis elemental de las muestras previas a la digestión se realizó según lo establecido en el apartado 3.7 de la sección de Materiales y Métodos.

| | C: N (%) |
|-----------|-----------------|
| E2 | 14:1 |
| E3 | 19:1 |
| E4 | |
| E5 | * |

*No ha llegado a tiempo el análisis.

Tabla 4.10. “Relación C: N de las muestras previas a la digestión”

En la Tabla 4.10 se recoge la relación C:N de las muestras previas a la digestión. Las proporciones iniciales de cada residuo están hechas de tal forma que se alcance una relación de 20:1. En el E2, la relación es de 14:1, siendo una relación próxima a la que tiene los residuos del ganado porcino (ver Tabla 4.2). Este valor bajo se puede justificar como consecuencia de la muestra escogida para la realización del análisis, lo cual es posible que contenga una mayor concentración de residuos de ganado porcino a pesar de estar la muestra homogeneizada. La

mezcla de residuos frescos para E3 y E4 fue la misma, de ahí que su relación sea de 19: 1. Este valor cercano a una relación de 20: 1 está en buen acuerdo con los datos bibliográficos. Además, el E3 es el ensayo donde se produjo una mayor producción acumulada de metano alcanzando un volumen de $7,39 \text{ Ncm}^3/\text{gSV}$.

4.7. Estimación de la generación energética a partir de SANDACH producidos en la isla de Tenerife.

La estimación energética se obtiene a través de los cálculos establecidos en el apartado 3.11 de la sección Materiales y Métodos.

| | Prod. Esp. CH_4 ($\text{Ncm}^3 / \text{gSV}$) | M_{RES} (t) | ET (KWh) | $ET_{TEÓ}$ (KWh) |
|-----------|---|---------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| E2 | 2,35 | 6153 | 145,97 | $2,24 \cdot 10^7$ |
| E3 | 7,39 | | 459,07 | |

Tabla 4.11. “ET y $ET_{TEÓRICA}$ para los experimentos E2 y E3”

El consumo medio anual de energía de un hogar español es de 3.487 kWh . Este dato nos proporciona un punto de referencia para evaluar la viabilidad y la eficiencia de los experimentos de digestión anaerobia que llevamos a cabo.

Estos experimentos subrayan la importancia de la investigación y desarrollo en tecnologías de biogás. La energía obtenida de los dos experimentos de digestión anaerobia, aunque limitada en su capacidad para cubrir el consumo anual completo de un hogar, demuestra el potencial de esta tecnología. El primer experimento cubrió el 4,19% del consumo medio anual, mientras que el segundo experimento mejorado cubrió el 13,17%. Estos resultados son un paso en la dirección correcta y sugieren que, con más investigación y optimización, la digestión anaerobia puede convertirse en una fuente viable y significativa de energía renovable para los hogares en la isla de Tenerife.

Ahora bien, la energía teórica que podrían generar las 6.153 toneladas de residuos SANDACH producidos anualmente en la isla de Tenerife se estima en $22,4 \text{ millones}$ de kWh (ver Tabla 4.11). Esta cantidad de energía cubriría aproximadamente 643 veces el consumo medio anual de un hogar en España. Comparado con los resultados obtenidos en los experimentos, esta cifra muestra el enorme potencial que tiene la digestión anaerobia cuando se aplica a gran escala y se optimizan los procesos.

Daniel Mora Hernández

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones.

1. En Tenerife, la generación anual de Subproductos Animales No Destinados Al Consumo Humano (SANDACH) es suficiente para considerar la digestión anaerobia como una alternativa viable a la eliminación tradicional en vertederos. Esta técnica podría revalorizar energéticamente estos subproductos, ayudando a aumentar la producción de energía renovable y gestionable en la isla y alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible de la Unión Europea y abandonar la consideración de Zona Remota de la isla. La mayor parte de estos SANDACH son subproductos avícolas, que constituyen aproximadamente el 80% de la producción anual en la isla.
2. El análisis de composición de los gases indica que no se ha obtenido biogás debido a los bajos porcentajes de metano. Sin embargo, se han obtenido cantidades considerables de dióxido de carbono desde el comienzo de la digestión en cada uno de los ensayos realizados. A través de la conversión de CO_2 usando hidrógeno renovable se puede obtener metanol y dimetil éter (DME) para ser transformados en productos químicos valiosos y biocombustibles.
3. El comportamiento de pH en los ensayos donde se obtuvo metano demuestra que unidades de pH superiores a 7,65 reduce la acción de las bacterias metanogénicas.
4. La producción de gas en los ensayos reveló que la co-digestión en dos etapas (E3 y E4) fue más eficiente que en una sola etapa (E2). Sin embargo, el ensayo E5, que incorporó un nuevo sustrato y ajustes en el pH , mostró la producción más alta con un tiempo de digestión menor.
5. Los valores de alcalinidades y la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) mostraron que el proceso es inestable, con la capacidad de amortiguación casi equilibrada con la carga ácida. El ensayo E5, aunque mostró mejoras, aún indicó la necesidad de optimizar el proceso para asegurar su estabilidad y eficiencia.
6. El análisis de sólidos volátiles de cada una de las muestras demuestra que son altamente biodegradables.
7. Los resultados preliminares sugieren que hay un potencial significativo para ampliar y escalar el proceso de co-digestión anaerobia en Tenerife. Sin embargo, se necesita una mayor investigación y pruebas a mayor escala para confirmar la viabilidad técnica y económica de este enfoque a nivel industrial.

5.2. Conclusions.

1. In Tenerife, the annual generation of Animal By-products Not Destined for Human Consumption (SANDACH) is enough to consider anaerobic digestion as a viable alternative to traditional disposal in landfills. This technique could energetically revalue these by-products, helping to increase the production of manageable renewable energy on the island and align with the sustainable development objectives of the European Union and abandon the consideration of Remote Zone of the island. Most of these SANDACH are poultry by-products, which constitute approximately 80% of the annual production on the island.
2. The analysis of the composition of the gases indicates that no biogas has been obtained due to the low percentages of methane. However, considerable amounts of carbon dioxide have been obtained since the beginning of digestion in each of the tests carried out. Through CO_2 conversion using renewable hydrogen, methanol and dimethyl ether (DME) can be transformed into valuable chemicals and biofuels.
3. The *pH* behaviour in the tests where methane was obtained shows that *pH* units higher than 7.65 reduces the action of methanogenic bacteria.
4. Gas production in the tests revealed that co-digestion in two stages (E3 and E4) was more efficient than in a single stage (E2). However, the E5 test, which incorporated a new substrate and *pH* adjustments, showed the highest production with a shorter digestion time.
5. The alkalinity values and the concentration of volatile fatty acids (VGA) showed that the process is unstable, with the cushioning capacity almost balanced with the acid charge. The E5 trial, although it showed improvements, still indicated the need to optimise the process to ensure its stability and efficiency.
6. The analysis of volatile solids of each of the samples shows that they are highly biodegradable.
7. Preliminary results suggest that there is significant potential to expand and escalate the anaerobic co-digestion process in Tenerife. However, more research and tests on a larger scale are needed to confirm the technical and economic feasibility of this approach at the industrial level.

6. RECOMENDACIONES

Se sugieren las siguientes propuestas para futuras investigaciones de este tipo:

1. El uso de inóculos en la investigación de digestión anaerobia a partir de residuos SANDACH (Subproductos Animales No Destinados a Consumo Humano) es fundamental para mejorar la eficiencia del proceso y obtener mejores producciones de biogás y metano. Los inóculos contienen una población microbiana activa y diversificada que puede acelerar el proceso de descomposición de la materia orgánica, reduciendo el tiempo de retención hidráulica y permitiendo una conversión más rápida de los residuos en biogás. Además, la presencia de inóculos optimiza la comunidad microbiana, asegurando un equilibrio adecuado entre las diferentes etapas de la digestión anaerobia (hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica), lo que resulta en una producción más eficiente y estable de biogás.
2. El monitoreo diario de los AGV y las alcalinidades para asegurar un mayor control en la evolución del proceso e identificar posibles desequilibrios que puedan afectar a la capacidad del digestor de poder llevar a cabo una fermentación estable.
3. La investigación de nuevos sustratos diversos para incorporarlos a la digestión anaerobia de residuos SANDACH y optimizar la producción de biogás y aumentar la estabilidad del proceso.
4. La investigación de mezclas de residuos frescos con relaciones de $C:N$ superiores a 20:1, teniendo como límite una relación de 35:1.

Daniel Mora Hernández

7. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Aguilera, E. A. R. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica FAREM Estelí*, 24, 60-81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- ❖ Arrieche, L. E. A. H. (2022). *Estudio preliminar de la aportación al autoabastecimiento Energético de Procesos de Digestión Anaerobia de Residuos SANDACH*. Universidad de La Laguna.
- ❖ Balteanu, I., & Viani, F. (2023, 22 junio). *La dependencia energética de la Unión Europea y de España*. <https://repositorio.bde.es/handle/123456789/30252>
- ❖ Boone, D. R., & Xun, L. (1987). Effects of *pH*, Temperature, and Nutrients on Propionate Degradation by a Methanogenic Enrichment Culture. *Applied And Environmental Microbiology*, 53(7), 1589-1592. <https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/aem.53.7.1589-1592.1987>
- ❖ Callaghan, F., Wase, D., Thayanithy, K., & Forster, C. (2002). Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass & Bioenergy*, 22(1), 71-77. [https://doi.org/10.1016/s0961-9534\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/s0961-9534(01)00057-5)
- ❖ Cantos, J. O. (2009). Cambio y riesgos climáticos en España. *Investigaciones Geográficas/Investigaciones Geográficas*, 49, 197. <https://doi.org/10.14198/ingeo2009.49.10>
- ❖ Cantos, J. O., & Vera-Rebollo, J. F. (1970). Adaptación del sector turístico al cambio climático en España. La importancia de las acciones a escala local y en empresas turísticas. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 36(2), 321-349. <https://doi.org/10.5209/aguc.53588>

Daniel Mora Hernández

- ❖ Cantos, J. O., & Vera-Rebollo, J. F. (2016). Cambio climático y política turística en España: diagnóstico del litoral mediterráneo español. *Cuadernos de Turismo*, 38, 327. <https://doi.org/10.6018/turismo.38.1471> de La Laguna.
- ❖ Flórez, Á. M. W. (2015). Biocombustibles: ¿son realmente amigables con el medio ambiente? *Revista Colombiana de Bioética/Revista Colombiana de Bioética*, 6(1), 89. <https://doi.org/10.18270/rcb.v6i1.819>.
- ❖ Franchescolet, N. P. L. (2017). *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales*. <https://pirhua.udep.edu.pe/items/873d3dce-8188-4744-a1f6-e4d853e0f561>
- ❖ Gene P. & Owen W. (1986). Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. *Journal of Environmental Engineering* 112:867-916
- ❖ Gerardi, M. H. (2003). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1570594>
- ❖ Goldraij, A. (2023). Diseño y código técnico en la producción de biocombustibles a partir de plantas. Un análisis desde la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg. *Revista Iberoamericana de Ciencia Tecnología y Sociedad/CTS. Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 18(54), 153-173. <https://doi.org/10.52712/issn.1850-0013-357>
- ❖ Hejnfelt, A.; Angelidaki, I. Anaerobic Digestion of Slaughterhouse By-Products. *Biomass and Bioenergy* 2009, 33 (8), 1046–1054.
- ❖ Hori, T., Akuzawa, M., Haruta, S., Ueno, Y., Ogata, A., Ishii, M., & Igarashi, Y. (2014). Involvement of a novel fermentative bacterium in acidification in a thermophilic anaerobic digester. *FEMS Microbiology Letters*, 361(1), 62-67. <https://academic.oup.com/femsle/article/361/1/62/2908294>

- ❖ Jiménez, M. S., Laville, E. G., & Driha, O. M. (2020). Las energías renovables en España. *Estudios de Economía Aplicada*, 31(1), 35-58.
<https://doi.org/10.25115/eea.v31i1.3260>
- ❖ José Aythami, P. R. (2017). *Aprovechamiento energético de los residuos de purines de animales y lodos de depuradora*. Universidad de la Laguna.
<https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/5830>
- ❖ Lugones, B. (2001). Análisis de biodigestores en funcionamiento. Habana, Cuba.
- ❖ Manrique, A. A., Calderón, M. E., & Botero, M. C. B. (2023). Modelo de evaluación de escenarios para la producción y venta de energía eléctrica generada a partir de biogás de rellenos sanitarios en Colombia. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.2945>
- ❖ Marquina, J., Colinet, M. J., & Del P Pablo-Romero, M. (2021). Measures to Promote Olive Grove Biomass in Spain and Andalusia: An Opportunity for Economic Recovery against COVID-19. *Sustainability*, 13(20), 11318. <https://doi.org/10.3390/su132011318>
- ❖ Mata-Álvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- ❖ *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/>
- ❖ Moestedt, J., Müller, B., Nagaraj, Y. N., & Schnürer, A. (2020). Acetate and Lactate Production During Two-Stage Anaerobic Digestion of Food Waste Driven by *Lactobacillus* and *Aeriscardovia*. *Frontiers In Energy Research*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00105>

Daniel Mora Hernández

- ❖ Molina, F., Ruiz-Filippi, G., Garcia, C., Lema, J. M., & Roca, E. (2009). Pilot-Scale Validation of a New Sensor for On-Line Analysis of Volatile Fatty Acids and Alkalinity in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. *Environmental Engineering Science*, 26(3), 641-649. <https://www.lba.ucv.cl/Molina,%202009.pdf>
- ❖ Nuchdang, S., & Phalakornkule, C. (2012). Anaerobic digestion of glycerol and co-digestion of glycerol and pig manure. *Journal Of Environmental Management*, 101, 164- 172. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.031>
- ❖ Palavecino, A. C., Herrera, A. C., De Pinto, M. I. S., & Sogari, N. (2019). Rendimiento en la producción de biogás a partir de la co-digestión anaeróbica de estiércol vacuno y maíz. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 331. <https://doi.org/10.30972/eitt.503769>
- ❖ Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of Anaerobic Treatment. *Water Science & Technology*, 24(8), 35-59. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0217>
- ❖ Peces, M., Astals, S., & Mata-Alvarez, J. (2014). Assessing total and volatile solids in municipal solid waste samples. *Environmental Technology*, 35(24), 3041-3046. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.929182>
- ❖ Peece, R. E. (1983). Biotechnology for anaerobic waste treatment. *Science and Technology* (17), 416A - 427A.
- ❖ Pérez, A., & Torres, P. (2011). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad Revista Científica y Tecnológica/Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52. <https://doi.org/10.25100/iyc.v10i2.2473>
- ❖ Pinto, A. D., González, E. P., & Ramírez, G. G. (2022). Sistema de gestión de energía para una microrred con almacenamiento en baterías e incorporación de biomasa. *TecnoLógicas*, 25(54), e2356.

- ❖ Salminen, E.; Rintala, J. Anaerobic Digestion of Organic Solid Poultry Slaughterhouse Waste - a Review. *Bioresource Technology* 2002, 83 (1), 13–26.
- ❖ Segura, F. J. R., & Ignatieva, M. F. (2021). Los contextos institucionales de la transición energética en España y Hungría: La diversidad de un objetivo comunitario. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles/Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. <https://doi.org/10.21138/bage.3130>
- ❖ Servicio de Espectrometría de Masas y Análisis Elemental. Espectrometría de Masas y Análisis Elemental. <https://www.ull.es/servicios/segai/servicios/espectrometria-masasanalisis-elem/> (accessed 2022-06-27).
- ❖ Siebels, A. M., & Long, S. C. (2013). Foaming Phenomenon in Bench-Scale Anaerobic Digesters. *Water Environment Research*, 85(4), 363-373. <https://doi.org/10.2175/106143013x13596524516220>
- ❖ Van Lier, J. B., Martin, J. L. S., & Lettinga, G. (1996). Effect of temperature on the anaerobic thermophilic conversion of volatile fatty acids by dispersed and granular sludge. *Water Research*, 30(1), 199-207. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00107-y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00107-y)
- ❖ Vargas, R.C. (2013). Biorrefinerías para la producción de biocombustibles de segunda generación., (p. 23). <https://doi.org/10.4995/thesis/10251/27803>
- ❖ Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información Tecnológica*, 23(2), 31-40. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642012000200005>
- ❖ Veana, F., González-Purata, P. Y., Wong-Paz, J. E., Aguilar-Zárate, P., & Muñoz-Márquez, D. B. (2019). Tendencias de la bioenergía: del metagenoma de hábitats ricos

Daniel Mora Hernández

en azufre a la purificación del biogás. *Deleted Journal*, 22.

<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.190>

- ❖ Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- ❖ Wellinger, A., Murphy, J. D., & Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook Science, Production and Applications*. Amsterdam Elsevier. - References - Scientific Research Publishing. (s. f.).
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2925723>
- ❖ World Bank Open Data. (s. f.). World Bank Open Data.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>
- ❖ Zeikus, J. (1979). Thermophilic bacteria: Ecology, physiology and technology. *Enzyme And Microbial Technology*, 1(4), 243-252. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(79\)90043-7](https://doi.org/10.1016/0141-0229(79)90043-7)
- ❖ Zeikus, J. G., & Wolfe, R. S. (1973). Fine Structure of Methanobacterium thermoautotrophicum: Effect of Growth Temperature on Morphology and Ultrastructure. *Journal Of Bacteriology*, 113(1), 461-467.
<https://doi.org/10.1128/jb.113.1.461-467.1973>