



---

**Universidad de Valladolid**

**Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal,  
Agronómica y de la Bioenergía**

**Campus de Soria**

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**TÍTULO: Valorización de subproductos orgánicos de la comarca de Medina de Rioseco en forma de ácidos grasos volátiles**

~~~~~

**AUTOR: Estefanía Campos Morales**

**DEPARTAMENTO: Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente**

**TUTOR/ES: Israel Díaz Villalobos e Ignacio de Godos Crespo**

**SORIA, julio de 2024**

Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía

Campus de Soria

Máster en Ingeniería de la Bioenergía y Sostenibilidad Energética

Trabajo Fin de Máster

Título: Valorización de subproductos orgánicos de la comarca de Medina de Rioseco en forma de ácidos grasos volátiles

Autor: Estefanía Campos Morales

Departamento: Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente

Tutores: Israel Díaz Villalobos e Ignacio de Godos Crespo

Soria, julio de 2024

## AGRADECIMIENTOS

A mi hermana, por estar siempre presente y apoyándome en cada paso que doy.

A Rober, por no haber dudado de mis logros y ser el pilar de mi vida estos últimos 10 años.

A todos mis compañeros de Cartif, por hacerme las prácticas tan llevaderas y productivas.

A mis tutores, especialmente Israel, por todas las facilidades e ideas aportadas en este TFM.

PALABRAS CLAVE: Sostenibilidad; Economía circular; Valorización de residuos.

## ACRÓNIMOS

AGVs: Ácidos grasos volátiles

DA: Digestión anaerobia

EDAR: Estación depuradora de aguas residuales

GEIs: Gases de efecto invernadero

PHAs: Polihidroxiacidos

SANDACH: Subproductos animales no destinados al consumo humano

OLR: Organic Loading Rate

THR: Tiempo de residencia hidráulica

TFM: Trabajo fin de máster

## Valorización de subproductos orgánicos de la comarca de Medina de Rioseco en forma de ácidos grasos volátiles

### RESUMEN

El presente trabajo refleja el planteamiento y justificación de una planta de codigestión anaerobia ubicada en un matadero industrial. Se basa en la necesidad de su implantación, dada la gran cantidad de residuos que se generan en este tipo de instalaciones y los impactos ambientales que estos generan. De esta manera se contribuye al modelo de economía circular, y revalorización de desechos, evitando su deposición en vertederos municipales.

De igual modo, en la zona existe otro foco de producción de residuos que han de ser gestionados, la Estación Depuradora y Potabilizadora de la zona. Por ello se propone una codigestión con ambos desechos para optimizar las instalaciones del digestor y aprovechar estos dos residuos de gran potencial.

El subproducto principal que se plantea obtener en este trabajo son ácidos grasos volátiles, concretamente los ácidos propiónico y valérico por ser los que se utilizarán principalmente en la producción de PHAs, plásticos biodegradables.

Mediante el proceso propuesto, se producirían alrededor de 12 toneladas de ácido propiónico, 6 toneladas de ácido valérico y 730 toneladas de fertilizante al año.

Se ha diseñado un proceso de **valorización de residuos** tipo SANDACH y lodos EDAR. Creando un diagrama de flujo explicando los pasos del proceso. También se ha dimensionado el digestor anaerobio necesario para este proceso concreto, teniendo en cuenta las cantidades de desechos que se generan actualmente.

Con ello se conseguirá reducir el impacto ambiental de la empresa cárnica y la depuradora de la zona. Colaborando en la sostenibilidad y gestión de sus desechos.

## ABSTRACT

The present work reflects the approach and justification of an anaerobic codigestion plant located in an industrial slaughterhouse. It is based on the need for its implementation, given the large amount of waste that is generated in this type of facilities and the environmental impacts that they generate. In this way, we contribute to the circular economy model and revaluation of waste, avoiding its disposal in municipal landfills.

Likewise, in the area there is another source of waste production that must be managed, the Purification and Water Treatment Plant in the area. For this reason, co-digestion with both wastes is proposed to optimize the digester facilities and take advantage of these two wastes with great potential.

The main byproduct that is proposed to be obtained in this work are volatile fatty acids, specifically propionic and valeric acids as they are the ones that will be used mainly in the production of PHAs, biodegradable plastics.

Through the proposed process, around 12 tonnes of propionic acid, 6 tonnes of valeric acid and 730 tonnes of fertilizer would be produced annually.

A process for the recovery of SANDACH type waste and WWTP sludge has been designed. Creating a flowchart explaining the steps of the process. The anaerobic digester necessary for this specific process has also been sized, taking into account the quantities of waste currently generated.

This will reduce the environmental impact of the meat company and the treatment plant in the area. Collaborating in the sustainability and management of your waste.



**Universidad de Valladolid**

**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER \***

D./D.ª Estefanía Campos Morales

con DNI/pasaporte  y estudiante del Máster en

de la (SO) Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía

de la Universidad de Valladolid, del curso  como autor/a del TFM titulado:

**DECLARO QUE:**

El trabajo que presento para su exposición y defensa es original y no he utilizado fuentes de información, sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía.

Asimismo, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos términos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Valladolid, a 12 de julio de 2024

Firma:

\*Reglamento sobre la elaboración y evaluación del trabajo de fin de máster, artículo 2.1: El TFM ha de ser original e inédito y debe ser realizado por el estudiante bajo la supervisión y la orientación de su correspondiente tutor académico.

# 1. ÍNDICE

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1. ÍNDICE.....                                               | 6  |
| 2. INTRODUCCIÓN .....                                        | 7  |
| 2.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA .....                            | 8  |
| 2.2. ESTADO DEL ARTE.....                                    | 10 |
| 2.2.1. EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) .....  | 10 |
| 2.2.2. CARACTERÍSTICAS LODOS EDAR .....                      | 10 |
| 2.2.3. DIGESTIÓN ANAEROBIA .....                             | 11 |
| 2.2.4. OBTENCIÓN ÁCIDOS GRASOS .....                         | 12 |
| 2.2.5. OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE AGVs.....               | 13 |
| 3. ALCANCE .....                                             | 15 |
| 4. OBJETIVOS .....                                           | 16 |
| 5. METODOLOGÍA.....                                          | 17 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                              | 18 |
| 6.1. EMPRESA CÁRNICA SELECCIONADA.....                       | 18 |
| 6.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL CONTENIDO RUMIAL.....             | 20 |
| 6.2. EDAR MEDINA DE RIOSECO .....                            | 22 |
| 6.3. CODIGESTIÓN ANAEROBIA CONTENIDO RUMIAL+LODOS EDAR ..... | 23 |
| 6.4. DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO .....                      | 26 |
| 6.4.1. CÁLCULOS DIGESTOR ANAEROBIO .....                     | 26 |
| 6.4.2. CÁLCULOS DE LAS CORRIENTES DE DIGESTATO .....         | 29 |
| 7. CONCLUSIONES .....                                        | 30 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA.....                                         | 31 |

## 2. INTRODUCCIÓN

El actual momento de transición energética en el que nos encontramos inmersos, es un camino de obligado cumplimiento. Aparte de la necesidad de mitigar el efecto invernadero, mediante la disminución de GEIs que estamos emitiendo actualmente por el uso de combustibles fósiles, también es una realidad que este tipo de recursos son finitos, y cada vez está más cerca la fecha en la que se van a acabar.

Según un informe sobre el “Agotamiento de las Reservas” de la Dirección General de Energía y Minería de la Junta de Castilla y León, se estima que el fin del petróleo llegará en unos 40-50 años si la humanidad continúa consumiendo petróleo a este ritmo. Y por ello, probablemente, al acercarse la fecha, cada vez sea mucho más caro y su uso será más inaccesible económicamente para determinados sectores.

Esto hace patente un cambio urgente en la producción actual de envases plásticos que hasta ahora se han venido realizando mayormente con hidrocarburos provenientes del petróleo crudo. Además, los envases plásticos han supuesto un problema medio ambiental muy grave. La sociedad está empezando a ser consciente de cómo se acumula este residuo durante años sin degradarse, y se convierte en micro plásticos que están llegando a nuestra cadena alimenticia.

Aunque cada vez más empresas intentan reducir sus embalajes, o cambiarles por los realizados en cartón y papel. Hay ciertos productos que necesitan ser envasados con materiales que resistan a la humedad y las altas temperaturas.

Por ello, los plásticos biodegradables son la solución más ecológica. Y es necesario encontrar vías de producción de bioplásticos, que no supongan una competencia con materias primas alimentarias. Ya que hoy en día la mayor parte de los bioplásticos se realizan con almidón, caña de azúcar y celulosa.

En este caso, los AGVs son los precursores de bioplásticos más sostenible si los obtenemos como se plantea en el trabajo, al no competir con la alimentación, ni con la agricultura, ya que provienen de vías de reciclaje.

Otro motivo de la necesidad de encontrar nuevas vías de producción es que actualmente no salen rentables por el sustrato utilizado, por ello, usar residuos como materia prima es un proceso de bajo coste y una opción prometedora.

Este TFM está realizado en base a los datos de productividad y residuos de una empresa real. Pero podría adaptarse a cualquier empresa del sector incluso con residuos de otro tipo, tras un estudio de biodegradabilidad de estos y de optimización de producción de los subproductos, en este caso, los ácidos grasos volátiles.

En el caso de las empresas cárnicas, más concretamente mataderos, existe un problema ambiental derivado de los desechos que se generan, tanto por el tipo, como por la cantidad (Henao y col. 2023).

En este sentido, el aprovechamiento de los residuos es una gran oportunidad, principalmente por motivos medio ambientales y legislativos, pero a nivel económico para las empresas supone una reducción de gasto e incluso unos ingresos adicionales.

## 2.1. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La elección del tema de este trabajo se llevó a cabo al comenzar las prácticas del Máster en Cartif, donde he realizado diferentes ensayos para optimizar la producción de ácidos grasos volátiles para la elaboración de bioplásticos.

El proyecto europeo en el que he colaborado se denomina Ellipse, y se está trabajando conjuntamente con diferentes empresas europeas. Cada una de ellas aporta unos roles o funciones diferentes del ciclo completo, desde la obtención del contenido rumial hasta la producción de bioplásticos.

El papel de Cartif, en este caso, es realizar distintas digestiones anaerobias, y analizar la cantidad de ácidos grasos que se van produciendo. En estas digestiones se combinan diferentes parámetros de concentraciones de sólidos volátiles, pH, tiempos de digestión, adicción de partículas, etc. En todo este proceso, se obtienen muestras y se va analizando la cantidad y tipo de ácidos grasos obtenidos para poder ir documentando y sacando conclusiones sobre las condiciones más óptimas de producción.

Con los distintos sustratos que he ido utilizando, y tras documentarme sobre su origen y necesidad de reciclaje, opté por plantear un matadero cercano a una población a la que afecta la generación de sus residuos, y con ello desarrollar una solución sostenible y creadora de valor económico y ecológico.

Además, como este tipo de empresas es muy común, creo que es necesario plantear distintas opciones de tratamiento de residuos para abrir el abanico de posibilidades y aunque puede que en un inicio no salga tan rentable como la opción más convencional, el biogás; habría que estar preparado para los cambios que puedan surgir en el mercado, y futuras necesidades.

Hay que mencionar que este proceso va alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En este caso, se podría englobar en varios de los 17 Objetivos:

***Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento.***

Reduciendo la contaminación, vertidos, y aumentando el reciclaje del agua. Apoyando también a que las comunidades locales mejoren su gestión del agua.

***Objetivo 9: Industria, innovación e Infraestructura.***

Promoviendo una industria sostenible basada en la investigación.

***Objetivo 12: Producción y consumo responsables.***

Mediante la gestión ecológica de los desechos reduciendo, reciclando y reutilizándolos.

## 2.2. ESTADO DEL ARTE

### 2.2.1. EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales)

Según una publicación de la empresa SITRA (Soluciones Industriales y Tratamientos Ambientales), para el proyecto europeo WaterReuse *“El tratamiento de los lodos generados en los procesos primarios y secundarios de las EDAR constituye una parte fundamental de las plantas, dado que la producción de estos residuos implica tener que gestionarlos para evacuarlos de la explotación. El coste de la gestión de los lodos puede llegar a suponer un 50% de los costes de explotación de la depuradora”* (Donato y col. 2015)

Por ello, poder realizar un tratamiento a los lodos que se producen en la misma comarca, produce un valor añadido a la región. Ya que por un lado disminuyen los costes de un servicio público de primera necesidad, pudiendo invertir en otros recursos. Y por otro, se pueden beneficiar directamente los habitantes de la zona de uno de los subproductos generados. En este caso, sería el digestato rico en N y P para nutrir suelos agrícolas o de parques y jardines.

Otro beneficio muy importante es el valor medio ambiental, al disminuir los olores emitidos por los residuos acumulados, y disminución de vertidos a los suelos.

Las estaciones depuradoras, al estar ya obligadas a realizar análisis a los lodos y aguas que tratan, disponen de laboratorios especializados para caracterización de productos y subproductos, que podrían ser utilizados para el análisis de DQO, sólidos totales y volátiles, y análisis básico elemental, que pudieran ser necesarios en el proceso de digestión anaerobia.

### 2.2.2. CARACTERÍSTICAS LODOS EDAR

Los lodos son una mezcla de agua y sólido. Los provenientes de la depuración de aguas residuales se consideran residuos no peligrosos, pero han de ser tratados, especialmente tras la ley de residuos 7/2022 del 8 de abril.

Aunque los lodos primarios tengan una gran cantidad de agua, previamente han recibido una serie de tratamientos para eliminar los sólidos de gran tamaño. Estos tratamientos serían:

- Reja de gruesos
- Reja de finos
- Desarenador. Mediante reducción de velocidad, las partículas de poca densidad se eliminan.

- Decantadores. Durante horas se eliminan objetos que son sólidos sedimentables.
- Espesador

Tras estos tratamientos físicos se obtiene el lodo primario con un contenido en materia seca de entre 3-4%. Se podría deshidratar hasta llegar al 20-30%, y así obtener un producto más fácil de transportar.

Los lodos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas suponen un reto medioambiental, cada vez mayor por su gestión. La DA de estos lodos es una solución sostenible, ya que, reduce su masa, aumenta la capacidad de deshidratación, y también se obtienen subproductos de alto valor como metano, alcoholes, ácido láctico, hidrógeno y ácidos grasos volátiles. También, la DA hace que los lodos se estabilicen biológicamente destruyendo patógenos.

### 2.2.3. DIGESTIÓN ANAEROBIA

El proceso de digestión anaerobia engloba diferentes microorganismos que trabajan en condiciones ambientales con ausencia de oxígeno, y transforman complejos orgánicos en otros subproductos como son:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

Esta digestión puede realizarse en condiciones mesófilas de temperatura ( $35\text{-}45^\circ\text{C}$ ) o termófilas ( $45\text{-}70^\circ\text{C}$ ), pero es evidente que una es menos rentable que otra, por ello normalmente, las digestiones anaerobias controladas se prefieren hacer en condiciones mesófilas (Tolessa, Goosen y Louw 2024).

El proceso de DA consta de diferentes etapas, o reacciones que van escalonadas:

1. Hidrólisis
2. Acidogénesis
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

A grandes rasgos, los productos hidrolizados, se convierten en ácidos grasos, estos en ácido acético y  $\text{CO}_2$  y por último en metano.

La etapa inicial es indispensable, ya que sin ella no empieza el proceso, y cuanto menos complejos sean los sustratos, más rápido avanzaremos en las siguientes etapas. Los sustratos propuestos en este TFM tienen la ventaja de estar semidigeridos, por lo que es de gran ayuda

en la etapa inicial, en la hidrólisis, y no sería necesario otros pretratamientos que encarecerían el proceso.

La siguiente etapa, la acidogénesis, es donde determinadas bacterias se encargan de producir los AGVs, por lo que hay que mantener vivos estos microorganismos en detrimento de los que van a actuar en las siguientes etapas, ya que consumirían los subproductos objetivo, los AGVs.

En la tercera etapa, la etapa acetogénica, las bacterias consumen ácidos grasos y son facultativas (necesitan bajas concentraciones de  $O_2$ ), por lo que en condiciones anaerobias estrictas y acidificación del medio conseguiremos inhibirlas.

Y por último, en la cuarta etapa, las arqueas metanogénicas (grupo no bacteriano), son las encargadas de producir metano al final de la DA. Estas precisan condiciones similares a las anteriores, además de su presencia, por lo que al inhibir unas también lo hacemos con estas.

Cada grupo de bacterias actúa o genera unas condiciones de pH distintas, por lo que en el equilibrio del proceso general de una DA, el pH se mantiene en condiciones ligeramente alcalinas (7,4-8). Pero si estos valores cambian, se pueden inhibir unas bacterias, como pasa en el caso de las bacterias metanogénicas y acetogénicas, que en pH ácido son inhibidas, y se acumulan ácidos grasos (Sarkar y col. 2021). Que es lo que se pretende en este caso.

#### 2.2.4. OBTENCIÓN ÁCIDOS GRASOS

Hasta ahora, la forma más común de valorizar los residuos ganaderos y lodos de aguas residuales ha sido la obtención de biogás. Para esto ya existen muchos estudios y empresas dedicadas a ello, pero también existen otras alternativas de alto valor como es la obtención de AGVs que no están tan desarrolladas.

La producción de AGVs debe optimizarse para maximizar la rentabilidad sobre el gas metano.

El principal objetivo de este trabajo es la obtención de ácidos grasos para la producción de polihidroxicanoatos (PHAs) que son precursores de bioplásticos, pero también, estos ácidos se pueden aplicar en la industria alimentaria, farmacéutica, y para producir bioenergía. Igualmente, son ampliamente utilizados en aditivos alimentarios animales, siendo eficaces para evitar la colonización de patógenos en los intestinos de los animales, incidiendo directamente

en su salud y crecimiento.

El proceso de producción de bioplásticos, no se va a analizar en este trabajo, ya que correspondería a otras empresas. Pero en líneas generales, se basa en el uso de determinados microorganismos alimentados por AGVs para sintetizar los PHAs que usan como reserva de carbono y energía.

Actualmente, los parámetros para la maximización de producción de ácidos grasos a través de digestiones anaerobias, no está muy clara, y es incluso, a veces, contradictoria. Sobre todo, en lo que respecta a la combinación de varios parámetros de operación. Pero lo que está claro, es que siempre se ha de evitar llegar a las etapas finales de la DA (acetogénesis y metanogénesis) para obtener los AGVs de cadena más larga, concretamente dos de ellos: ácido propiónico y ácido valérico.

Probablemente, los residuos, aun catalogándose igual, tratándose del mismo tipo; tengan distintos parámetros físicos-químicos en función de la ubicación donde se haya producido, la época del año, y otras variables que afecten a cada residuo en particular. En este trabajo se van a proponer una serie de parámetros en función de la observación de los resultados vistos hasta ahora en las prácticas curriculares que he estado desarrollando, y la investigación personal en distintos estudios. Pero ello no supone estar cerrados a variaciones de estas condiciones. De tal manera, al iniciar digestiones o codigestiones, se deberían enviar los residuos de los que se disponga a centros de investigación especializados en realizar ensayos de digestión anaerobia, para que sean ellos quienes determinen que condiciones son las más óptimas. De hecho, el proyecto en el que he estado colaborando, aún está en sus fases iniciales, y no se han publicado conclusiones.

Los ácidos grasos que se consideran de más valor (**propiónico y valérico**) para producir el mejor tipo de PHAs producen bioplásticos más flexibles, duros y menos permeables al oxígeno.

#### 2.2.5. OPTIMIZACIÓN DE PRODUCCIÓN DE AGVs

Según diversas investigaciones (Afazeli y col. 2014), se recomienda realizar un pretratamiento sencillo a los desechos de mayor tamaño, como es homogenizar los productos a tratar para obtener un tamaño de partícula regular y vigilar que estén libres de impurezas (moler, picar, tamizar, mezclar). Otros tratamientos también se plantean, como es añadir HCl para promover hidrólisis inhibiéndola metanogénesis, pero hay autores que indican que realmente no afecta a la cantidad de ácidos grasos obtenidos, por ello, y para simplificar el proceso, no se va

a pautar su uso en este caso.

En este caso, los sustratos sólidos que se van a utilizar, es decir, el contenido rumial, ya tiene un tamaño de partícula reducido, al estar semidigerido (Beorlegui, y Rebollar. 1993). Por lo que el único pretratamiento propuesto es realizar la mezcla y dilución en un mezclador-agitador con conexión al digestor para bombear según necesidades.

Según experimentos realizados por Aquavall (Colzi, y Estrada 2020), se observó que, aumentando la carga orgánica, es decir, disminuyendo los THR, manteniendo un pH ácido y temperatura de 35°C, aumentaba la concentración de ácidos grasos.

También se propone la adición de nanopartículas de hierro para incrementar la producción, por ser un nutriente esencial de los microorganismos y aumentar su actividad. Estudios indican que pueden aumentar las producciones hasta un 200% (Wang y col. 2023). Estas partículas se pueden dispensar directamente en el digestor y además aportarían mayor calidad al digestato como fertilizante ya que saldría reducido en sales de hierro no tóxico.

Centrándonos en este mismo estudio de Aquavall, donde se indica que se han obtenido hasta 5,7g/l de ácidos grasos volátiles, siendo de entre los 2 ácidos grasos más interesantes (propiónico y valérico) el que presentó mayor concentración fue el ácido propiónico con 2,083 g/L. Podemos deducir que se alcanzarán esos valores en nuestro proceso. Sin olvidar el segundo ácido graso atrayente, que, aunque en menor medida, también se obtiene y es de gran valor, el ácido valérico, con hasta 0,9 g/L.

Es decir, se trata de obtener 2 gramos de ácido propiónico y casi 1 gramo de valérico por cada litro de fase líquida de digestato obtenido.

### **3. ALCANCE**

Dentro del alcance de este trabajo estaría la necesidad de resolver un problema de gestión de un tipo de residuos de una empresa concreta, un matadero.

Se va a realizar un diagrama de bloques explicando el proceso de digestión anaerobia.

Los límites de este trabajo se encuentran en el planteamiento del proceso de digestión anaerobia para la obtención de esos subproductos.

Se va a tener en cuenta la procedencia de otro de los residuos necesarios para el proceso.

Y no se va a entrar en detallar el posterior uso de los subproductos, aunque sí se da una visión general para entender que se puede hacer con ellos.

## 4. OBJETIVOS

Los objetivos de este TFM son principalmente:

El objetivo principal es diseñar un proceso de **valorización de residuos** tipo SANDACH y lodos EDAR. Reduciendo el impacto ambiental que genera en la comarca. Y reducir también procesos no sostenibles y sus costes derivados de la gestión actual de los desechos y su transporte.

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

Crear un diagrama de flujo con cada una de las operaciones del proceso de valorización de los residuos de la comarca.

Dimensionar el digestor anaerobio necesario para el proceso.

Estimar una cantidad aproximada de producción de ácidos grasos objetivo de este proceso.

Con todo este proceso se trata de contribuir en la economía circular y poder ser reconocidos en actividades de Responsabilidad Social Corporativa, concepto por el que las empresas asumen su responsabilidad del impacto que generan con sus actividades, mejorando la reputación de la empresa. Y con ello, se tiene la opción de solicitar ayudas europeas, estatales y autonómicas que se vayan generando en este ámbito.

## 5. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la realización del TFM ha sido en primer lugar estudiar la memoria del proyecto de investigación de las prácticas de empresa del máster, observar los resultados obtenidos en el laboratorio.

En segundo lugar, elegir una empresa real, que sirva de referencia con sus actividades en este caso debía ser una industria cárnica o matadero, donde mediante consultas en internet, se han obtenido los datos necesarios de generación de desechos.

También se tuvo en cuenta que cerca del matadero hubiera la posibilidad de obtener lodos de depuradora, analizando sus características concretas.

Y por supuesto, se han leído y analizado diversos artículos de investigación relacionados con los desechos objetivo o de características similares, digestiones anaerobias, codigestiones, etc.

Además, durante mis prácticas, pude hacer una visita a la Estación Depuradora de Aguas Residuales de Valladolid, y conocer su proceso de digestión anaerobia que utilizan para producir biogás a partir de los lodos de filtrado y decantación.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. EMPRESA CÁRNICA SELECCIONADA

Todas las empresas, para realizar su actividad, han de cumplir, entre otros, unos estándares ambientales. En el caso de los mataderos de animales de gran tamaño, como los ganados ovino-caprino, bovino, porcino y equino, se pueden llegar a generar miles de toneladas de desechos, llamados SANDACH (subproductos animales no destinados al consumo humano), los cuales precisan de una gestión ambiental específica en caso no ser reutilizados, como serían:

- Almacenamiento en cámaras frigoríficas.
- Recogida diaria con vehículos y contenedores estancos.
- Programas de limpieza documentado
- Transporte en seco

Estas medidas se deben realizar para evitar la emisión de olores y su difusión, y también para reducir la carga orgánica de las aguas residuales principalmente. Todos estos procedimientos suponen un coste económico y ambiental, por lo que es necesario mejorar su gestión.

A continuación, se muestran los datos de producción prevista y capacidad de producción de un matadero ubicado en el municipio de Medina de Rioseco, Valladolid, concretamente del MATADERO CASTILLA RIOSECO, S.A. (MACRISA).

Esta tabla ha sido obtenida de datos realizados por la empresa y publicados en el Boletín Oficial de Castilla y León, ORDEN FYM/81/2021, de 27 de enero:

| <b>Capacidad de la instalación. Animales sacrificados</b> |              |                    |               |               |              |             |              |
|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| <b>Línea</b>                                              | <b>Clase</b> | <b>Kg/Ud canal</b> | <b>Ud/año</b> | <b>t/día</b>  | <b>t/año</b> |             |              |
|                                                           |              | Lechal             | 6             | 125000        |              |             |              |
| 1                                                         | Ovino        | Cordero            | 12            | 70000         | 220000       | 8,5         | 2215         |
|                                                           |              | Oveja              | 25            | 25000         |              |             |              |
| 1                                                         | Caprino      | Cabrito            | 6             | 1000          | 2500         | 0,1         | 24           |
|                                                           |              | Cabra              | 12            | 1500          |              |             |              |
| 1                                                         | Porcino      | < 5 kg             | 5             | 2000          | 7000         | 2           | 510          |
|                                                           |              | >25 kg             | 100           | 5000          |              |             |              |
| 2                                                         | Vacuno       | <24 meses          | 280           | 30000         | 50000        | 63,1        | 16400        |
|                                                           |              | <24 meses          | 400           | 20000         |              |             |              |
| 2                                                         | Equino       |                    | 280           | 2000          | 2000         | 2,2         | 560          |
| <b>Total</b>                                              |              |                    |               | <b>281500</b> |              | <b>75,8</b> | <b>19709</b> |

Tabla 1. Capacidad de producción. Fuente: Anexo I de la publicación. Descripción de la instalación

Teniendo en cuenta que, en las ovejas, el 13% de su peso es contenido rumial, y en el ganado vacuno o bovino (vacas, terneras, bueyes y toros) corresponde al 15-21% de su peso, se podría disponer de las siguientes cantidades de contenido rumial:

|               | <b>Animales (t/día)</b> | <b>Contenido rumial (t/día)</b> |
|---------------|-------------------------|---------------------------------|
| <b>Ovino</b>  | 6,06                    | 0,78                            |
| <b>Vacuno</b> | 44,93                   | 7,63                            |
| <b>Total</b>  |                         | <b>8,41</b>                     |

Tabla 3. Toneladas anuales y diarias de contenido rumial. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla elaborada, se han modificado las toneladas diarias de animales a partir de los datos aportados por la empresa, ya que no se tienen en cuenta los 365 días del año, sino los días laborables, pero como en el digestor se ha de mantener una alimentación constante, se ha hecho la media diaria natural.

Por ello, en el matadero se obtendrá una media de 8,41 toneladas de ruminaza diaria para ser tratada en el digestor anaerobio.

La ruminaza es muy poco densa, 1 Kg puede ocupar unos 6 litros, por lo que hablaríamos de volúmenes diarios de 50,5m<sup>3</sup> sin prensar, aunque luego disminuirían con el manejo y mezcla con el otro sustrato.

Estos datos son orientativos, ya que no siempre habrá el mismo número de animales diarios, y también dependerá de la cantidad de alimento que se proporcione a los animales en las horas previas a su sacrificio y de la edad del animal. Pero como ya veremos más adelante, en este caso se va a intentar que las cantidades de contenido rumial no sean mínimas debido a ayunos prolongados para que no afecte a la composición de la ruminaza.

Además, cabe destacar, que esta empresa dispone de amplias instalaciones y espacio exterior adecuado para admitir nuevas infraestructuras, por lo que, en este aspecto, no sería un problema construir un digester anaerobio cercano a la zona donde se depositan los desechos.

#### 6.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL CONTENIDO RUMIAL

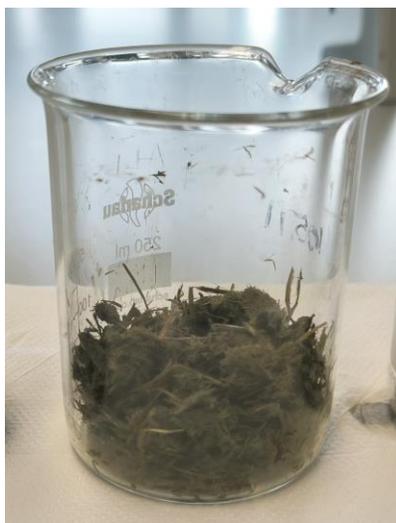
En el primer compartimento del estómago de los rumiantes, o rumen se produce una fermentación del material vegetal fibroso que ingieren, gracias a los microorganismos que viven en él (protozoos, hongos y bacterias), a sus características fisicoquímicas, pH ácido, t<sup>a</sup> 39-40°C y ambiente líquido; donde se eliminan los sólidos continuamente. El contenido rumial, también llamado ruminaza, es considerado un subproducto que se genera tras el sacrificio de estos animales (García 2016).

Los productos de esta fermentación son muy variados, pero la mayor concentración de lo que se obtiene, son AGVs, de los cuales se nutren estos animales, siendo su principal fuente de energía, absorbiéndose a través de las paredes del rumen (Febres y col. 2007)

La materia seca que sale del contenido rumial cumple varios criterios: reducido tamaño, reducida flotabilidad, aumento de su gravedad específica. Y esto se debe a que las partículas menos digeribles por su contenido en fibra indigerible y menos nitrógeno, tienen una gravedad específica mayor, y al contrario, las que son más digeribles permanecen más tiempo. Este pesaje selectivo consigue que no haya acumulaciones innecesarias en el contenido rumial, y estimula la entrada de más sustrato constantemente. Es decir, la materia ya digerida es expulsada.

El ayuno prolongado cambia las condiciones del contenido rumial e inhibe el crecimiento de las bacterias que generan AGVs, por lo que sería recomendable alimentar a los animales hasta el momento del sacrificio, preferiblemente con forraje que contenga menos proporciones de fracciones fibrosas indigeribles, las cuales tienen un mayor contenido en nitrógeno, lo cual es muy beneficioso si se quiere obtener fertilizantes del sólido sobrante. Este tipo de forraje podría ser heno cosechado tempranamente de fibra larga para estimular la rumia.

También es importante mantener el pH del estómago por encima de 5,5 para que no disminuya la población microbiana, y esto se consigue añadiendo a las raciones de alimento un tampón (Sarkar y col. 2021). Se suele utilizar bicarbonato de sodio, pero también se recomienda la ingesta de algas rojas, más económica y mantiene durante más tiempo el pH rumial.



*Imagen 1. Contenido rumial. Fuente: Fundación Cartif.*

El contenido rumial se compone mayormente de hierba semi digerida y bacterias acidogénicas, con una consistencia pastosa, pero no líquida, como se observa en la Imagen 1. Por lo que, para bombearlo en los digestores sería necesario mezclarlo con agua u otro sustrato líquido. En este caso, en la codigestión contenido rumial-lodos ya se conseguiría la densidad necesaria para el bombeo.

Otra característica importante para tener en cuenta del contenido rumial es que es materia orgánica fácilmente biodegradable al estar semidigerido, y esto también hace que se acumulen más ácidos grasos.

## 6.2. EDAR MEDINA DE RIOSECO

La estación depuradora y también potabilizadora de la comarca de Medina de Rioseco está diseñada para el tratamiento de un caudal medio de 1.500 metros cúbicos por día, correspondiente a una población equivalente de 9.250 habitantes. Y es responsable del mayor gasto que tiene ese ayuntamiento actualmente.

Los lodos que aquí se producen, no tienen ningún tratamiento biológico, químico o térmico, únicamente tratamientos primarios y secundarios, como son tratamientos físicos, los cuales no disminuyen su poder de fermentación. Derivando a una empresa externa autorizada la gestión de sus residuos, según marca la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados.

Como ya se comentó, tras estos tratamientos físicos se obtiene el lodo primario con un contenido en materia seca de entre 3-4%. Pudiendo deshidratarse hasta llegar al 20-30%, para facilitar su transporte. Pero para el proceso que se va a plantear en este trabajo no sería necesario, ya que no se van a acumular grandes cantidades de lodos, y el otro sustrato que vamos a utilizar en la digestión necesita diluirse mucho para ser tratado, y de esta manera no consumiríamos agua tratada en su dilución.

Actualmente, la EDAR espera a acumular una cantidad importante de lodos para avisar a la empresa que actualmente los gestiona. En este caso, la empresa adjudicataria encarga del tratamiento de estos lodos es SOMACYL. Por ello, se debería comunicar con la documentación correspondiente de las modificaciones de su contrato y compromiso actual.

Al colaborar la estación depuradora directamente con la empresa de la misma localidad que dispone del digestor, el matadero; se haría un transporte diario nocturno en camión cisterna, con cantidades muy inferiores a las que actualmente se manejan, para poder ser tratadas inmediatamente.

Este servicio de recogida y tratamiento se abona actualmente por parte de la depuradora a SOMACYL, por lo que se debería pagar al matadero tras las negociaciones pertinentes, que sería la nueva entidad que gestione sus residuos.

Actualmente, la EDAR de Medina de Rioseco almacena sus lodos en contenedores. Para un caudal de 1.500 m<sup>3</sup> de aguas residuales, se producirían unos 9,5m<sup>3</sup> diarios de fango, los cuales entran en cualquier camión cisterna estándar.

Al tener una densidad de unos  $1015\text{Kg}/\text{m}^3$ , estaríamos manejando unas 9,6 toneladas diarias de lodos.

La Estación de tratamiento de aguas está ubicada a las afueras del mismo municipio, a unos 4 km del matadero. Y casualmente, otra ventaja es que la ruta más corta no pasa por el núcleo urbano, como puede verse en la imagen 2.

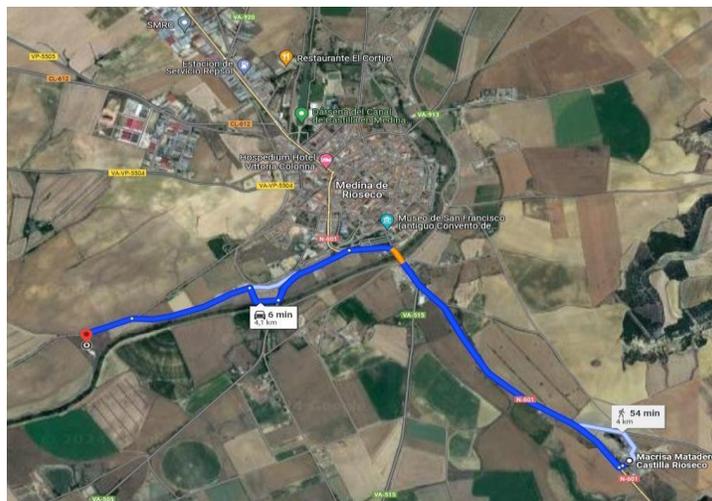


Imagen 2. Ruta entre EDAR y Matadero. Fuente: Búsqueda en Google Maps

### 6.3. CODIGESTIÓN ANAEROBIA CONTENIDO RUMIAL+LODOS EDAR

Distintos estudios han demostrado que la codigestión de lodos con restos de alimentos optimiza la producción de AGVs (Nabaterrega y col. 2022) (Pourbayramian y col. 2021). En este caso la materia orgánica, en vez de provenir de alimentos, va a ser el contenido rumial.

Normalmente, en las DA, se recomienda un ratio C/N entre 20 y 30 a 1, para que no haya una inhibición de la metanogénesis, al ser el amonio tóxico para este tipo de bacterias, pero no afecta tanto a las acidogénicas (Liu y col. 2021), que son las que en este caso nos interesa que haya más población y disminuya lo máximo posible las metanogénicas. Por lo que este parámetro no nos va a preocupar inicialmente, e iremos mezclando según lleguen los residuos.

En esta codigestión, el N será aportado principalmente por los lodos, y el C estará en mayor concentración en el contenido rumial, ruminaza o bellygrass.

La puesta en marcha del digestor será la etapa más complicada, y el objetivo será obtener la mayor concentración de bacterias acidogénicas y productoras de enzimas hidrolíticas.

Las condiciones que inhiben a las bacterias que no nos interesan, como son las acetogénicas y metanogénicas, y que a su vez favorecen o no afectan a las acidogénicas son las que se han aplicar.

Por ello, aunque siga habiendo discrepancias entre distintos autores, he querido dar más peso y basarme principalmente en las características más parecidas al proceso de rumia de los animales.

Y en esto es en lo que se va a basar principalmente el proceso de DA que se plantea en este TFM para una conseguir la mayor concentración de ácidos grasos.

#### Condiciones propuestas:

- **pH 5,5-6,6**
- **$t^a = 35^{\circ}\text{C}$**
- **Tiempos de residencia hidráulica (THR) reducidos: 1,5-2 días**
- **Inyecciones de  $\text{CO}_2$**
- **Adicción de nanopartículas de  $\text{Fe}^+$**

El aumento de  $\text{CO}_2$  hace que disminuya el pH, se acidifica. Como este gas lo producen las bacterias acetogénicas, aparte de ácido acético, cuando detectan que hay en exceso las inhibe a modo de regulación; que es el objetivo. Pero habría que ir controlando el pH igualmente para mantenerlo en el rango objetivo.

Al disminuir el THR se aumenta la velocidad de carga orgánica (OLR, Organic Loading Rate), favoreciendo la acidogénesis e impidiendo la metanogénesis. Es cierto que muchos autores recomiendan unos THR superiores, de hasta 9 días (Guamán-Marquines y col. 2023) (Strazzerá y col. 2021), donde es mayor la concentración de AGVs, pero la mayor proporción de ellos corresponde con el Ácido Acético, y precisamente, este es el que menos nos interesa, ya que su presencia indica consumo de los otros AGVs que sí deseamos obtener.

Con estos tiempos de residencia reducidos, aparte de optimizar la producción de AGVs, conseguimos un flujo constante de desechos, lo que hace disminuir costes de almacenamiento al estar reciclando de manera constante.

En el momento que se vaya a cargar el digestor con más sustrato, se deberá sacar antes el mismo volumen de digestato.

Este digestato extraído se debe separar en dos fases:

- Fase líquida, rica en ácidos grasos. Este líquido se vende posteriormente a empresas productoras de bioplásticos. Las cuales, mediante un proceso biológico, nutriendo a microorganismos con estos ácidos grasos, obtienen la materia prima para la producción de PHAs, precursores de bioplásticos.
- Fase sólida, con elevados contenidos en N y P para fertilizantes. Este subproducto, aparte de nutrir suelos agrícolas, y no agrícolas, también puede ser un buen sustituto de la clásica turba que se usa en los semilleros, siendo un producto más sostenible.

En el caso del uso de digestato como fertilizante, aún no existe una legislación específica de cómo usarse, o que composición ha de tener. Pero sería recomendable controlar la presencia de metales pesados u otras sustancias contaminantes.

Como ya sabemos, en esta DA se trata de no llegar a obtener biogás, deteniendo su producción en pasos previos, y obtener así la mayor cantidad de ácidos grasos. Pero es inevitable que se produzca algo de gas. Este biogás contendrá una elevada concentración de metano, pero no se va a proponer instalar un complejo sistema de almacenaje o purificado, por tratar de optimizar los gastos y simplificar el proceso. Y como se obtendrá poco biogás, y no merece la pena instalar una caldera para su combustión, lo más adecuado para no emitir este CH<sub>4</sub> a la atmósfera sería instalar regeneradores térmicos oxidativos (RTO), que convertirán en CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

Para maximizar el proceso de economía circular, este CO<sub>2</sub> caliente que sale del RTO, se inyectará en el digestor de manera controlada, y también el CO<sub>2</sub> de la caldera que se encargue de calentar el digestor y mezclador. Y con esto conseguimos 4 objetivos:

- Ayudar a mantener la temperatura de 35°C
- Realizar una mezcla continua
- Disminuir en pH

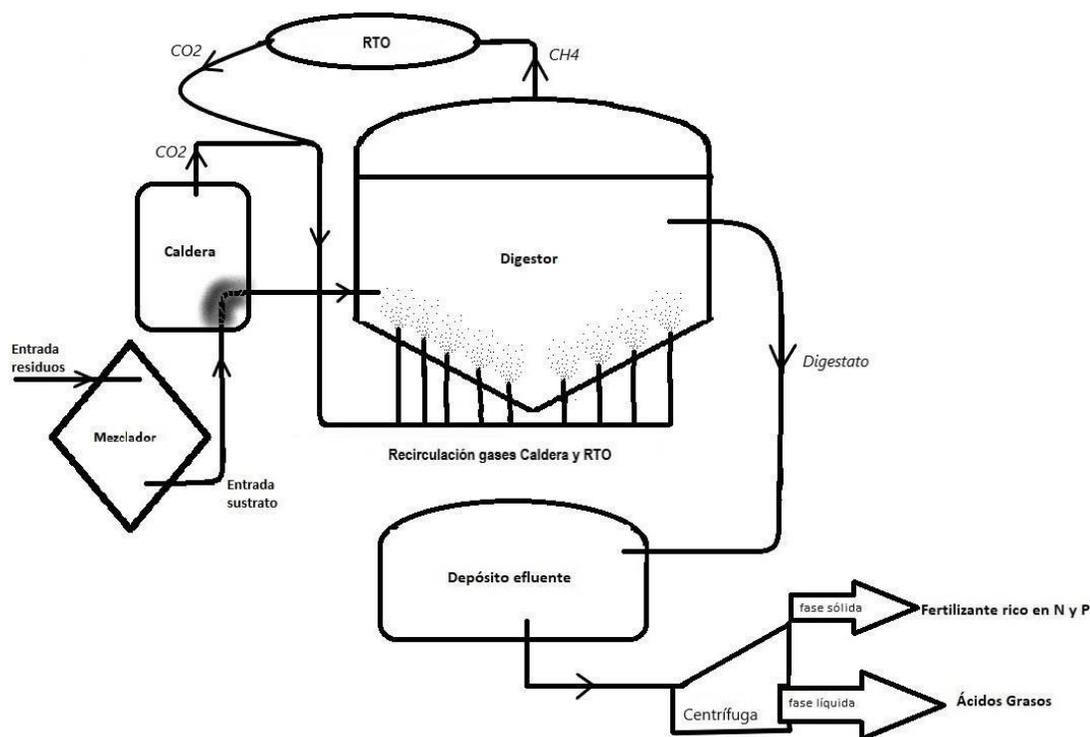


Imagen 3. Esquema planta. Fuente: Elaboración propia.

## 6.4. DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO

### 6.4.1. CÁLCULOS DIGESTOR ANAEROBIO

La mala elección de tecnologías puede suponer el fracaso del proyecto, por ello se ha de seleccionar las características más adecuadas en cada caso, ya que hay muchas variables que afectan a la producción. Pero también se ha de tener en cuenta los medios de los que va a disponer la planta, a nivel tanto de personal a la hora de mantener y supervisar el proceso, como de sus capacidades de inversión en infraestructuras (Tolessa y col. 2024).

Por ello en primer lugar se ha planteado utilizar sustratos de la zona, que no supongan un esfuerzo obtenerlos.

El contenido rumial aporta gran cantidad de materia orgánica, y por otro, los lodos de depuradora donde se encuentran una gran cantidad de bacterias. Ante esta facilidad de la disposición, está incluido el evitar grandes desplazamientos con esos materiales, esto disminuye la huella de carbono. El único transporte de sustrato necesario será el de los lodos desde la depuradora al matadero, tan solo 4 kilómetros.

En apartados anteriores ya hemos visto las toneladas diarias de lodos y ruminaza de las que vamos a disponer:

- Lodos: 9,6ton/día = 9,5m<sup>3</sup>
- Ruminaza: 8,4ton/día

Esto nos da un total de 18 toneladas diarias, pero se necesita hallar el volumen del contenido rumial.

El contenido inicial de agua de la ruminaza del ganado es del 85%. Por tanto, la densidad de la ruminaza será bastante parecida a la del agua (Colorado, y col. 2022).

Además, la densidad del contenido rumial en base seca (eliminado el agua) es 0.164 ton/m<sup>3</sup> (Hena, y col. 2023)

Por todo ello, la densidad del contenido rumial sería:

$$\text{Densidad ruminaza} = 1\text{ton/m}^3 * 0.85 + 0.164 \text{ ton/m}^3 * 0.15 = 0.8746 \text{ ton/m}^3.$$

Entonces, el caudal inicial de los 8.4 ton/día de ruminaza sería:

$$Q \text{ ruminaza} = 9,6 \text{ m}^3/\text{día}$$

Ahora que ya tenemos ambas masas y volúmenes, voy a calcular la densidad de la mezcla, así se sabrá el volumen total.

La densidad de la mezcla lodo+contenido rumial sería:

$$d = \frac{m_1+m_2}{V_1+V_2} = \frac{9,6+8,4}{9,5+9,6} = 0,94\text{ton/m}^3$$

Y con esa densidad, y la masa total, sabríamos el volumen total diario, es decir, el caudal:

$$Q. \text{ mezcla lodos-ruminaza} = 0,94\text{ton/m}^3 \times 18\text{ton} = 16,92 \text{ m}^3/\text{día}$$



#### 6.4.2. CÁLCULOS DE LAS CORRIENTES DE DIGESTATO

Con los contenidos en agua de los sustratos que se van a utilizar; un 96% en el caso de los lodos y un 85% para la ruminaza, se obtendría un volumen aproximado de **17.000 litros** diarios de subproducto líquido de **ácidos grasos**, con hasta **2 gramos por litro** que se pretenden obtener solo en **ácido propiónico**, y **1 gramo por litro** de **ácido valérico**.

Además de unas **2 toneladas** de **fertilizante** rico en N, P.

**34 kg/día de ácido propiónico**

**17 kg/día de ácido valérico**

**2 toneladas/día de fertilizante**

## 7. CONCLUSIONES

Se ha dado respuesta a los objetivos planteados en este TFM, ya que a partir de toneladas de residuos se explica cómo se pueden obtener subproductos de valor como son en este caso los ácidos propiónico y valérico para producir bioplásticos. Y también se consiguen toneladas de fertilizante.

El uso de los residuos de mataderos como sustrato principal en una digestión anaerobia no es muy común, sin embargo, estos residuos tienen un gran potencial por su elevado contenido en materia orgánica (Afazeli y col. 2014).

Por otro lado, también se da otra salida sostenible a los lodos que se generan en las depuradoras, diferente a las más comunes realizadas hasta ahora.

Este tipo de iniciativas en empresas privadas suelen plantearse según el mayor beneficio económico, pero realmente este trabajo no se ha centrado en ello, ya que actualmente la opción más rentable es obtener biogás para producir energía.

Con el objetivo base de la sostenibilidad, se ha tenido en cuenta una codigestión con los desechos que se generan en el entorno. Ofrece una oportunidad a instalaciones clave de la comarca, con gestión más cercana y sostenible de sus residuos, además del ahorro en sus costes.

Este trabajo ha pretendido reflejar que existen distintas opciones viables de valorización de productos y deja patente la importancia de seguir investigando e innovando en este sentido.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, S., & Nosrati, M. (2014). An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 34, pp. 380-386). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.016>
- Beorlegui, C., & Rebollar, P. G. (1993). Tamaño de partícula de los forrajes en la alimentación de vacas lecheras y conejos. Bases fisiológicas y recomendaciones. *Avances en Nutrición y Alimentación Animal: IX Curso de Especialización FEDNA*, 11-30.
- Boletín Oficial de Castilla y León. (2021). ORDEN FYM/81/2021, de 27 de enero, por la que se concede autorización ambiental al matadero ovino-caprino, bovino, porcino y equino, ubicado en el término municipal de Medina de Rioseco (Valladolid), titularidad de «Matadero Castilla Rioseco, S.A. (MACRISA)»
- Colorado, A., Morales, O., Ossa, D., Amell, A., & Chica, E. (2022). Modeling the optimal condition for drying rumen contents using a solar greenhouse dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101678.
- Colzi, A., & Estrada, J. (2020). Producción de ácidos grasos volátiles a partir de fangos de depuradora. EPE, Valladolid, Aquavall. <https://aquavall.es/wp-content/uploads/2020/07/>
- Donato, J., & Sáez, R. (2015). Reducción de lodos generados en EDARs CTC JUN 2015. Proyecto WaterReuse. *Soluciones Industriales y Tratamientos Ambientales, S.L. (SITRA)*, 31-34.
- Febres, O. A., & Vergara-López, J. (2007). Reunión ALPA, Reunión APPA-Cusco-Perú. In *Arch. Latinoam. Prod. Anim* (Vol. 15, Issue 1).
- García, D. (2016). Aspectos generales sobre el rumen y su fisiología. *Ganadería. Com.* <https://www.ganaderia.com/destacado/Aspectos-generales-sobre-el-rumen-y-su-fisiologia>

- Guamán-Marquines, C. W., Mendoza-Loor, R. J., Gómez-Salcedo, Y., & Baquerizo-Crespo, R. J. (2023). Assessment of the start-up of tubular reactors on a laboratory scale for the anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater. *International Journal of Thermofluids*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100378>
- Hedo, E. B. (2012). Real Decreto 1528/2012, de 8 de noviembre, por el que se establecen las normas aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano. (BOE núm. 277, de 17 de noviembre de 2012). *Actualidad Jurídica Ambiental*, (19), 33-34.
- Henao, D. M. O., Arrieta, E. L. C., Granda, A. F. C., Arrieta, A. A. A., & Unfried-Silgado, J. (2023). Characterization of bovine ruminal content focusing on energetic potential use and valorization opportunities. *Heliyon*, 9(2).
- Liu, J., Yin, J., He, X., Chen, T., & Shen, D. (2021). Optimizing food waste hydrothermal parameters to reduce Maillard reaction and increase volatile fatty acid production. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 103, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.032>
- Nabaterega, R., Basar, I. A., & Eskicioglu, C. (2022). Optimizing volatile fatty acid production from municipal sludge: Linking microbial activity with reactor performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107827>
- Pourbayramian, R., Abdi-Benemar, H., Seifdavati, J., Greiner, R., Elghandour, M. M. M. Y., & Salem, A. Z. M. (2021). Bioconversion of potato waste by contenido rumial fluid from slaughterhouses to produce a potential feed additive rich in volatile fatty acids for farm animals. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124411>
- Pliego de prescripciones técnicas particulares Plataforma de Contratación del Estado. Sociedad Pública de Infraestructuras y Medio ambiente de Castilla y León S.A. <https://contrataciondelestado.es> > wcm > connect. (n.d.).

Riaño, B., Molinuevo-Salces, B., & García-Gonzalez, M. C. (2022). Producción de ácidos grasos volátiles a partir de subproductos del procesado de pimientos. *Compostaje: Objetivo de Desarrollo Sostenible* (pp. 124-127).

Sarkar, O., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2021). Influence of initial uncontrolled pH on acidogenic fermentation of brewery spent grains to biohydrogen and volatile fatty acids production: Optimization and scale-up. *Bioresource Technology*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124233>

Strazzera, G., Battista, F., Tonanzi, B., Rossetti, S., & Bolzonella, D. (2021). Optimization of short chain volatile fatty acids production from household food waste for biorefinery applications. *Environmental Technology and Innovation*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101562>

Tolessa, A., Goosen, N. J., & Louw, T. M. (2024). Multiple-criteria decision analysis techniques for anaerobic digester technology assessment. *Heliyon*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24723>

Wang, Y., Wang, H., & Chen, H. (2023). Evaluating optimized volatile fatty acids production from carbon-rich wastewater during hydrolysis acidification process by Fe(II) and Fe(III) addition. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110724>