

# LIFE MERLIN

## PROYECTO EUROPEO PARA LA MAXIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Trabajo de Fin de Grado  
Facultad de Ciencias Experimentales  
**Biotecnología**

**AUTORA:**

Paula Pascual Albero

**TUTOR AGUAS DE ALICANTE:**

Dr. D. Mariano García Lillo

**TUTOR UMH:**

Dr. D. Manuel Sánchez Angulo

**ÁREA:**

Microbiología

**DEPARTAMENTO:**

Producción vegetal y  
microbiología



**D. MARIANO GARCÍA LILLO**, DOCTOR EN CIENCIAS QUÍMICAS POR LA UNIVERSIDAD DE ALICANTE Y RESPONSABLE DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA DIRECCIÓN DE INNOVACIÓN DE AGUAS DE ALICANTE.

**D. MANUEL SÁNCHEZ ANGULO**, DOCTOR EN BIOLOGÍA MOLECULAR Y PROFESOR TITULAR DE MICROBIOLOGÍA INDUSTRIAL EN EL GRADO DE BIOTECNOLOGÍA.



Certifican que la presente Memoria de investigación titulada:

**“PROYECTO EUROPEO PARA LA  
MAXIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE  
BIOGÁS EN ESTACIONES DEPURADORAS DE  
AGUAS RESIDUALES”**

presentada por la aspirante al Grado de Biotecnología,

***PAULA PASCUAL ALBERO***

cumple todos los requisitos necesarios y así se firma para que conste a los efectos oportunos,

Fdo. Mariano García Lillo

Fdo. Manuel Sánchez Angulo



<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1. AGUAS DE ALICANTE.....	3
1.2. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDARs) DE TIPO CONVENCIONAL.....	4
1.2.1. Línea de agua.....	4
1.2.2. Línea de fangos.....	7
1.2.3. Línea de gas.....	10
1.3. CODIGESTIÓN ANAEROBIA.....	11
<b>2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1. CONTEXTO GLOBAL AMBIENTAL Y ENERGÉTICO.....	13
2.2. MARCO NORMATIVO Y ESTRATÉGICO EUROPEO.....	13
2.3. PROGRAMA LIFE.....	14
2.3.1. Proyecto LIFE MERLIN.....	15
2.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO.....	16
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
3.1. LABORATORIO DE AGUAS DE ALICANTE.....	17
3.2. DETERMINACIONES ANALÍTICAS REALIZADAS EN EL MARCO DE LIFE MERLIN.....	17
3.3. MEDICIÓN DEL POTENCIAL METANOGÉNICO (BMP). SISTEMA AMPTS III LIGHT.....	18
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>24</b>
4.1. DESGASIFICACIÓN DEL INÓCULO.....	24
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS INÓCULOS Y LOS COSUSTRATOS.....	25
4.3. PREPARACIÓN DE LOS BIORREACTORES PARA LOS ENSAYOS BMP.....	26
4.4. ENSAYOS BMP DE LOS COSUSTRATOS ANALIZADOS.....	26
4.4.1. Cosustrato A.....	26
4.4.2. Cosustrato B.....	28
4.4.3. Cosustrato C.....	30
4.4.4. Cosustrato D.....	31
4.5. COMPARACIÓN Y ELECCIÓN DEL MEJOR COSUSTRATO.....	33
<b>5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA.....</b>	<b>36</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>37</b>



## RESUMEN

En el marco de las energías renovables y la economía circular se desarrolla el proyecto LIFE MERLIN, cofinanciado por la Unión Europea, cuyo objetivo es maximizar la producción de biogás en las EDARs mediante la adición de cosustratos, procedentes de la industria alimentaria, en el proceso de digestión anaerobia de los fangos.

Resulta fundamental conocer el Potencial Bioquímico de Metano (BMP) de los distintos residuos (cosustratos) así como sus posibles restricciones por inhibición del proceso (toxicidad) para seleccionar los adecuados. Estos ensayos se han realizado a escala de laboratorio, empleando el novedoso equipo AMPTS III *Light*, adquirido recientemente en el ámbito del proyecto MERLIN.

En el presente trabajo se ha efectuado tanto la puesta en marcha del citado equipo empleando celulosa microcristalina, de BMP conocido (410 L CH<sub>4</sub>/Kg SV), como la caracterización de varios cosustratos (aguas azucaradas procedentes de industrias de golosinas y edulcorantes), obteniendo resultados satisfactorios.

Los cuatro cosustratos analizados, reflejaron valores de BMP entre 485 y 628 L CH<sub>4</sub>/Kg SV. En consonancia con el origen de los residuos, todas las muestras indicaron toxicidad nula y muy alta biodegradabilidad, alcanzando el 100% a los pocos días de iniciar el proceso.

**Palabras clave:** LIFE MERLIN, Estación Depuradora de Aguas Residuales, biogás, Potencial Bioquímico de Metano, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Volátiles.

## ABSTRACT:

Within the framework of renewable energy and the circular economy, the LIFE MERLIN project, co-funded by the European Union, aims to maximize biogas production in WWTPs by adding co-substrates from the food industry to the anaerobic digestion process of sewage sludge.

It is essential to determine the Biochemical Methane Potential (BMP) of different wastes (co-substrates), as well as any potential process inhibition constraints (toxicity), in order to select the most suitable ones. These tests were carried out at laboratory scale using the innovative AMPTS III *Light* equipment, recently acquired within the framework of the MERLIN project.

In this Bachelor's Thesis, both the commissioning of the aforementioned equipment—using microcrystalline cellulose with a known BMP (410 L CH<sub>4</sub>/Kg SV)—and the characterization of several co-substrates, sugary wastewater from confectionery and sweetener industries were performed, obtaining satisfactory results.



The analyzed co-substrates showed BMP values ranging between 485 and 628 L CH<sub>4</sub>/Kg SV. In accordance with the origin of the wastes, all samples showed no toxicity and very high biodegradability (reaching 100% within a few days after the start of the process).

**Keywords:** LIFE MERLIN, Wastewater Treatment Plant, biogas, Biochemical Methane Potential, Chemical Oxygen Demand, Volatile solids.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. AGUAS DE ALICANTE

Aguas de Alicante **(1)** es una empresa mixta (51% Ayuntamiento de Alicante, 49% Hidraqua). Gestiona el ciclo integral del agua (servicio de agua potable, alcantarillado, depuración y reutilización de las aguas depuradas) en la ciudad de Alicante y otros municipios de la provincia. La actividad de depuración de las aguas residuales se realiza en dos estaciones depuradoras de aguas residuales, de ahora en adelante, EDARs **(2)**:

- **Rincón de León**, con capacidad de tratar 75.000 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales. La cobertura de la misma abarca gran parte del casco urbano de la ciudad de Alicante, San Vicente del Raspeig y los polígonos industriales de Atalayas y La Vallonga.
- **Monte Orgegia**, representada en la Figura 1, cuenta con 65.000 m<sup>3</sup>/día como caudal de proyecto. Los municipios a los que sirve son Alicante, El Campello, Sant Joan d'Alacant y Mutxamel.



*Figura 1: Fotografía aérea EDAR Monte Orgegia (Alicante).*

Aguas de Alicante está comprometida con la gestión eficiente y sostenible del agua en un entorno de escasez hídrica. Apuesta por la innovación tecnológica, la economía circular y la transformación digital para garantizar un servicio de calidad a los ciudadanos mientras protege el medio ambiente.

Para cumplir su compromiso, Aguas de Alicante, entre otras iniciativas y aportaciones, participa activamente en diversos programas de investigación e innovación cofinanciados por la Unión Europea, como el proyecto LIFE MERLIN, eje central de este trabajo.

## 1.2. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDARs) DE TIPO CONVENCIONAL

Una estación depuradora de aguas residuales urbanas, es un conjunto de instalaciones que tienen por objetivo la descontaminación de las aguas residuales generadas en un núcleo poblacional (hogares, industrias, comercios) hasta que cumplan las condiciones exigidas, determinadas en (3), según el destino de las mismas (regadío tradicional, limpieza viaria, riego de parques y jardines, vertido al mar mediante un emisario, etc.).

La gestión de los fangos de depuración en España se encuentra regulada principalmente por (4), que establece las condiciones para su utilización en el sector agrario, así como por la normativa general de residuos cuando su destino es distinto de la valorización agrícola.

Una EDAR (5), en líneas generales, está compuesta por dos o tres líneas principales representadas en la Figura 2.

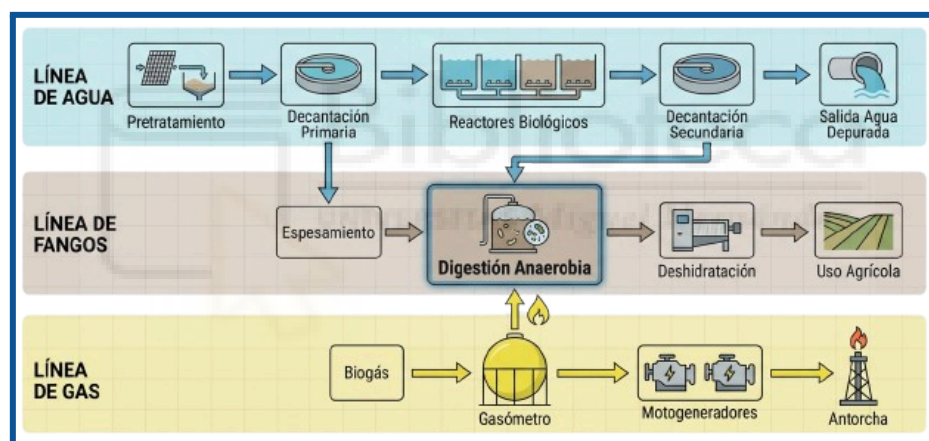


Figura 2. Esquema general de una EDAR. (Elaboración propia)

### 1.2.1. Línea de agua

Suele dividirse en tres fases principales:

- A. Pretratamiento: pozo de gruesos, desbaste, desarenado, desengrasado.
- B. Tratamiento primario: decantación primaria.
- C. Tratamiento biológico de fangos activados.

#### A. Pretratamiento

Engloba un conjunto de operaciones físicas que tienen como objetivo eliminar los objetos (gruesos y finos), las arenas y las grasas (flotantes). Toda la instalación de pretratamiento, incluyendo los desarenadores, suele ubicarse en el interior de un edificio, dotado de un sistema de extracción y

renovación del aire viciado. El aire extraído se dirigirá al sistema general de desodorización (vía química, carbón activo, etc.).

- **Pozo de gruesos:** Se ubica en la entrada del colector de la estación depuradora y presenta un fondo en forma de tronco de pirámide invertida con paredes muy inclinadas. Esta configuración permite concentrar los sólidos y las arenas sedimentadas en una zona concreta, facilitando su retirada de manera eficiente. Para la extracción de estos residuos se emplean habitualmente cucharas anfibia.
- **Desbaste de sólidos y tamizado:** Su función es la separación del agua residual de los sólidos de tamaño considerable (piedras, ramas, plásticos, trapos, etc.) que, de otro modo, podrían deteriorar los elementos mecánicos y obstruir el paso del agua. Se hace pasar la corriente líquida a través de una serie de rejillas (de gruesos y de finos) o tamices, siendo la separación entre los barrotes el factor determinante de la eficacia del desbaste. Se pueden instalar prensas de residuos para compactarlos y reducir su volumen.
- **Desarenado:** Se emplea como un concepto amplio que engloba tanto granos de arena y fragmentos de grava como otras partículas minerales pesadas. Estos materiales, debido a su peso, tamaño o carácter abrasivo, tienden a depositarse rápidamente y pueden provocar desgaste o acumulación en los equipos si no se eliminan adecuadamente.

El proceso de desarenado posee tres características fundamentales:

- Protección de los elementos mecánicos contra la abrasión.
  - Minimización de obstrucciones en las conducciones.
  - Disminución de sedimentos en depósitos posteriores.
- **Desengrasado:** Tiene como objetivo eliminar todas las materias de menor densidad que el agua (flotantes, grasas, espumas, etc.) que, de otra forma, provocarían problemas en el resto del tratamiento.

Las operaciones de desarenado y desengrase se efectúan en el mismo tanque, dotado de inyección de aire. Dispone de una zona en el fondo donde sedimentan las arenas y de una pantalla deflectora superficial que disminuye la turbulencia debida al burbujeo, permitiendo así la flotación de las grasas. La inyección de aire (la potencia del equipo soplante) será tal que permita la sedimentación de las arenas y la resuspensión de la materia orgánica.

Existe la posibilidad de instalar equipos especiales para la concentración de las arenas (clasificadores oscilantes, tornillos de Arquímedes) o de las grasas (concentradores de grasas). Tras esta serie de



operaciones puramente físicas, el agua residual queda exenta de grandes sólidos y preparada para su posterior tratamiento (la EDAR es una instalación concebida para el proceso de residuos líquidos).

Todos estos desechos serán evacuados de la misma con destino hacia los vertederos municipales. Las grasas, en particular, dada su característica de “residuo peligroso”, necesitan ser procesadas en una planta de tratamiento adecuada y mediante un gestor autorizado **(6)**.

## **B. Tratamiento primario.**

El tratamiento primario por excelencia es la **decantación primaria**. Está orientado principalmente a la eliminación de los sólidos en suspensión, resultando menos eficaz en la reducción de la materia orgánica (Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO<sub>5</sub>). Se trata de un proceso físico de sedimentación por la única acción de la gravedad (separación sólido-líquido).

La tipología de un decantador suele ser circular y de fondo cónico. El agua clarificada rebosa por el vertedero perimetral y los fangos se acumulan en el fondo, dada su mayor densidad. Dispone de un puente radial en el cual quedan sujetas una serie de rasquetas de fondo que permiten la concentración de los fangos sedimentados (fangos primarios). Estos son purgados del sistema de forma periódica e impulsados hacia la línea de fangos. La composición de los fangos primarios (fracción orgánica y mineral) es variable dependiendo de las características y actividades de cada núcleo poblacional (porcentajes urbano e industrial).

En la decantación primaria suelen obtenerse reducciones medias del 60% de los sólidos en suspensión de entrada y 30% de la DBO<sub>5</sub>. En algunas estaciones depuradoras, la decantación primaria puede complementarse con un tratamiento físico-químico, añadiendo coagulantes y floculantes, que aumenta los rendimientos.

Los fangos primarios producidos tienen un elevado contenido de humedad (alrededor del 98-99%) y presentan alrededor de un 65% de materia orgánica fácilmente biodegradable. El resto es la fracción mineral que resulta muy adecuada para el proceso final de centrifugación.

## **C. Tratamiento secundario**

Tras el tratamiento primario, la contaminación en las aguas residuales es fundamentalmente de tipo soluble o coloidal y su eliminación, dado que por su naturaleza ya no puede realizarse por método físico alguno, se realiza generalmente mediante el denominado **sistema biológico de fangos activados**.

El proceso de depuración de las aguas residuales mediante el sistema de fangos activos es una alternativa de tratamiento muy clásica, del año 1914 **(7)**, aunque sigue siendo la más extendida en las



instalaciones urbanas existentes por sus características de fácil implementación y elevados rendimientos. Su principal inconveniente es su alta sensibilidad a desequilibrios en la concentración de oxígeno (producidos por variaciones bruscas de la carga contaminante).

En este sistema convencional, pueden distinguirse dos operaciones diferenciadas:

- **Oxidación biológica:** Etapa de aireación. La oxigenación en los reactores biológicos, es imprescindible para el mantenimiento de los microorganismos (fangos activos) y puede realizarse mediante los diferentes equipos mecánicos existentes en el mercado (turbinas superficiales o conjuntos de difusores y soplantes/turbocompresores).

La población bacteriana experimenta un crecimiento continuo debido al consumo de la materia orgánica y ha de mantenerse en un determinado nivel (concentración del licor mezcla) para llegar a un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos existentes en el reactor.

- **Decantación secundaria:** El licor mezcla formado por el agua depurada y los flóculos activos se envía al decantador secundario, donde se produce su separación por sedimentación. Es necesario recircular una gran parte de los fangos activos a la cuba de aireación para mantener la concentración suficiente y constante de bacterias. La reducción de  $DBO_5$  tras la salida de agua del decantador secundario suele situarse entre 85 % y 95 %.

El excedente, fango en exceso, se extrae del sistema y se envía hacia la línea de fangos. Los fangos en exceso contienen más de un 99% de agua y su composición es orgánica casi en su totalidad.

### 1.2.2. Línea de fangos

Los objetivos principales de la línea de fangos son la estabilización de la materia orgánica y la reducción del volumen de los lodos generados durante el proceso de depuración del agua residual.

El tratamiento de los fangos generados como consecuencia de la depuración de las aguas residuales (fangos primarios y fangos en exceso) cuenta con diferentes procesos: espesado, estabilización de fangos (digestión anaerobia) y deshidratación mecánica.

#### **A. Espesado**

El espesamiento es una etapa clave de la línea de fangos cuyo objetivo es incrementar la concentración de sólidos, reduciendo el volumen total de fango a tratar en las fases posteriores. La elección del sistema de espesamiento depende principalmente del tipo de fango (de su comportamiento frente a la sedimentación):

- **Espesamiento por gravedad:** se utiliza para el fango primario, ya que presenta buena capacidad de sedimentación. El fango concentrado se deposita en el fondo de los espesadores y el agua clarificada se separa por la parte superior, siendo un método simple, de bajo consumo energético y sin necesidad de reactivos.
- **Espesamiento mecánico (por flotación):** se aplica al fango en exceso o secundario, generado en los decantadores secundarios del tratamiento biológico, que contiene flóculos, generalmente de difícil sedimentación. Se emplean sistemas como mesas filtrantes, flotación por aire disuelto o espesadores de tambor, a veces combinados con la adición de polímeros, para aumentar la concentración de sólidos.

Las corrientes de fangos concentrados procedentes del espesamiento se mezclan y, posteriormente, se bombean al proceso de digestión anaerobia. Se pueden obtener concentraciones de sólidos en los fangos mixtos en torno al 4-5%

## **B. Estabilización de fangos: digestión anaerobia**

La digestión anaerobia (DA) se ha consolidado como una de las tecnologías más eficaces para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero, ya que permite transformar, mediante microorganismos que descomponen la materia orgánica **en ausencia de oxígeno**, los residuos orgánicos en biogás —una fuente de energía renovable— y producir un digestato aprovechable como enmienda orgánica.

En el ámbito de las estaciones depuradoras de aguas residuales, la DA se emplea desde hace décadas para valorizar los fangos generados durante el tratamiento del agua, contribuyendo a que estas instalaciones reduzcan sus costes energéticos y su dependencia de fuentes externas.

Los principales parámetros de funcionamiento de la digestión anaerobia son el tiempo de retención (alrededor de 25 días), la temperatura (rango mesofílico, en torno a 35°C ) y la agitación.

### **Fases de la digestión anaerobia:**

Se describen cuatro fases de la digestión anaerobia (8):

- **Hidrólisis:**
  - Degradación de la materia orgánica compleja (proteínas, carbohidratos y lípidos) en compuestos solubles de menor tamaño (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos).
  - Etapa potencialmente limitante cuando el sustrato presenta elevada complejidad estructural.
- **Acidogénesis:**
  - Conversión de los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.



- Elevada actividad fermentativa bacteriana.
- Posible acumulación de AGV y descenso del pH.
- **Acetogénesis:**
  - Transformación de AGV de cadena larga y alcoholes en acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ .
  - Degradación de ácidos grasos de cadena larga procedentes del aceite mediante  $\beta$ -oxidación.
  - Etapa clave en sistemas con elevada carga lipídica.
  - Preparación de los sustratos directos para la metanogénesis.
- **Metanogénesis:**
  - Conversión del acetato y del  $H_2/CO_2$  en metano por arqueas metanogénicas.
  - Fase directamente responsable de la producción de biogás.
  - Alta sensibilidad a variaciones de pH, temperatura e inhibidores.

La DA presenta limitaciones que restringen su rendimiento. El principal obstáculo es la fase inicial de hidrólisis (etapa limitante), que suele actuar como cuello de botella en el tratamiento de sustratos complejos, como los fangos de depuradora. La ineficiencia de esta etapa conduce a tiempos de retención prolongados, necesidad de reactores de gran tamaño y menores tasas de producción de biogás.

La determinación de los sólidos volátiles (SV) adquiere una especial relevancia, ya que representa la materia orgánica (suma de carbohidratos, proteínas y lípidos) potencialmente convertible en biogás durante la digestión anaerobia. La eliminación de los SV permite evaluar la eficiencia del proceso de digestión así como constatar el grado de estabilización del lodo. Se suelen conseguir rendimientos de la digestión anaerobia en torno al 45% de los SV.

Otro parámetro analítico de relevancia para la conversión de materia orgánica en metano es la DQO (Demanda Química de Oxígeno). Según estudios muy extendidos en digestión anaerobia, para sustratos fácilmente biodegradables se cumple que 1 Kg de DQO equivale a 350 L de  $CH_4$  (9).

Este es el valor teórico de producción de biogás a partir de un cosustrato orgánico (DQO biodegradable). Representa un valor realista para sustratos complejos, cuya composición incluye mezclas de carbohidratos, proteínas y otros compuestos, así como fracciones parcialmente biodegradables

Existen moléculas orgánicas difícilmente biodegradables (materia lignocelulósica, ciertas grasas y aminoácidos, etc.) con un Potencial Bioquímico de Metano (BMP) muy por debajo de los 350 L  $CH_4$ /Kg DQO.



Por otro lado, se puede encontrar casos en los que el BMP es mucho mayor, como el de la celulosa microcristalina, 410 L CH<sub>4</sub>/Kg DQO. Es un sustrato puro (100% carbohidrato) y su composición es sencilla (carbono, hidrógeno y oxígeno), lo que se traduce en una total biodegradabilidad y una transformación, durante la DA, de casi todo su contenido en metano. (22)

### C. Deshidratación y gestión final

Tras su estabilización, los fangos se someten al proceso de deshidratación mecánica (centrifugación, filtros banda o filtros prensa), con el fin de reducir aún más su contenido de agua. El fango deshidratado resultante puede destinarse a diferentes usos, como aplicación agrícola, compostaje, valorización energética (incineración) o eliminación controlada, siempre de acuerdo con la normativa vigente.

#### 1.2.3. Línea de gas.

El biogás producido en el digestor se conduce a través de tuberías hacia las unidades de almacenamiento y valorización. Antes de su utilización, puede ser deshumidificado y tratado químicamente para eliminar compuestos corrosivos, como el H<sub>2</sub>S.

Está constituido principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De forma habitual, el contenido en metano se sitúa entre el 50 y el 70%, mientras que el dióxido de carbono representa aproximadamente el 30-50% del volumen total del gas. En menor proporción, el biogás puede contener otros compuestos como sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), vapor de agua y gases traza.

- **Metano:** Es el componente responsable del poder energético del biogás. Se trata de un gas combustible que permite su aprovechamiento para la producción de energía térmica y eléctrica mediante sistemas de cogeneración.
- **Dióxido de carbono:** No contribuye a la generación de energía y actúa como gas inerte, reduciendo el poder calorífico del biogás a medida que aumenta su concentración.

En esta línea, no solo se controla el volumen total de biogás producido, sino también su composición, siendo el porcentaje de metano uno de los parámetros más relevantes para evaluar la calidad del gas y la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. Un mayor contenido en metano se asocia a un mejor rendimiento energético y a una operación más eficiente de los equipos de aprovechamiento del biogás.

El biogás generado en la EDAR puede destinarse a tres vías distintas:

- A. Calderas: Como sistema auxiliar para el calentamiento del fango.



- B. Motogeneradores: Maximizando la producción eléctrica y el aprovechamiento del calor residual.
- C. Antorcha: Exclusivamente como elemento de seguridad.

El destino preferente del biogás es su utilización en motogeneradores de cogeneración, ya que permiten un aprovechamiento energético más completo del recurso. En estos equipos, el biogás se emplea para la producción simultánea de:

- **Energía eléctrica**, destinada al autoconsumo de la EDAR.
- **Energía térmica**, recuperada tanto del sistema de refrigeración de los motores como de los gases de escape para el calentamiento de los digestores.

La antorcha constituye un elemento imprescindible y obligatorio por normativa, aunque no deseable desde el punto de vista energético. Su función es garantizar la eliminación segura del biogás en situaciones en las que no es posible su aprovechamiento en calderas o motogeneradores, tales como fallos en la línea de gas, paradas de los motogeneradores o excesos de producción de biogás.

### 1.3. CODIGESTIÓN ANAEROBIA

La codigestión anaerobia (Co-DA) destaca como un proceso fundamental e innovador dentro del sector de la producción de biogás. Es una tecnología que ha llamado la atención y está teniendo un reconocimiento creciente por su capacidad para aumentar la energía generada y hacer frente a múltiples retos medioambientales y de gestión de residuos.

La Co-DA consiste en la digestión simultánea de múltiples materias primas orgánicas en digestores anaerobios con el objetivo de aprovechar los beneficios sinérgicos que surgen de la combinación de diversos materiales. Este enfoque ha ampliado el alcance de la producción de biogás más allá de los sustratos agrícolas tradicionales, permitiendo que una gama más amplia de residuos orgánicos, tales como residuos de alimentos, lodos de depuradora y subproductos industriales, se utilicen como recursos valiosos en la producción de biogás.

La codigestión en EDAR más ampliamente extendida se basa en la inserción en el sistema de DA de productos en forma líquida que no han de ser hidrolizados (azúcares, alcoholes, etc.) y pueden entrar directamente en las etapas posteriores de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, evitando así la fase de hidrólisis.

Una vez que el sistema ha alcanzado una población suficiente de arqueas metanogénicas, tras un periodo de crecimiento y estabilización de aproximadamente diez días, la producción de metano responde, en un orden de minutos, a la alimentación de sustrato.



Zahan y colaboradores (10) reportan que una de las estrategias para mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia en las EDAR es la codigestión de lodos con otros residuos orgánicos. De esta manera, se incrementa la materia orgánica biodegradable y se proporciona un sustrato con una relación C/N óptima para el proceso.

La relación C/N influye en la producción de biogás debido a que el carbono es la fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es fundamental para el crecimiento de nuevas células. La mayoría de los valores reportados para la relación C/N óptima se encuentran en el rango de 20/1 a 30/1, mientras que la relación C/N en los lodos de depuración se encuentra alrededor de 5-10/1, por lo que la adición de cosustratos mejora este aspecto.





## 2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

### 2.1. CONTEXTO GLOBAL AMBIENTAL Y ENERGÉTICO

El actual contexto de emergencia climática, junto con la creciente dependencia de fuentes de energía no renovables, ha impulsado el desarrollo de políticas orientadas a la descarbonización y al uso eficiente de los recursos.

A nivel internacional, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible establece un marco común para abordar estos retos (11), destacando los siguientes objetivos, directamente relacionados con la gestión sostenible de residuos y la producción de energía renovable:

- **ODS 7 (Energía asequible y no contaminante):** Promueve el incremento del uso de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética, aspectos directamente relacionados con la producción de biogás a partir de residuos orgánicos en EDAR.
- **ODS 12 (Producción y consumo responsables):** Fomenta la gestión sostenible de los recursos y la valorización de residuos, principios fundamentales en la codigestión anaerobia de lodos y cosustratos de la industria alimentaria.
- **ODS 13 (Acción por el clima):** Impulsa la adopción de medidas para mitigar el cambio climático, entre las que se incluye la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la sustitución de combustibles fósiles por fuentes de energía renovable y la optimización de procesos industriales.

### 2.2. MARCO NORMATIVO Y ESTRATÉGICO EUROPEO

La Unión Europea ha establecido las bases para la transición hacia un modelo energético y productivo más sostenible, promoviendo la eficiencia en el uso de recursos, la reducción de emisiones y el desarrollo de energías renovables:

- **Pacto Verde Europeo (12):** Lanzado en 2019, constituye la hoja de ruta para que Europa alcance la neutralidad climática en 2050. Prioriza la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el fomento de energías limpias y la optimización de los sistemas productivos mediante la adopción de tecnologías sostenibles.

En el contexto de las EDARs, el Pacto Verde respalda iniciativas orientadas a transformar estas instalaciones en generadoras de energía renovable y en puntos estratégicos de la economía circular.

- **Plan de Acción para la Economía Circular (13):** Impulsa la reutilización y valorización de recursos, promoviendo la recuperación de residuos orgánicos y subproductos industriales como materia prima para procesos productivos.

En el ámbito de las EDARs, esta estrategia se traduce en la valorización de lodos y cosustratos mediante digestión anaerobia, favoreciendo la producción de biogás y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental de los residuos.

- **Directiva (UE) 2018/2001 (RED II) (14):** Esta directiva de energías renovables establece los objetivos vinculantes para incrementar el uso de energía procedente de fuentes renovables, reconociendo explícitamente el biogás como un vector energético renovable clave.

Esta normativa fomenta la integración de tecnologías de digestión anaerobia en instalaciones industriales y depuradoras, alineando la generación de biogás con los objetivos de descarbonización y eficiencia energética de la UE.

- **Directiva 2008/98/CE (15) sobre residuos y sus modificaciones (16):** Establecen la jerarquía de gestión de residuos, priorizando la prevención, reutilización y valorización frente a la eliminación.

La codigestión anaerobia se inscribe dentro de esta estrategia al permitir la valorización energética de lodos de depuradora y de cosustratos orgánicos provenientes de la industria alimentaria, contribuyendo a la economía circular y a la mitigación de impactos ambientales.

### 2.3. PROGRAMA LIFE

LIFE (17), es una de las principales herramientas financieras de la Unión Europea destinada a impulsar iniciativas en materia de medio ambiente y acción climática durante el periodo 2021-2027. Desempeña un papel clave dentro del Pacto Verde Europeo.



Su objetivo principal es promover una transición profunda hacia una economía innovadora, competitiva y eficiente en el uso de recursos, capaz de alcanzar la neutralidad climática en 2050 y de desvincular el crecimiento económico del consumo intensivo de combustibles fósiles.

LIFE se orienta firmemente a la protección del patrimonio natural europeo y a la salud y bienestar de la ciudadanía frente a los riesgos e impactos derivados de la degradación ambiental.



### 2.3.1. Proyecto LIFE MERLIN

LIFE MERLIN (18), (*Maximising biogas production with cutting-Edge technologies for greater Resource availability and digital tools for Increased efficiencies*), con una duración de septiembre 2024 a agosto 2028, forma parte del programa LIFE. Se desarrolla a partir de la colaboración de un consorcio formado por Cetaqua-Centro Tecnológico del Agua, líder del proyecto, junto con Aguas de Murcia (EMUASA), Aguas de Alicante (AMAEM), Labaqua y Createch360°.

Este proyecto busca maximizar la producción de biogás en las plantas de digestión anaerobia de las estaciones depuradoras de aguas residuales de Murcia-Este (Murcia) y Monte Orgegia (Alicante) mediante la implementación de dos vías principales:

- **Pretratamiento de los fangos previo a la digestión:** Combina procesos de saponificación y ultrasonidos con el fin de romper las estructuras celulares del material orgánico y liberar las enzimas contenidas en los fangos, facilitando así la biodegradación y elevando la producción de biogás. Esta tecnología también mejora la deshidratabilidad del fango, lo que reduce el volumen final de digestato a gestionar.
- **Codigestión inteligente:** Se lleva a cabo añadiendo cosustratos (residuos) provenientes de la industria alimentaria (aguas azucaradas) al proceso de digestión anaerobia. Se apoya en un sistema digital que recopila y analiza, en tiempo real, el comportamiento de los parámetros críticos del digestor frente a la adición de diferentes cosustratos. A partir de este análisis digital se recomiendan diferentes combinaciones y tasas de alimentación para maximizar la generación de biogás y la producción de energía eléctrica.

La combinación de ambas innovaciones (pretratamiento y codigestión) ofrecerá un significativo incremento de la producción de biogás.

El proceso de digestión anaerobia de la EDAR Monte Orgegia produce en la actualidad una media de 2.000 m<sup>3</sup> biogás al día, con una concentración aproximada de CH<sub>4</sub> del 60%. Dicho biogás se valoriza mediante un motor de cogeneración produciendo 1,46 GWh/año (disminución del coste de la energía eléctrica de explotación en unos 260.000 €/año). Esta energía producida se autoconsume en las propias instalaciones, contribuyendo a un 34% del consumo total de la EDAR.

Si cada kWh generado en España produce 0,33 kg CO<sub>2</sub>, la energía producida en Monte Orgegia ahorra la emisión de 482 Tn CO<sub>2</sub>/año, disminuyendo proporcionalmente el efecto invernadero de la actividad de depuración. Con la adición de cosustratos se prevé, en los próximos dos años, un incremento de la energía renovable generada del 30%, llegando a una producción eléctrica de 2 GWh/año y una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de 660 Tn CO<sub>2</sub>/año.



## 2.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

1. Realizar la calibración del equipo y el procedimiento para la medición del potencial metanogénico mediante AMPTS III *Light*, usando celulosa microcristalina como material de referencia.
2. Realizar los primeros estudios de codigestión a escala de laboratorio, en el marco del proyecto europeo LIFE MERLIN, cuantificando la producción de biogás (BMP) de cuatro cosustratos procedentes de la industria alimentaria (residuos de empresas que fabrican edulcorantes y golosinas) para validar su posterior aplicación a escala industrial en la EDAR Monte Orgegia.

Dentro de estos objetivos, se definen las siguientes etapas:

1. Caracterizar y seleccionar cosustratos procedentes de la industria alimentaria para su uso en procesos de codigestión con lodos de depuradora.
2. Evaluar parámetros clave del proceso, tales como la estabilidad del sistema (ausencia de inhibiciones) y el potencial de producción de biogás (BMP).
3. Generar información técnica preliminar que permita orientar futuras fases del proyecto hacia el escalado del proceso y la optimización de la codigestión en la EDAR Monte Orgegia.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LABORATORIO DE AGUAS DE ALICANTE

La empresa mixta AMAEM desarrolla las labores de control analítico del ciclo integral del agua a través de un laboratorio propio, representado en la Figura 3. Se encarga de la evaluación de la calidad de las aguas y otros materiales asociados a su gestión. Está equipado con instrumentación avanzada y cuenta con personal técnico experimentado con una gran cualificación en el mundo de la depuración. Todo ello permite asegurar la fiabilidad de los resultados obtenidos y el cumplimiento de los estándares técnicos exigidos por la normativa vigente en materia de aguas y residuos.

El laboratorio opera bajo un sistema de gestión de la calidad plenamente implantado y respaldado por, entre otros, el registro en el Censo Nacional de Laboratorios de Control, certificación (19) y la acreditación (20).



*Figura 3: Laboratorio de AMAEM en EDAR Monte Orgegia.*

#### 3.2. DETERMINACIONES ANALÍTICAS REALIZADAS EN EL MARCO DE LIFE MERLIN

Las analíticas de control para el proceso de digestión anaerobia son las siguientes y sirven para evaluar su rendimiento, detectar anomalías y tomar decisiones operativas.

- **Sólidos totales (ST)**

Se determinan mediante la evaporación de la muestra y el posterior secado del residuo a unos 103-105°C durante 1 día, en una estufa (Binder, ED 56). Representan la cantidad total de sólidos presentes en los lodos o cosustratos, incluyendo tanto la fracción orgánica como la inorgánica, expresándose en mg/L.

El procedimiento es sencillo. Se rotula un crisol y se pesa en la balanza (Sartorius Entris II BCE224I-1S). Se anota el peso (P1) con todos sus decimales. Tras colocar una cantidad concreta de la materia orgánica a estudio (30mL, por ejemplo), se lleva a la estufa. Al día siguiente, se pesa de nuevo (P2), se restan ambos pesos y se realiza la equivalencia a mg/L.

La fórmula que relaciona todo lo comentado es la siguiente:

- P2 = peso del recipiente + residuo seco (g)
- P1 = peso del recipiente vacío (g)
- V = volumen de la muestra (mL)
- 1000 = factor para convertir de g/mL a mg/L

$$ST (mg/L) = \frac{(p2-p1) \times 1000}{V}$$

- **Sólidos volátiles (SV)**

La determinación de los SV se realiza a partir de la muestra previamente seca utilizada para el análisis de ST, que se somete a una calcinación en mufla (Thermo Fisher Scientific, Thermolyne F6010) a una temperatura de 550°C.

La pérdida de masa registrada tras este proceso se atribuye a la fracción volátil (materia orgánica), mientras que el residuo corresponde a la fracción inorgánica (fracción mineral inerte en el proceso de digestión).

En este caso se pesaría la muestra antes de la mufla (que es correspondiente a P2, y tras ella, se vuelve a medir en la balanza (P3). La fórmula de cálculo de SV es la siguiente:

- P2 = peso del recipiente + residuo seco (g)
- P3 = peso del recipiente + residuo después de calcinar

$$SV (mg/L) = \frac{(p2-p3) \times 1000}{V}$$

- **DQO (demanda química de oxígeno)**

Es uno de los parámetros más utilizados para evaluar la carga contaminante tanto en aguas residuales como en fangos. Su valor representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica susceptible de ser degradada. Proporciona una estimación rápida y global del nivel de contaminación, integrando tanto compuestos biodegradables como sustancias no biodegradables que también consumen oxidante.

El procedimiento experimental consiste en utilizar un kit de DQO ya preparado con dicromato potásico ( $K_2Cr_2O_7$ ) en medio ácido. Según la concentración indicada por el kit, se realizan las diluciones de la muestra a analizar y se extraen 3 mL que se colocan en los tubos de reactivo. Posteriormente, los tubos se someten a digestión en un termorreactor a 150 °C durante 2 horas, lo que permite oxidar la materia orgánica presente. Tras el enfriamiento, la disminución del color del dicromato (de amarillo a



verde) se mide mediante espectrofotometría (Spectrophotometer XION 500), lo que permite determinar la concentración de oxígeno demandado en mg/L O<sub>2</sub>.

El seguimiento de la DQO resulta especialmente útil para evaluar el impacto de los pretratamientos (saponificación y sonicación) sobre la disgregación de la materia orgánica particulada. Un aumento de la DQO soluble indica una mayor solubilización de la materia orgánica, lo que facilita la etapa de hidrólisis y mejora el rendimiento de la digestión anaerobia. En los cosustratos procedentes de la industria alimentaria, la DQO permite evaluar la capacidad teórica energética adicional que estos materiales aportan al sistema.

- **pH:**

Indica el grado de acidez o alcalinidad del sustrato y es un parámetro fundamental en la digestión anaerobia, ya que los microorganismos responsables de la producción de biogás funcionan de manera óptima en un rango específico, generalmente cercano a neutro (6,8–7,5).

- Un pH demasiado bajo puede indicar acumulación de ácidos grasos volátiles, lo que inhibe la actividad microbiana y reduce la producción de metano.
- Un pH demasiado alto puede afectar a la solubilidad de nutrientes y a la eficiencia de este proceso biológico.

Para la determinación del pH se empleó un pH-metro con electrodo de vidrio especial para sólidos o suspensiones (Hach HQD HQ440D con electrodo PHC108)

### **3.3. MEDICIÓN DEL POTENCIAL METANOGÉNICO (BMP). SISTEMA AMPTS III LIGHT**

El AMPTS III *Light* (*Automatic Methane Potential Test System*), mostrado en la Figura 4, es un instrumento de laboratorio diseñado para medir el potencial metanogénico (BMP) de residuos orgánicos. Esta medición permite evaluar la biodegradabilidad de los sustratos, la cinética de degradación y su capacidad de generar biogás, información clave para planificar y optimizar procesos de digestión anaerobia en EDARs y otras plantas de valorización energética de residuos. Su operación completamente automática reduce la intervención manual y los errores, convirtiéndolo en una herramienta de referencia para la caracterización precisa de distintos tipos de residuos a escala de laboratorio.



*Figura 4. Vista general del sistema AMPTS III Light. (A): Biorreactores de digestión anaerobia. (B): Botellas eliminadoras de CO<sub>2</sub>. (C): Válvulas de cuantificación de CH<sub>4</sub>.*

El fundamento del AMPTS III *Light* se basa en la digestión anaerobia controlada de la materia orgánica en 9 biorreactores con agitación (Figura 3A). Pueden contener una mezcla de sustrato e inóculo (fango procedente de la EDAR) o actuar como blanco. Se mantienen a una temperatura de 37° gracias al baño termostatzado en los que están sumergidos. Gracias a que el sistema opera por lotes, cada biorreactor procesa una muestra de forma independiente durante todo el ensayo. Esto permite la producción simultánea de biogás y facilita la comparación paralela de diferentes cosustratos, tratamientos o réplicas experimentales dentro del mismo ensayo, optimizando el tiempo y aumentando la fiabilidad de los resultados.

El biogás generado en los biorreactores, compuesto principalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, fluye a través de un sistema de tubos conectados en cada biorreactor hacia 9 botellas que contienen una dilución de NaOH 3M, representadas en la Figura 4B. Estas botellas eliminan el CO<sub>2</sub> mediante la formación de carbonatos, asegurando que únicamente la fracción de metano continúe su recorrido hacia las unidades de medición. Este paso es fundamental para que la cuantificación refleje exclusivamente la producción metanogénica real de cada sustrato.

El metano generado continúa fluyendo por el tubo saliente de la botella hasta alcanzar las válvulas de medición por desplazamiento de agua, señaladas en la Figura 4C, donde desplaza un volumen de líquido proporcional a su cantidad. El agua funciona simultáneamente como medio de desplazamiento y sello, evitando fugas, protegiendo los sensores y asegurando que todo el CH<sub>4</sub> producido sea cuantificado de manera precisa y reproducible.



El sistema está controlado mediante software que registra de manera continua la producción de metano, permitiendo determinar el volumen acumulado, la velocidad de producción, la cinética de degradación y detectar posibles inhibiciones del proceso.

### **3.3.2. Metodología experimental**

El procedimiento experimental sigue una secuencia controlada que asegura la estabilidad del inóculo, la homogeneidad de los biorreactores y la fiabilidad de los resultados, permitiendo determinar de forma representativa el rendimiento energético de los cosustratos estudiados.

#### **1. Desgasificación y homogeneización del inóculo**

En primer lugar, se somete el inóculo, que corresponde al fango de los digestores de la EDAR, a un periodo de desgasificación en los 9 biorreactores disponibles (aproximadamente con 1800 mL en cada uno) a una temperatura constante de 37°C. El objetivo principal de la desgasificación es el reducir la producción de metano asociada a la materia orgánica fácilmente biodegradable presente en el propio inóculo. El proceso tiene una duración media de 4 a 8 días, dependiendo de la evolución de la producción de metano, y se interrumpe para evitar alteraciones en la actividad microbiana que podrían sesgar los resultados obtenidos.

Una vez finalizada la desgasificación, con el objetivo de disponer de un inóculo totalmente homogéneo para todos los reactores, se mezcla el contenido de las nueve botellas de fango en bidones de 10 L. Esta etapa ha resultado ser imprescindible para obtener datos comparables y reproducibles, asegurando que cualquier diferencia en la producción de metano sea debida exclusivamente a los cosustratos estudiados.

#### **2. Preparación de los reactores BMP**

Antes de iniciar la determinación de los BMP se han de realizar las analíticas del inóculo y los cosustratos (SV y DQO) que permitan establecer la cantidad de inóculo a añadir a una masa de cosustrato. La relación entre las masas de inóculo y cosustrato se denomina ISR (*Inoculum-to-Substrate Ratio*).

$$ISR = \frac{SV \text{ del inóculo}}{SV \text{ del cosustrato}}$$

Se recomienda trabajar con un ISR entre 2 y 4 para mantener un equilibrio entre la capacidad degradativa del inóculo y la cantidad de materia orgánica disponible, evitando inhibiciones por exceso de sustrato y asegurando que los microorganismos dispongan de suficientes nutrientes para su actividad metabólica.

En los experimentos del presente estudio se adoptó un  $ISR=2$  para todos los cosustratos. Considerando que tanto los cosustratos como los lodos presentaban una densidad aproximada de 1 kg/L, las mezclas se realizaron midiendo volúmenes.

---

### Ejemplo de cálculo. EXP01: Inóculo y Cosustrato A

- $m_i$  = masa de inóculo
- $m_A$  = masa de cosustrato A
- Densidad = 1Kg/L → 1g/mL
- Volumen del biorreactor = 1800mL → 1800g (se empleó en g)
- SV del inóculo = 15,5 g/L
- SV del cosustrato = 103,3 mg/L

$$ISR = \frac{SV \text{ del inóculo}}{SV \text{ del cosustrato}} \rightarrow 2 = \frac{0,0155 (g/mL) \times m_i(g)}{0,1033 (g/mL) \times m_A(g)} \rightarrow m_i(g) = 13,329m_A(g)$$

$$\text{Masa final esperada} \rightarrow m_i(g) + m_A(g) = 1800(g) \rightarrow m_i(g) = 1800(g) - m_A(g)$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

- Masa de inóculo ( $m_i$ ) = 125,61 g
- Masa de cosustrato A ( $m_A$ ) = 1674,39 g

---

### 3. Puesta a punto y calibración del procedimiento

La calibración del procedimiento se realizó según la metodología propuesta (22), aceptada por la comunidad científica. Este método utiliza celulosa microcristalina como material de referencia y control positivo por ser un compuesto homogéneo, bien caracterizado y con un potencial metanogénico conocido, mencionado con anterioridad (410 L biogás/ Kg SV).

Este proceso de calibración permite estandarizar los procedimientos experimentales para reducir la dispersión de resultados y mejorar la reproducibilidad entre laboratorios.

En el presente trabajo se obtuvieron valores de producción de metano para la celulosa dentro de los rangos aceptados por el método de referencia. Estos resultados confirmaron tanto la adecuada actividad del inóculo como el correcto funcionamiento del sistema de medición, validando así el procedimiento experimental previamente a la evaluación de los cosustratos objeto de estudio.

#### Características clave del método de calibración:

- El control positivo se realiza con celulosa microcristalina, eliminando ambigüedades sobre otros posibles sustratos de referencia.
- Los ensayos deben realizarse por triplicado.
- El BMP obtenido debe situarse en un rango concreto, aproximadamente entre 340 y 395 L CH<sub>4</sub>/Kg SV. Valores fuera de este intervalo indican que el ensayo no es válido y no debe utilizarse para interpretar resultados de otros sustratos .
- La prueba finaliza cuando la producción diaria de metano durante tres días consecutivos sea <1% del volumen de metano acumulado.
- La producción de metano utilizada para el cálculo de la duración debe ser neta, es decir, restando la contribución del inóculo (blanco).
- Se validarán resultados si para la celulosa se obtienen desviaciones estándar menores al 6%
- No se recomienda rechazar los resultados debido a una desviación relativa estándar demasiado alta de los blancos.

#### 4. Desarrollo de experimental (estudio del BMP de distintos cosustratos)

En el presente TFG se realizaron dos experimentos diferenciados, denominados **EXP01** y **EXP02**, para un total de cuatro cosustratos evaluados. Los cuatro cosustratos analizados: Cosustrato A, Cosustrato B, Cosustrato C y Cosustrato D, (CA, CB, CC y CD, respectivamente) eran muestras de residuos alimentarios de diferentes industrias de golosinas y edulcorantes de Alicante y Murcia. No se conoce con exactitud la procedencia de los mismos ya que las descargas en la EDAR las realiza una empresa intermediaria encargada de la recogida de los residuos y del transporte a la planta.

Los 9 biorreactores del AMPTS III *light* se distribuyeron de la siguiente manera:

- **Biorreactores blancos** (solo inóculo), por triplicado. Botellas B7, B8 y B9. Se utilizan para cuantificar la producción de metano endógena del inóculo y corregir la producción total en la muestra.
- **Biorreactores en codigestión**, por triplicado:
  - B1, B2 y B3 para uno de los cosustratos a estudio. (CA en EXP01 y CC en EXP02).
  - B4, B5 y B6 para otro de ellos. (CB en EXP01 y CD en EXP02).

Los experimentos con cosustratos tuvieron una duración aproximada de 2 a 3 semanas, registrando de manera continua la producción de metano en cada biorreactor. Esta fase permitió observar la



cinética de degradación de los cosustratos y determinar el momento en el que se detiene el experimento (cuando la producción diaria de metano es inferior al 0,5 % del total acumulado).

### Cálculo del potencial metanogénico BMP

El cálculo final del BMP de un cosustrato expresado como volumen de metano por masa de SV eliminados (L CH<sub>4</sub>/Kg SV), se realiza restando el metano producido en los blancos al metano producido en las muestras de los cosustratos (Volumen CH<sub>4</sub> neto) dividido por la masa de SV del cosustrato añadidas en el experimento.

$$BMP \left( \frac{L CH_4}{kg SV} \right) = \frac{Volumen CH_4 \text{ neto (L)}}{kg SV}$$

Como la cantidad de inóculo en las muestras y en los blancos no es la misma, se introduce un factor de corrección de masas para referir todos los resultados a la misma cantidad de inóculo.

$$Factor \ de \ corrección \ de \ masas \ (F) = \frac{g \ de \ inóculo \ en \ la \ muestra}{g \ de \ inóculo \ en \ el \ blanco \ (1800)}$$

$$Volumen \ CH_4 \ neto = Volumen \ de \ CH_4 \ en \ la \ muestra - F \times Volumen \ de \ CH_4 \ en \ el \ blanco$$

### Cálculo de la DQO (g) producida en el experimento

Como se ha explicado anteriormente, únicamente para sustratos totalmente biodegradables, se puede asumir que:

$$1 \ Kg \ DQO = 350 \ L \ CH_4.$$

Por tanto, para calcular los g de DQO producidos, se hará el cálculo teniendo en cuenta los L producidos por la muestra:

$$DQO \ (g) \ producidos: \frac{L \ CH_4 \ producido \ por \ la \ muestra \times \ 1kg \ DQO}{350 \ L \ CH_4}$$

### Cálculo de la biodegradabilidad del cosustrato (%)

El porcentaje de biodegradabilidad de un cosustrato se calcula como la relación entre la masa de DQO eliminada y la masa de DQO total añadida en el experimento. La masa de DQO eliminada se calcula a través del metano producido en el ensayo y su relación con la DQO (1kg DQO equivale a 350 L CH<sub>4</sub>).

$$Biodegradabilidad \ (%) = \frac{g \ DQO \ equivalentes \ al \ gas \ producido}{g \ DQO \ en \ la \ muestra} \times 100$$

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen e interpretan, los resultados obtenidos en la presente investigación.

### 4.1. DESGASIFICACIÓN DEL INÓCULO

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos para la desgasificación del inóculo en el EXP01. La Tabla 1 contiene los volúmenes acumulados en **condiciones normales (NmL)** de metano durante la desgasificación mientras que la Tabla 2 contiene los caudales diarios. En la Figura 8 se representan los citados valores.

Tabla 1. Producción acumulada de metano por biorreactor en EXP01

METANO: VOLÚMENES ACUMULADOS EXP01										
Tiempo (Días)	B1 V (NmL)	B2 V (NmL)	B3 V (NmL)	B4 V (NmL)	B5 V (NmL)	B6 V (NmL)	B7 V (NmL)	B8 V (NmL)	B9 V (NmL)	MEDIAS
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	843,3	840,7	884,0	1045,3	897,7	811,0	803,1	748,1	813,7	854,1
2	1253,9	1253,1	1327,1	1586,0	1358,8	1200,3	1195,5	1082,2	1211,8	1274,3
3	1546,7	1549,1	1644,9	1974,2	1689,8	1473,7	1474,2	1305,7	1495,9	1572,7
4	1779,1	1780,9	1896,7	2279,7	1958,2	1688,4	1695,2	1473,6	1720,7	1808,1
5	1973,7	1975,0	2106,2	2528,2	2185,4	1865,8	1876,7	1603,6	1905,6	2002,2
6	2109,4	2107,1	2254,3	2702,5	2347,9	1988,3	2003,2	1683,6	2030,7	2136,3
7	2252,8	2258,9	2406,2	2888,0	2525,2	2115,3	2138,5	1776,5	2165,6	2280,8

Tabla 2. Caudal diario de metano por biorreactor en EXP01

METANO: CAUDALES DIARIOS EXP01										
Tiempo (Días)	B1 Q (NmL/día)	B2 Q (NmL/día)	B3 Q (NmL/día)	B4 Q (NmL/día)	B5 Q (NmL/día)	B6 Q (NmL/día)	B7 Q (NmL/día)	B8 Q (NmL/día)	B9 Q (NmL/día)	MEDIAS
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	843,3	840,7	884,0	1045,3	897,7	811,0	803,1	748,1	813,7	854,1
2	410,6	412,4	443,1	540,8	461,1	389,3	392,4	334,0	398,0	420,2
3	292,8	296,0	317,8	388,2	331,0	273,5	278,8	223,5	284,2	298,4
4	232,4	231,8	251,8	305,6	268,4	214,7	221,0	167,9	224,7	235,4
5	194,6	194,1	209,5	248,4	227,2	177,4	181,5	130,0	185,0	194,2
6	135,7	132,2	148,1	174,3	162,5	122,4	126,5	80,0	125,1	134,1
7	106,3	111,5	116,5	140,5	135,1	95,0	102,8	64,1	99,0	107,9

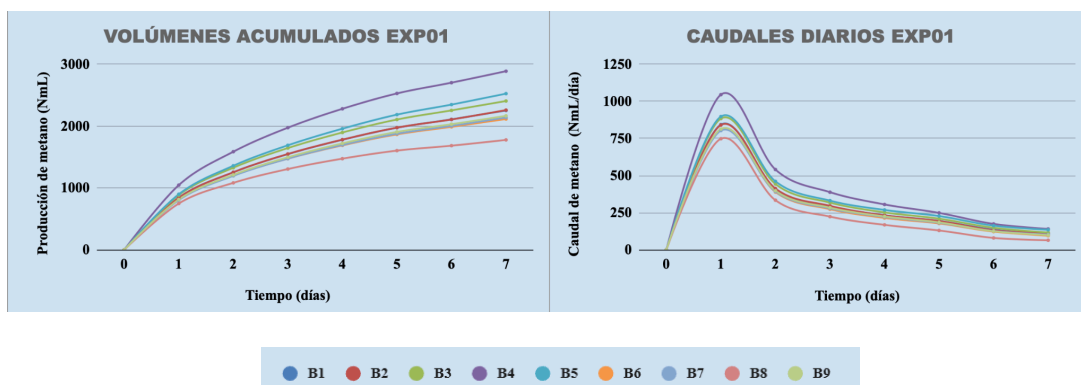


Figura 5. Volumen de metano y caudal diario por biorreactor, EXP01



No se incluyen los resultados y gráficas de la desgasificación en el EXP02 por obtener resultados muy similares a los del EXP01.

En ambos experimentos se produjo rápidamente la máxima producción de metano, situada entre el primer y el segundo día de incubación del inóculo. Esto confirma que la materia orgánica existente ya había sido parcialmente digerida en los digestores de la EDAR y que se encontraba en forma de acetato, preparada para la fase de metanogénesis.

La Figura 5 denota cierta dispersión (heterogeneidad) entre los distintos biorreactores de inóculo. Este hecho fue determinante para decidir el mezclado de las nueve botellas después de la desgasificación y previo al comienzo de los ensayos para la determinación del BMP de los cosustratos.

Se hace constar que se producen variaciones en las curvas obtenidas debido a las diferencias de concentración del inóculo, de su naturaleza heterogénea y del tiempo que transcurrió entre la toma de muestras y la puesta en marcha del experimento.

#### 4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS INÓCULOS Y LOS COSUSTRATOS

La Tabla 3 muestra los resultados analíticos de la caracterización de inóculos y cosustratos, necesaria para la preparación de las mezclas en los biorreactores.

Tabla 3. Caracterización de inóculos y cosustratos. (CA): Cosustrato A. (CB): Cosustrato B. (CC): Cosustrato C. (CD) Cosustrato D.

ANALÍTICAS EXP01				ANALÍTICAS EXP02			
(g/L)	Inóculo	CA	CB	(g/L)	Inóculo	CC	CD
DQO <sub>tot</sub>	22,0	174,5	182,0	DQO <sub>tot</sub>	30,0	128,0	65,0
ST	26,4	104,3	116,8	ST	27,8	77,2	48,0
SV	15,5	103,3	112,1	SV	18,0	73,9	47,0
SV/ST	0,59	0,99	0,96	SV/ST	0,65	0,96	0,98
DQO/SV	1,42	1,69	1,62	DQO/SV	1,67	1,73	1,38

La concentración de los inóculos fue diferente en los dos experimentos a pesar de que las muestras pertenecían al mismo digestor de la EDAR. El inóculo del EXP01 presentó una DQO de 22 g/L, mientras que el del EXP02 alcanzó los 30 g/L. La diferencia se debe al intervalo de tiempo transcurrido entre ambos experimentos (2 meses) y a la propia variación con el tiempo de la concentración en el digestor de la EDAR. Los valores de concentración de ST y SV en los inóculos están en consonancia con los valores de DQO.

Las concentraciones de DQO de los cosustratos analizados fueron 174,5, 182, 128 y 65 g/L, respectivamente para CA, CB, CC y CD.



En cuanto a la composición, las relaciones SV/ST de los cuatro cosustratos (cercanas a la unidad) indican que estos son prácticamente orgánicos en su totalidad.

#### 4.3. PREPARACIÓN DE LOS BIORREACTORES PARA LOS ENSAYOS BMP.

Las mezclas para los biorreactores de ambos experimentos se realizaron en base a los SV de los inóculos y los cosustratos, tal y como se indica en el capítulo de Materiales y Métodos. En la Tabla 4 se muestran los volúmenes tomados para cada experimento, adoptando un ISR = 2.

Tabla 4. Volúmenes de inóculo y cosustrato en los biorreactores

CANTIDADES REQUERIDAS EXP01				CANTIDADES REQUERIDAS EXP02			
Muestra	ISR	g de inóculo	g de cosustrato	Muestra	ISR	g de inóculo	g de cosustrato
Blanco	0	1800	0,0	Blanco	0	1800	0,0
CA	2	1674	126,0	CC	2	1605	195,0
CB	2	1684	116,0	CD	2	1511	289,0

Los mayores volúmenes de cosustrato utilizados en el EXP02 se deben a la mayor concentración del inóculo en este experimento y a las menores concentraciones de CC y CD.

#### 4.4. ENSAYOS BMP DE LOS COSUSTRATOS ANALIZADOS.

En este apartado se muestran todos los resultados obtenidos en los ensayos BMP de los cuatro cosustratos analizados. Estos resultados son los valores medios de los tres triplicados realizados en cada experimento.

Mencionar que los resultados obtenidos de la producción de metano en los blancos de los dos experimentos, después del proceso de desgasificación, muestran valores en torno al 0,5-1% del metano producido por los cosustratos, por lo que su influencia en los resultados es mínima.

##### 4.4.1. Cosustrato A

En la Tabla 5 se observan los valores promedio diarios acumulados por el triplicado. Los resultados finales obtenidos en el experimento de codigestión del Cosustrato A, se recogen en la Tabla 6. Muestran una biodegradabilidad total, es decir, una metanización del 100% de la DQO administrada, indicando que su composición orgánica es totalmente asimilable por la biomasa anaerobia (coherente con su naturaleza, aguas azucaradas).

Los cálculos mostrados a continuación son los mismos para los 4 cosustratos analizados y las fórmulas se encuentran en apartado de Materiales y Métodos.

→ Teniendo en cuenta que: 1kg DQO = 350L CH<sub>4</sub> acumulado en sustratos totalmente biodegradables, podemos calcular los gramos de DQO producidos por la muestra:



$$DQO (g) = \frac{L CH_4 \text{ producido por la muestra} \times 1000g DQO}{350 L CH_4} \rightarrow \frac{7,7274 L CH_4 \times 1000g DQO}{350 L CH_4} = 22,0 g DQO$$

→ Para el cálculo de la biodegradabilidad:

$$Biodegradabilidad (\%) = \frac{g DQO \text{ equivalentes al gas producido}}{g DQO \text{ en la muestra}} \times 100 \rightarrow \frac{22,1}{22} \times 100 = 100\%$$

El BMP del cosustrato A obtuvo un valor de 593 NL CH<sub>4</sub>/Kg SV, observable tanto en la Tabla 5, situado en el último día de experimento (día 20, columna del BMP), como en la Tabla 6. El proceso continuó hasta el agotamiento por lo que no se produjeron fenómenos de inhibición ni limitaciones nutricionales o saturación del inóculo.

→ Para el cálculo del BMP:

$$BMP \left( \frac{L CH_4}{kg SV} \right) = \frac{Volumen CH_4 \text{ neto (L)}}{kg SV \text{ administrados}} \rightarrow \frac{7,727 (L)}{0,013 kg SV} = 593,7 \frac{L CH_4}{kg SV}$$

Tabla 5. Valores promedio del triplicado CA

VALORES PROMEDIO ACUMULADOS (CA)				
DÍAS	V CH <sub>4</sub> neto (NmL)	Q diario (NmL/día)	DQO (g)	NL CH <sub>4</sub> /kg VS
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2370,6	2370,6	6,8	182,1
2	3816,5	1445,9	10,9	293,2
3	5951,5	2135,1	17,0	457,3
4	6566,0	614,5	18,8	504,5
5	6968,6	402,6	19,9	535,4
6	7165,7	197,0	20,5	550,5
7	7252,8	87,1	20,7	557,2
8	7321,5	68,7	20,9	562,5
9	7375,0	53,5	21,1	566,6
10	7430,1	55,1	21,2	570,9
11	7480,1	50,0	21,4	574,7
12	7521,1	41,1	21,5	577,8
13	7556,5	35,4	21,6	580,6
14	7587,8	31,3	21,7	583,0
15	7617,2	29,3	21,8	585,2
16	7644,7	27,6	21,8	587,3
17	7666,9	22,1	21,9	589,0
18	7689,1	22,2	22,0	590,8
19	7709,9	20,8	22,0	592,4
20	7727,4	17,5	22,1	593,7

Tabla 6. Recopilación de datos del Cosustrato A

COSUSTRATO A		
<b>ANALÍTICAS PREVIAS REALIZADAS</b>	<b>CA</b>	<b>INÓCULO</b>
SV (g/L)	103,3	15,5
DQO (g/L)	174,5	22,0
<b>CANTIDADES ADMINISTRADAS (ISR=2)</b>	<b>CA</b>	<b>INÓCULO</b>
V (g)	126,0	1674,0
SV (g)	13,0	27,9
DQO (g)	22,0	36,8
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>CA</b>	
V (NmL) CH <sub>4</sub> neto producido	7727,4	
DQO (g) producidos	22,1	
BMP (NL/Kg SV)	593,7	
BMP (NL/Kg DQO)	351,5	
METANIZACIÓN %	100,42%	

Las curvas de evolución del BMP con el tiempo de los triplicados correspondientes al Cosustrato A se encuentran prácticamente solapadas, representadas en la Figura 6. Esto indica una reproducibilidad total de los resultados en los tres biorreactores. A los 13-14 días del inicio del experimento, el caudal de metano producido ya es menor de un 0,5% del día anterior y se podría dar prácticamente por concluido. Estos resultados los observamos tanto en la estabilización de las curvas en la Figura 6 como en los valores de caudal promedio de la Tabla 5.

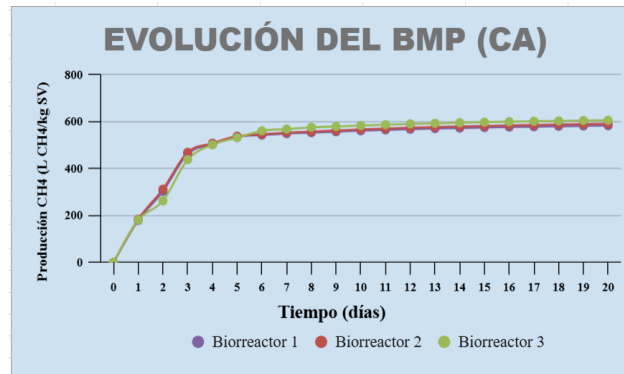


Figura 6. Evolución del BMP del CA por biorreactor

La curva del caudal diario de metano muestra un máximo absoluto al primer día de inicio del experimento (Figura 7), indicando la fácil biodegradabilidad de una gran parte del cosustrato: azúcares simples, almidón, proteínas solubles, lípidos fácilmente hidrolizables. Presenta un segundo pico a los tres días, indicando la existencia en su composición de otras moléculas que han tardado dos días más en ser totalmente digeridas, en principio más difícilmente hidrolizables: celulosa, hemicelulosa, lignina, compuestos fenólicos y otros polímeros estructurales.

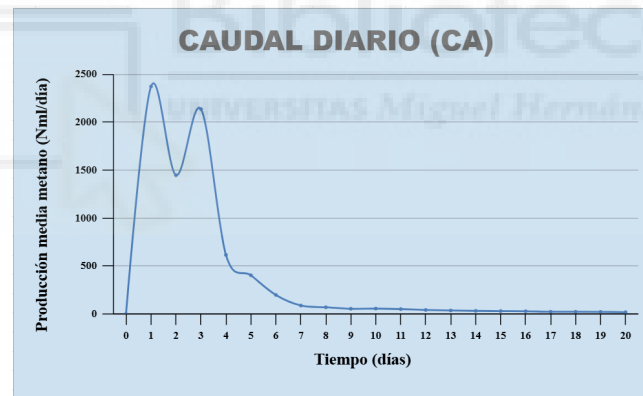


Figura 7. Caudal promedio diario de CA

#### 4.4.2. Cosustrato B

La Tabla 7 muestra los valores promedio diarios acumulados por 2 de los 3 biorreactores que forman el triplicado, eliminando así los obtenidos por el Biorreactor 5. Esto fue debido a ofrecer valores incoherentes (metanización del 130%), posiblemente por la heterogeneidad de la muestra (existencia de grumos) o por el incorrecto funcionamiento de la eliminación de CO<sub>2</sub> por parte de las botellas con la disolución de NaOH.

Los resultados finales obtenidos en el experimento de codigestión correspondientes al Cosustrato B y representados en la Tabla 8, también muestran una biodegradabilidad total (metanización cercana al 100% de la DQO, si se comparan los g de DQO introducidos en el biorreactor y los formados en el

ensayo), indicando igualmente que su composición orgánica es totalmente asimilable por la biomasa. En el proceso tampoco se produjeron inhibiciones.

Para el BMP del cosustrato B se obtuvo un valor de 567 NL CH<sub>4</sub>/Kg SV, observable tanto en la casilla del día 20 correspondiente a la columna del BMP como en la Tabla 8.

Tabla 7. Valores promedio del triplicado CB

VALORES PROMEDIO ACUMULADOS (CB)				
DÍAS	V CH <sub>4</sub> neto (NmL)	Q diario (NmL/día)	DQO (g)	NL CH <sub>4</sub> /kg VS
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2411,1	2411,1	6,9	185,4
2	3708,9	1297,8	10,6	285,2
3	5669,5	1960,6	16,2	436,0
4	5850,3	180,8	16,7	449,9
5	5951,6	101,4	17,0	457,7
6	6098,0	146,4	17,4	468,9
7	6276,7	178,7	17,9	482,7
8	6483,4	206,7	18,5	498,6
9	6768,8	285,4	19,3	520,5
10	6934,5	165,7	19,8	533,3
11	6996,6	62,1	20,0	538,0
12	7059,6	63,0	20,2	542,9
13	7115,8	56,2	20,3	547,2
14	7165,7	49,9	20,5	551,1
15	7212,7	47,0	20,6	554,7
16	7255,3	42,6	20,7	557,9
17	7290,3	35,0	20,8	560,6
18	7322,6	32,3	20,9	563,1
19	7350,8	28,2	21,0	565,3
20	7372,5	21,7	21,1	567,0

Tabla 8. Recopilación de datos del Cosustrato B

COSUSTRATO B		
ANALÍTICAS PREVIAS REALIZADAS	CB	INÓCULO
SV (g/L)	112,1	15,5
DQO (g/L)	182,0	22,0
CANTIDADES ADMINISTRADAS (ISR=2)	CB	INÓCULO
V (g)	116,0	1684,0
SV (g)	13,0	27,9
DQO (g)	21,1	37,0
RESULTADOS OBTENIDOS	CB	
V (NmL) CH <sub>4</sub> neto producido	7372,5	
DQO (g) producidos	21,1	
BMP (NL/Kg SV)	567,0	
BMP (NL/Kg DQO)	349,2	
METANIZACIÓN %	99,80%	

En la Figura 8 se presentan las 3 curvas de evolución del BMP correspondiente al triplicado. Se observa que los resultados no son representativos y se concluye con lo expuesto unas líneas atrás.

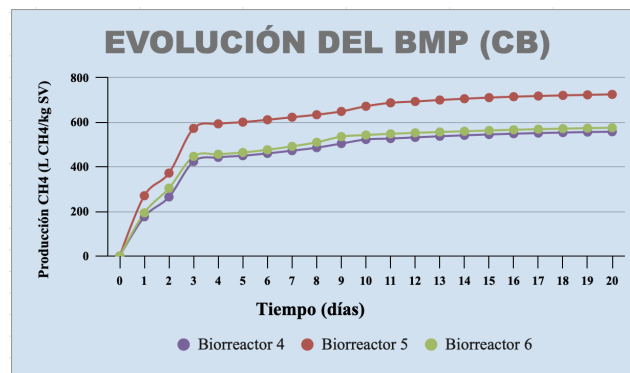


Figura 8. Evolución del BMP del CB por biorreactor

La curva del caudal diario de metano (Figura 9) muestra un máximo absoluto al primer día de inicio del experimento, indicando la fácil biodegradabilidad de una gran parte del cosustrato, y otros dos picos (a los tres y a los nueve días), indicando tres tipos de sustancias de diferente biodegradabilidad en su composición. En este caso, la muestra era de una industria de edulcorantes.

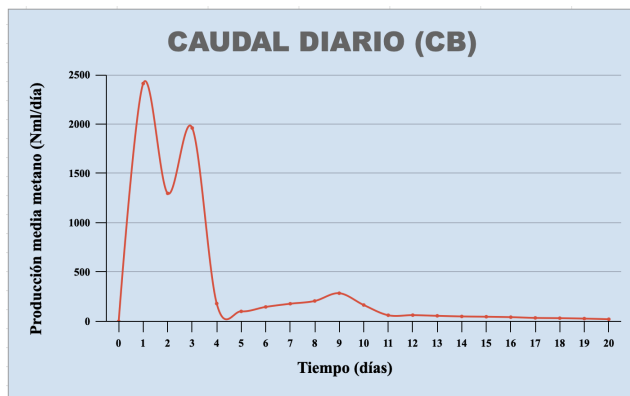


Figura 9. Caudal promedio diario de CB

#### 4.4.3. Cosustrato C

En la Tabla 9 recogen los valores promedio diarios acumulados por el triplicado. Los resultados finales obtenidos en el experimento de codigestión del Cosustrato C, se representan en la Tabla 10.

El Cosustrato C también mostró una biodegradabilidad total. El valor obtenido de 103,5 % de metanización (Tabla 10) indica cierto error, debido a que las heterogeneidades en la muestra (grumos) pueden influir en los resultados analíticos. El proceso continuó hasta el agotamiento no mostrando inhibición alguna.

Para el BMP del Cosustrato C se obtuvo un valor de 627,7 NL CH<sub>4</sub>/Kg SV. Observable en las mismas casillas que los cosustratos anteriores (valor del último día de experimento en la columna del BMP, Tabla 9, y en la Tabla 10).

Tabla 9. Valores promedio del triplicado CC

VALORES PROMEDIO ACUMULADOS (CC)				
DÍAS	V CH4 neto (NmL)	Q diario (NmL/día)	DQO (g)	NL CH4/kg VS
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2754,8	2754,8	7,9	191,2
2	5670,2	2915,4	16,2	393,5
3	8193,9	2523,7	23,4	568,6
4	8669,7	475,7	24,8	601,6
5	8747,0	77,3	25,0	607,0
6	8785,2	38,2	25,1	609,6
7	8821,8	36,6	25,2	612,2
8	8866,2	44,4	25,3	615,3
9	8896,6	30,3	25,4	617,4
10	8924,1	27,6	25,5	619,3
11	8956,3	32,2	25,6	621,5
12	8986,4	30,0	25,7	623,6
13	9004,3	17,9	25,7	624,8
14	9022,3	18,0	25,8	626,1
15	9034,7	12,4	25,8	627,0
16	9044,8	10,0	25,8	627,7

Tabla 10. Recopilación de datos del Cosustrato C

COSUSTRATO C		
<b>ANALÍTICAS PREVIAS REALIZADAS</b>	<b>CC</b>	<b>INÓCULO</b>
SV (g/L)	73,9	18
DQO (g/L)	128,0	30,0
<b>CANTIDADES ADMINISTRADAS (ISR=2)</b>	<b>CC</b>	<b>INÓCULO</b>
V (g)	195,0	1605,0
SV (g)	14,4	32,4
DQO (g)	25,0	48,2
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>CC</b>	
V (NmL) CH4 neto producido	9044,8	
DQO (g) producidos	25,8	
BMP (NL/Kg SV)	627,7	
BMP (NL/Kg DQO)	362,4	
METANIZACIÓN %	103,50%	

Las curvas de evolución del BMP de los triplicados (Figura 10), están casi solapadas indicando una reproducibilidad total de los resultados en los tres biorreactores, alcanzando al sexto día casi el máximo de la producción de metano.

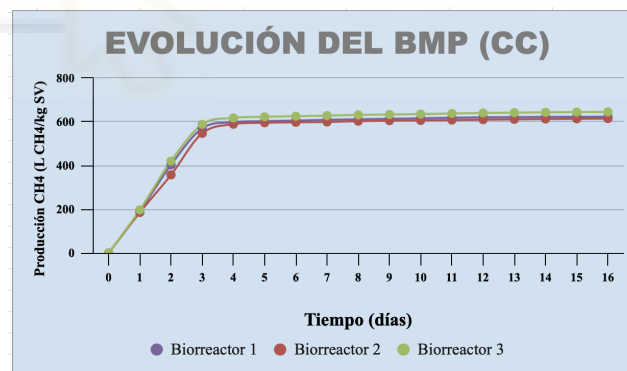


Figura 10. Evolución del BMP del CC por biorreactor

La curva del caudal diario de metano mostrada en la Figura 11, muestra un único máximo que se produce al segundo día del inicio del experimento, indicando la fácil y rápida biodegradabilidad de este cosustrato.

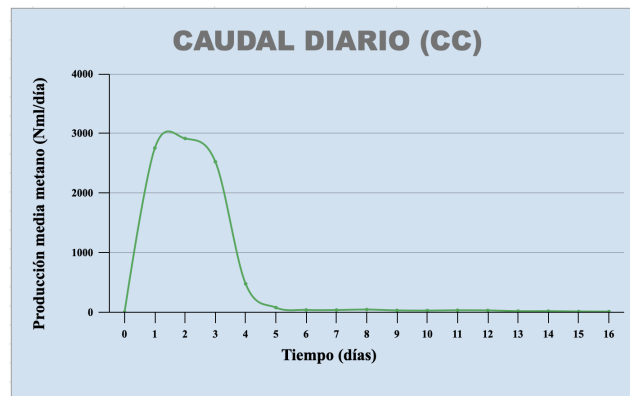


Figura 11. Caudal promedio diario de CC

#### 4.4.4. Cosustrato D

En la Tabla 11 se muestran los valores promedio diarios acumulados por el triplicado. Los resultados finales obtenidos en el experimento de codigestión del Cosustrato D, se representan en la Tabla 12.

Los resultados obtenidos del Cosustrato D, como en el resto de cosustratos, muestran una biodegradabilidad total (metanización del 100% de la DQO) y sin inhibiciones.

A los 7 días del inicio del experimento ya se había producido casi el máximo del total de metano (Tabla 11, día 7, primera columna).

Tabla 11. Valores promedio del triplicado CD

VALORES PROMEDIO ACUMULADOS (CD)				
DÍAS	V CH4 neto (NmL)	Q diario (NmL/día)	DQO (g)	NL CH4/kg VS
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2138,8	2138,8	6,1	157,5
2	4144,9	2006,2	11,8	305,2
3	5599,2	1454,3	16,0	412,2
4	6044,6	445,4	17,3	445,0
5	6163,4	118,7	17,6	453,8
6	6232,6	69,2	17,8	458,9
7	6291,1	58,5	18,0	463,2
8	6319,1	28,0	18,1	465,2
9	6346,1	27,0	18,1	467,2
10	6386,0	39,8	18,2	470,1
11	6440,3	54,3	18,4	474,1
12	6499,3	59,0	18,6	478,5
13	6541,4	42,1	18,7	481,6
14	6568,7	27,3	18,8	483,6
15	6584,9	16,2	18,8	484,8
16	6596,3	11,4	18,8	485,6

Tabla 12. Recopilación de datos del Cosustrato D

COSUSTRATO D		
<b>ANALÍTICAS PREVIAS REALIZADAS</b>	<b>CD</b>	<b>INÓCULO</b>
SV (g/L)	47,0	18
DQO (g/L)	65,0	30,0
<b>CANTIDADES ADMINISTRADAS (ISR=2)</b>	<b>CD</b>	<b>INÓCULO</b>
V (g)	289,0	1511,0
SV (g)	13,6	32,4
DQO (g)	18,8	45,3
<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b>	<b>CD</b>	
V (NmL) CH4 neto producido	6596,3	
DQO (g) producidos	18,8	
BMP (NL/Kg SV)	485,6	
BMP (NL/Kg DQO)	351,1	
METANIZACIÓN %	100,30%	

El BMP del Cosustrato D se obtuvo un valor de 485,6 NL CH<sub>4</sub>/Kg SV observable tanto en la Tabla 12 como en la casilla del día 16 correspondiente a la columna del BMP de la Tabla 11, presentando una alta reproducibilidad entre los tres triplicados (Figura 12).

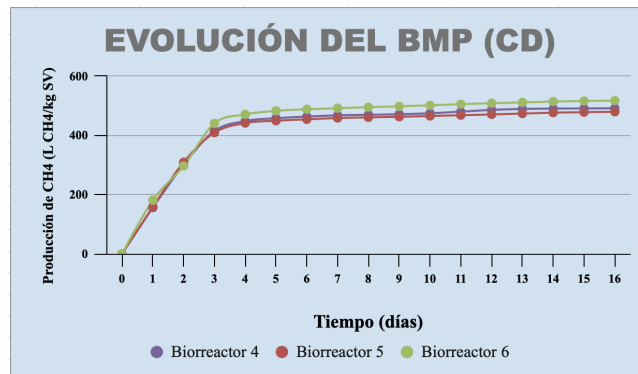


Figura 12. Evolución del BMP del CD por biorreactor

La curva del caudal diario de metano en la Figura 13 muestra un único máximo a los dos días del inicio del experimento, indicando su fácil y rápida biodegradabilidad.

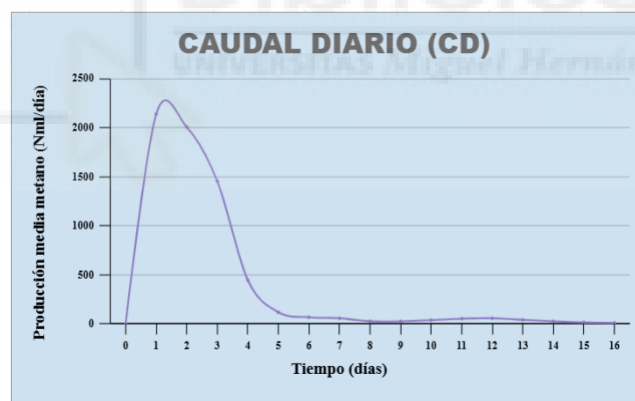


Figura 13. Caudal promedio diario de CC

#### 4.5. COMPARACIÓN Y ELECCIÓN DEL MEJOR COSUSTRATO

Los cuatro cosustratos analizados, reflejaron valores de BMP entre 485 y 628 NL CH<sub>4</sub>/Kg SV. La N que precede a las unidades se refiere a condiciones normales.

En consonancia con el origen de los residuos (aguas azucaradas), todas las muestras indicaron toxicidad nula y muy alta biodegradabilidad (alcanzando prácticamente el 100% a los pocos días de iniciar el proceso).

La Figura 14 muestra la representación gráfica de la evolución del BMP NL CH<sub>4</sub>/Kg SV con el tiempo de los cuatro cosustratos.

Ninguno de los ensayos presentó fase lag. En DA, esta etapa corresponde al periodo inicial en el que los microorganismos se adaptan al sustrato antes de iniciar la producción significativa de metano. La ausencia de la misma indica una buena adaptación del inóculo a los cosustratos evaluados.

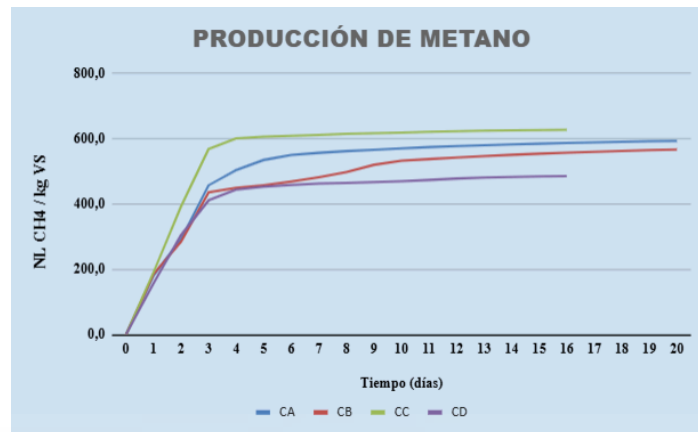


Figura 14. Gráfica comparativa de producción de CH<sub>4</sub> en CA, CB, CC y CD

Aunque el BMP específico medido por unidad de materia orgánica (NL CH<sub>4</sub>/kg SV) es el indicador más utilizado para evaluar el potencial metanogénico intrínseco de un sustrato, su consideración aislada no contempla simultáneamente la biodegradabilidad y la concentración orgánica, por lo que no resulta suficiente para comparar el rendimiento global de los cosustratos analizados (Tabla 13).

Tabla 13. Comparación de cosustratos

COMPARACIÓN COSUSTRATOS					
	DQO (g/L)	SV (g/L)	BMP (NL/kg SV)	BMP (NL/kg DQO)	Biodegradabilidad
CA	174,5	103,3	593,7	351,5	100,42%
CB	182,0	112,1	567,0	349,2	99,80%
CC	128,0	73,9	627,7	362,4	103,50%
CD	65,0	47,0	485,6	351,1	100,30%

Por ello, dicha comparación se ha realizado en función de la producción de CH<sub>4</sub> por litro de cosustrato añadido (NmL CH<sub>4</sub> producidos/L cosustrato), conocido como **potencial metanogénico volumétrico (PMV)**, con el fin de evaluar su rendimiento bajo condiciones experimentales equivalentes, ya que no solo depende de la eficiencia de conversión de la DQO en metano, sino también del contenido orgánico presente en el residuo.

Este criterio permite cuantificar de forma directa la aportación real de cada residuo a la producción de metano cuando se incorpora al sistema en términos de volumen, especialmente en ensayos a pequeña escala.

El cálculo del mismo se puede realizar con el BMP expresado por SV (NL CH<sub>4</sub>/kg SV) o por DQO (NL CH<sub>4</sub>/kg DQO), ya que las unidades del resultado son las mismas:

$$PMV \left( \frac{NL\ CH_4\ producidos}{L\ cosustrato} \right) = BMP\ específico \times Concentración\ de\ SV\ o\ DQO$$

→ Cálculo para Cosustrato A con BMP (NL CH<sub>4</sub>/kg SV) :

$$593,7 \times 0,103 = 61,1 \frac{NL\ CH_4}{L\ cosustrato}$$

→ Cálculo para Cosustrato A con BMP (NL CH<sub>4</sub>/kg DQO) :

$$351,5 \times 0,174 = 61,1 \frac{NL\ CH_4}{L\ cosustrato}$$

En nuestro caso, como se muestra en la tabla 14, pese a analizar cosustratos muy biodegradables y obtener resultados favorables para todos ellos, el mejor cosustrato sería el CB seguido por el CA, CC y por último, CD.

Tabla 14. Selección de cosustratos

SELECCIÓN COSUSTRATO			
	DQO	BMP	BMPxDQO
	(g/L)	(NL /kg DQO)	(NL CH <sub>4</sub> /L Cosustrato)
CA	174,5	351,5	61
CB	182,0	349,2	63
CC	128,0	362,4	46
CD	65,0	351,1	23

La selección de cosustratos con altos rendimientos permitiría maximizar la producción de biogás con menores aportes de sustrato, lo que se traduce en una reducción de los costes de explotación (transporte, tratamiento de fangos, etc.) y una mejora del balance energético.

Por tal de mejorar el procedimiento experimental y reducir errores analíticos y experimentales, se podría implementar el uso de una batidora por tal de evitar los grumos que tanta dispersión generan en los resultados del triplicado. De esta manera, se esperaría obtener valores homogéneos entre ellos.



## 5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

Las conclusiones más destacadas de la presente investigación son las siguientes:

1. El equipo de medición del potencial metanogénico AMPTS III *light* utilizado en la experimentación ha resultado ser un sistema robusto y de fácil manejo, que ofrece todas las prestaciones necesarias para realizar análisis de producción de metano.
2. La dispersión de los resultados obtenidos en la desgasificación de los inóculos indican la elevada heterogeneidad de las muestras de los digestores y, por tanto, la necesidad de mezcla y homogeneización de los nueve biorreactores previamente a la puesta en marcha de los ensayos BMP con los cosustratos.
3. Los resultados obtenidos en la calibración del método, usando celulosa microcristalina como patrón de referencia, fueron satisfactorios, indicando que el procedimiento es adecuado para la validación del ensayo BMP.
4. Como supuesto, la descarga de tres cisternas semanales de 25 m<sup>3</sup> del cosustrato CB en la EDAR de Monte Orgegia podría producir una media de 675 m<sup>3</sup> de metano al día (1.125 m<sup>3</sup> de biogás/día, al 60%), incrementando en torno al 50% la producción de biogás de la EDAR.

A partir de las conclusiones obtenidas y de la experiencia adquirida en esta investigación, se sugieren algunos aspectos para investigaciones futuras:

- Realizar una investigación sobre los posibles cosustratos (residuos) existentes en las industrias locales, sus características químicas y los volúmenes disponibles.
- Continuar con la validación de otros cosustratos a escala laboratorio para seleccionar aquellos con mejores prestaciones (alta DQO con alta biodegradabilidad y ausencia de inhibiciones) de cara a su dosificación en los digestores de la EDAR Monte Orgegia.
- Los estudios del BMP de los cuatro cosustratos analizados (residuos azucarados procedentes de industrias de edulcorantes y golosinas) indican la ausencia de efectos inhibitorios y su rápida y total biodegradabilidad, siendo idóneos para su posterior dosificación en los digestores de la EDAR Monte Orgegia.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) *Inicio - Aguas de Alicante - Liferay DXP.* (s. f.). Aguas de Alicante.  
<https://www.aguasdealicante.es/>
- (2) *Estaciones depuradoras por municipios | Epsar.* (s. f.).  
<https://www.epsar.gva.es/estaciones-depuradoras-por-municipios>
- (3) *BOE-A-1995-27963 Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.* (s. f.).  
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-27963>
- (4) *BOE-A-1990-26490 Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.* (s. f.).  
<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1990-26490>
- (5) *Estación depuradora de aguas residuales (EDAR).* (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.  
<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar.html>
- (6) *BOE-A-1997-14934 Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.* (s. f.).  
<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1997-14934>
- (7) Ardern, E., & Lockett, W. T. (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. *Journal Of The Society Of Chemical Industry*, 33(10), 523-539.  
<https://doi.org/10.1002/jctb.5000331005>
- (8) Garrido, P. (2025, 30 abril). Etapas de la digestión anaeróbica: Claves para maximizar el biogás | Miogas. Miogas | Biogás al alcance de todos.  
<https://miogas.com/blog/etapas-digestion-anaerobica-produccion-biogas-miogas/>
- (9) Sosa, M. M. C., Gatti, M. N., & Camacho, A. (2024). Potencial Bioquímico Metanogénico de residuos agroindustriales en co-digestión con macroalgas de agua dulce. *AJEA*, *AJEA* 37.  
<https://doi.org/10.33414/ajea.1691.2024>
- (10) Zahan, Z., Othman, M. Z., & Rajendram, W. (2016). Anaerobic Codigestion of Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge with Food Waste: A Case Study. *BioMed Research International*, 2016, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/8462928>



- (11) Gamez, M. J. (2026, 2 febrero). Portada - Desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- (12) El Pacto verde europeo. (s. f.). Comisión Europea. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es)
- (13) Estrategia española de Economía Circular y planes de acción. (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/estrategia.html>
- (14) BOE.es - DOUE-L-2018-82107 Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2018-82107>
- (15) BOE.es - DOUE-L-2008-82319 Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-82319>
- (16) BOE.es - DOUE-L-2018-80998 Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. (s. f.). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2018-80998>
- (17) Programa LIFE. (s. f.). Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/ayudas-subservenciones/programa-life.html>
- (18) Proyecto LIFE MERLIN | Cetaqua. (2026, 6 febrero). Cetaqua. <https://www.cetaqua.com/merlin/>
- (19) Asociación Española por la Calidad. (2024, 1 abril). Norma UNE EN ISO 9001 - AEC. AEC. <https://www.aec.es/conocimiento/centro-del-conocimiento/norma-une-en-iso-9001/>
- (20) Asociación Española por la Calidad. (2024b, abril 1). Norma UNE EN ISO/IEC 17025 - AEC. AEC. <https://www.aec.es/conocimiento/centro-del-conocimiento/norma-une-en-iso-iec-17025/>
- (21) AMPTS III – BPC Instruments. (s. f.). [https://bpcinstruments.com/bpc\\_products/ampts3/](https://bpcinstruments.com/bpc_products/ampts3/)
- (22) Holliger, C., Astals, S., De Lacroix, H. F., Hafner, S. D., Koch, K., & Weinrich, S. (2020). Towards a standardization of Biomethane Potential Tests: A commentary. *Water Science & Technology*, 83(1), 247-250. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.569>