

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Potencial de obtención de hidrógeno verde en
Andalucía a partir de los lodos de depuradora y la
fracción orgánica de los RDC.

Autora: María de Gracia González Bocanegra

Tutores: Alicia Ronda Gálvez

Bernabé Alonso Fariñas

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Potencial de obtención de hidrógeno verde en Andalucía a partir de los lodos de depuradora y la fracción orgánica de los RDC.

Autora:

María de Gracia González Bocanegra

Tutores:

Alicia Ronda Gálvez

Profesora titular

Bernabé Alonso Fariñas

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Potencial de obtención de hidrógeno verde en Andalucía a partir de los lodos de depuradora y la fracción orgánica de los RDC.

Autora: María de Gracia González Bocanegra

Tutores: Alicia Ronda Gálvez
Bernabé Alonso Fariñas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a todas las personas que han formado parte en esta etapa de mi vida.

A mi familia por el apoyo y cariño recibido; en especial a mis padres por su apoyo incondicional. A mi perro por el cariño y la compañía que me ha dado.

A todos los amigos que estuvieron a mi lado en este recorrido, por la alegría que me han transmitido. En especial me gustaría agradecer a mis amigas Inés y Vanessa, y a mi prima Irene, por estar ahí siempre. También agradecer a mis compañeros y amigos de clase por tantas horas de estudio y momentos juntos, haciendo más ameno este recorrido.

Por último, agradecer a todos los profesores que me han impartido clase a lo largo de estos años y a mis tutores.

M^oGracia González Bocanegra
Grado en Ingeniería de la Energía
Sevilla, 2024

Hoy en día hay un creciente interés en el hidrógeno verde (aquel generado a partir de fuentes renovables) como vector energético. Se presenta como parte de la solución al gran problema actual del cambio climático, contando con el apoyo de numerosas estrategias como el “EU Hydrogen Strategy” y la “Hoja de Ruta del Hidrógeno” en España, que tienen como objetivo alcanzar la neutralidad climática en 2050.

Este Trabajo Fin de Grado está integrado en las tareas del proyecto GH₂T en el que se propone usar las refinerías existentes de “La Rábida” y “San Roque” como clúster para acelerar el desarrollo de tecnologías de producción y almacenamiento de hidrógeno verde. Dentro de las actividades del proyecto, se enmarca en las tareas encaminadas a determinar el potencial de producción de hidrógeno verde a partir de los recursos renovables, incluidos residuos biogénicos disponibles actualmente en la región de Andalucía Occidental, donde se ubican dichas plantas.

Sin olvidar que la valorización energética pertenece al último escalón en la jerarquía de los residuos para una economía circular, se pretende usar los residuos como recurso para producir biocombustibles, como el biometano, con la finalidad de poder utilizarlo en lugar del gas natural en las refinerías, conllevando así una gran reducción de los gases de efecto invernadero emitidos, tanto por los evitados por la descomposición de los residuos orgánicos en vertederos como por la descarbonización de este sector.

El objetivo general de este trabajo es el cálculo del potencial del hidrógeno verde en las provincias de Andalucía (en concreto en Cádiz, Sevilla, Córdoba y Huelva) a partir de dos tipos de residuos: la Fracción Orgánica de los Residuos Domésticos Comerciales y los lodos de las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR).

Más concretamente, en este trabajo se ha realizado una cuantificación de los recursos disponibles en torno a las zonas de trabajo (tanto de lodos procedentes de las estaciones de depuración de aguas residuales como de la fracción orgánica de los residuos domésticos y comerciales) para lo cual se ha trabajado con el software ArcGIS con el fin de establecer la ubicación de las plantas EDAR y plantas de tratamiento de residuos, junto con la cantidad de cada uno de los recursos en cada una de ellas. Posteriormente, se ha expuesto la caracterización de los recursos, cuya finalidad es recoger toda la información característica de ambos residuos y a partir de ella determinar la cantidad de biogás que se podría producir. Finalmente, se ha determinado el potencial de producción de hidrógeno verde a partir de estos residuos. Con este propósito se ha supuesto el caso de que dichos residuos sean valorizados energéticamente por digestión anaerobia y por codigestión, es decir, de forma separada y conjunta para obtener biogás, pues ambos resultan adecuados para este tipo de tratamiento. Dicho biogás será sometido a un proceso de depuración y se podrá obtener el biometano, que será trasladado a una refinería donde se utilizará como biocombustible para producir hidrógeno verde. Así pues, se obtendrá el biogás en cada planta de tratamiento o EDAR que resulte de interés y una estimación del potencial del hidrógeno verde producido en cada provincia. Para la realización de este trabajo, se ha recurrido al Excel y al software ArcGIS simultáneamente.

Los resultados en ArcGIS muestran un mapa visual sobre donde se encuentran localizadas las EDARs y plantas de tratamiento y donde el potencial de hidrógeno verde es mayor, pudiendo observar la información concreta de cada planta, es decir, la cantidad de recurso disponible en ellas y la cantidad de biogás e hidrógeno verde producido en caso de cumplir ciertas condiciones de viabilidad. Además, para las EDARs donde resulte viable la codigestión, se muestran las plantas de tratamiento más cercanas mediante el trazado de un radio de 30 Km, de las cuales será factible trasladar los residuos.

Los resultados obtenidos han permitido determinar que el potencial hidrógeno en la provincia de Andalucía es prometedor en cualquiera de los casos estudiados, aunque especialmente en la codigestión, pudiendo combinar la codigestión de ambos residuos junto con la digestión anaerobia de la fracción orgánica, pues estos métodos no resultan excluyentes ya que se podría utilizar la fracción orgánica procedente de otras instalaciones donde no se esté realizando digestión anaerobia, pudiendo alcanzar un potencial de producción de hidrógeno de 9.302 MWh/año.

Abstract

Nowadays there is a growing interest in green hydrogen (generated from renewable sources) as an energy vector. It is presented as a part of the solution to the current problem of the climate change, supported by numerous strategies such as the “EU Hydrogen Strategy” and the “Hydrogen Roadmap” in Spain, which aim to achieve climate neutrality by 2050.

This Final Degree Work is integrated in the tasks of the GH₂T project in which it is proposed to use the existing refineries of “La Rabida” and “San Roque” as a cluster to accelerate the development of green hydrogen production and storages technologies. Within the activities of the project, the tasks are aimed at determining the potential for green hydrogen production from renewable resources, including currently available biogenic waste, in the region of Western Andalusia, where these plants are located.

Without forgetting that energy valorization belongs to the last step in the waste hierarchy for a circular economy, the purpose is to use the wastes as a resource to produce biofuels, such as biomethane, in order to be able to use it instead of natural gas in refineries, reducing the greenhouse gases emitted, not only by those avoided by the decomposition of organic waste in landfills, but also by decarbonization of this sector.

The general objective of this work is to calculate the green hydrogen potential in the provinces of Andalusia (specifically in Cadiz, Seville, Cordoba and Huelva) from two types of waste: the Organic Fraction of Commercial Household Waste and sludge from Wastewater Treatment Plants (WWTP).

More specifically, in this work a quantification of the resources available around the work areas (both sludge from the wastewater treatment plants and the organic fraction of domestic and commercial waste) has been carried out using ArcGIS software in order to establish the location of the WWTP and waste treatment plants, including the amount of each resources of both of them. Following this, a resource characterization was also performed, whose purpose is to collect all the characteristic information of both wastes and, from this information, to determine the amount of biogas that could be produced. Finally, the potential for green hydrogen production from these wastes has been determined. For this purpose, it has been assumed that these wastes will be energetically valorized by anaerobic digestion and codigestion, in other words, separately and jointly to obtain biogas, since both are suitable for this type of treatment. This biogas will be subjected to a purification process to obtain biomethane, which will be transported to a refinery where it will be used as biofuel for the production of green hydrogen. As a result, the biogas of each treatment plant or WWTP of interest and an estimation of the potential of green hydrogen produced in each province will be obtained. For the realization of this work, Excel and ArcGIS software have been used simultaneously.

The results in ArcGIS show a visual map of where the WWTPs and treatment plants are located and where the green hydrogen potential is the highest, showing the specific information of each plant, that is, the amount of resource available in them and the amount of biogas and green hydrogen produced if certain viability conditions are met. In addition, for WWTPs where codigestion is viable, the nearest treatment plants are shown by tracing a 30 km ratio from which it would be feasible to transfer the waste.

The results obtained have allowed to determine that the hydrogen potential in the province of Andalusia is promising in any of the cases studied, although especially in the codigestion, being possible to combine codigestion of both waste in combination with the anaerobic digestion of the organic fraction, as these methods are not exclusive, since the organic fraction coming from other facilities where anaerobic digestion is not being carried out could be used, reaching an hydrogen production potential of 9.302 MWh/year.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>La problemática del calentamiento global.</i>	1
1.2 <i>Las características del hidrógeno.</i>	1
1.2.1 Tipos de hidrógeno.	2
1.3 <i>Las estrategias para el hidrógeno verde.</i>	2
1.3.1 EU Hydrogen Strategy.	2
1.3.2 Proyecto Green Hydrogen Technologies.	2
1.4 <i>La problemática actual del hidrógeno en el sector de la industria.</i>	3
1.4.1 Producción de hidrógeno mediante “Steam Methane Reforming” del gas natural.	4
1.5 <i>Producción de hidrógeno a partir del SR-BM como solución.</i>	4
1.6 <i>Los residuos orgánicos como recurso: una economía circular.</i>	5
1.6.1 La jerarquía de los residuos.	5
1.6.2 Descripción de los biocombustibles.	6
1.6.3 Panorama actual de los lodos EDAR y los biorresiduos.	8
1.7 <i>La digestión anaerobia como método para obtener biogás.</i>	8
1.7.1 Parámetros técnicos y operacionales.	9
1.7.2 La codigestión.	10
1.8 <i>El biogás.</i>	11
1.8.1 Panorama actual del biogás.	12
2 Objetivo y Alcance	13
3 Metodología	15
3.1 <i>Cuantificación del recurso.</i>	15
3.1.1 Lodos de Depuradora.	15
3.1.2 Fracción orgánica de los RSU (o de los residuos domésticos comerciales, RDC)	16
3.2 <i>Caracterización.</i>	18
3.3 <i>Potencial de obtención del Biogás.</i>	18
3.3.1 Lodos de depuradora.	18
3.3.2 Fracción orgánica de los RDC.	19
3.3.3 Codigestión.	19
3.4 <i>Potencial de obtención del Hidrógeno verde.</i>	19
4 Resultados	21
4.1 <i>Cuantificación del recurso.</i>	21
4.1.1 Lodos de Depuradora.	21
4.1.2 Fracción Orgánica de los RDC.	22

4.2	<i>Potencial de producción del Biogás.</i>	24
4.2.1	Digestión Anaerobia.	24
4.2.2	Codigestión.	26
4.3	<i>Potencial de producción del hidrógeno verde.</i>	27
5	CONCLUSIÓN	29
	ANEXOS	31
	Referencias	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Características de la FO. Obtenida de datos de [20].	8
Tabla 1-2.	Parámetros importantes en la D.A [19].	9
Tabla 1-3.	Composición típica del biogás de lodos EDAR [27].	11
Tabla 3-1.	Volumen de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales. Datos obtenidos del INE [33].	15
Tabla 3-2.	Suma de h.e por provincias y en Andalucía, año 2021. Elaboración propia.	16
Tabla 3-3.	Estimación de biorresiduos, 2020. Datos en toneladas (t). Elaboración propia.	17
Tabla 3-4.	Porcentaje de biorresiduos frente a la cantidad total de residuos por planta de tratamiento.	17
Tabla 3-5.	Caracterización de los residuos. Datos obtenidos de [1].	18
Tabla 4-1.	Cantidad de lodos generados (t/año). Elaboración propia.	22
Tabla 4-2.	Número de plantas de tratamiento.	23
Tabla 4-3.	Número de plantas para la producción de biogás.	25
Tabla 4-4.	Biogás producido por provincia en las EDARs.	25
Tabla 4-5.	Biogás producido por provincias en las plantas de tratamiento.	25
Tabla 4-6.	Codigestion.	27
Tabla 4-7.	Potencial de hidrógeno verde resultante (MWh/año).	28
Tabla 0-1.	Estado de las instalaciones de generación de biogás [41].	31
Tabla 0-2.	Recogida de residuos municipales en Andalucía, 2020. Datos en toneladas (t) [36].	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Distribución de emisiones brutas de GEI en 2021 por sectores y por tipo de gas [2].	1
Figura 1-2. Ubicación de las refinerías "La Rábida" y "San Roque"[9].	3
Figura 1-3. Producción de hidrógeno verde.	5
Figura 1-4. Jerarquía de gestión de residuos.	5
Figura 1-5. Clasificación de Biorresiduos de competencia municipal [17].	7
Figura 1-6. Composición media de la fracción resto por material [18].	7
Figura 1-7. Fases de la Fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos [23].	9
Figura 4-1. Mapeo EDAR según h.e. Elaboración propia.	21
Figura 4-2. Mapeo de plantas de RSU. Elaboración propia.	23
Figura 4-3. Instalaciones de biogás. FORSU: rosa; EDAR: verde	24
Figura 4-4. Análisis de cercanía para la codigestion. FORSU: rosa; EDAR: verde.	26
Figura 4-5. Comparación de la producción de hidrógeno en los tres casos de estudio.	27
Figura 4-6. Comparación del potencial de producción de hidrógeno verde según la provincia.	28
Figura 0-1. Panel de atributos. Información inicial EDAR.	32
Figura 0-2. Elemento emergente al seleccionar la EDAR COPERO.	34
Figura 0-3. Elemento emergente al seleccionar la planta de tratamiento ABORGASE.	34

Notación

CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
GEI	Gases de Efecto Invernadero
H ₂	Hidrógeno
SMR	Steam Methane Reforming
GH ₂ T	Green Hydrogen Technologies
TRL	Technology Readiness Level
SR-BM	Biomethane Steam Reforming
GN	Gas Natural
FORS	Fracción Orgánica de Recogida Separada
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
UE	Unión Europea
D.A	Digestión Anaerobia
M.O	Materia Orgánica
h.e	Habitante equivalente
FLodos	Caudal de lodos
t	Toneladas
FO	Fracción orgánica
SV	Sólidos Volátiles
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RDC	Residuos Domésticos Comerciales
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
INE	Instituto Nacional de Estadística
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía
BOE	Boletín Oficial del Estado
RD	Real Decreto
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
CAGPDS	Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible
REDIAM	La Red de Información Ambiental de Andalucía
CICA	Centro Informativo Científico de Andalucía

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente nos enfrentamos al gran problema del cambio climático, conducido por el calentamiento global. Por otra parte, el incremento de la población lleva consigo una creciente demanda energética mientras los combustibles fósiles se agotan. Esto hace que resulte inevitable un cambio hacia alternativas energéticas renovables y hacia una economía circular y sostenible, contribuyendo a la descarbonización.

1.1 La problemática del calentamiento global.

Los gases de efecto invernadero (GEI) contribuyen al deterioro de la capa de ozono, agravando el problema del calentamiento global. La Figura 1-1 muestra la distribución de emisiones brutas de los GEI por sectores y por tipo de gas en España. Se observa que el GEI más abundante es el dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el metano, a pesar de encontrarse en menor proporción, tiene una capacidad de efecto invernadero 25 veces superior a la del CO_2 [1]. Igualmente, se puede apreciar que la industria y el transporte son los principales sectores causantes de dichos gases, aunque también contribuyen otros sectores como los residuos. La principal fuente de emisiones en el sector de la gestión de residuos, son los vertederos, ya que al no ser tratados de forma adecuada los residuos orgánicos, la descomposición de la materia orgánica provocará emisiones incontroladas de metano (CH_4).

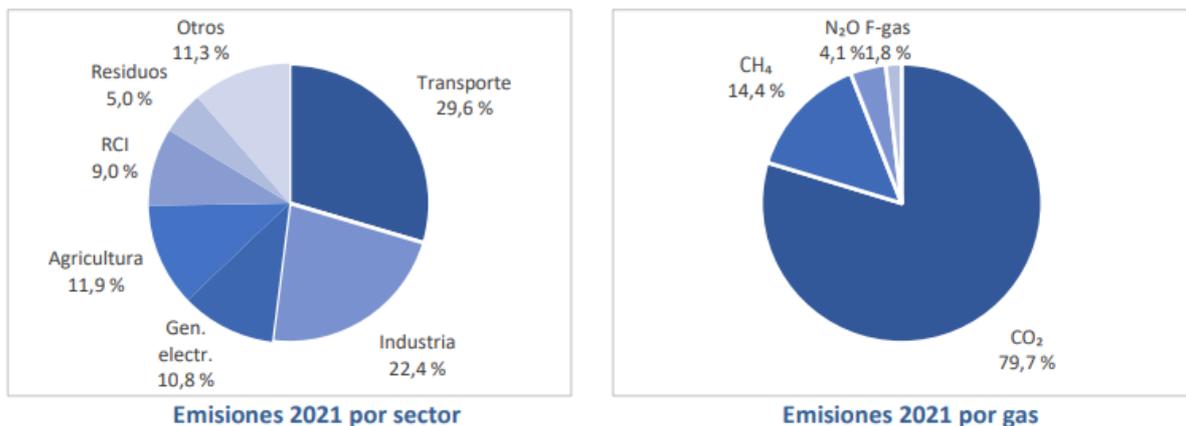


Figura 1-1. Distribución de emisiones brutas de GEI en 2021 por sectores y por tipo de gas [2].

Las energías renovables se presentan como solución a esta crisis climática, no obstante, para que su contribución adaptada a la demanda sea factible es necesario un sistema de almacenamiento a gran escala y durante largos periodos: el hidrógeno [3]. A su vez, el hidrógeno cuenta con numerosas aplicaciones en sectores como el transporte y la industria, que son difíciles y urgentes de descarbonizar.

1.2 Las características del hidrógeno.

El hidrógeno es un vector energético, es decir, es necesario un aporte de energía procedente de otras fuentes de energía primaria para su obtención. Tiene como gran ventaja su capacidad para ser almacenado y su versatilidad, permitiendo su integración en diferentes sectores energéticos. Además, el hidrógeno presenta

como ventaja que por unidad de masa tiene mayor contenido energético que cualquier otro combustible (PCI=120MJ/kg).

1.2.1 Tipos de hidrógeno.

Según la fuente de energía utilizada, la tecnología empleada y las emisiones de CO₂ generadas para su obtención, podemos clasificar el hidrógeno en los siguientes tipos:

- Hidrógeno verde o renovable: el aporte de energía proviene de fuentes renovables. La electrolisis del agua es una de las técnicas más desarrolladas para su obtención. También se considera renovable el hidrógeno obtenido a partir del reformado del biogás o de la conversión bioquímica de la biomasa [4]. Las emisiones de GEI durante su producción son casi nulas.
- Hidrógeno gris: hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, generalmente a partir del gas natural (GN) mediante procesos de reformado, como el “Steam Metane Reforming” (SMR). El 99 % del hidrógeno consumido en España es de este tipo y conlleva elevadas emisiones de CO₂ [5].
- Hidrógeno azul: hidrógeno obtenido de manera similar al hidrógeno gris, pero al que se le aplican técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono, permitiendo reducir las emisiones de CO₂.

1.3 Las estrategias para el hidrógeno verde.

Cada vez se le presta más atención al hidrógeno verde como clave para una transición energética ecológica, contando con numerosas estrategias tanto a nivel nacional como europeo. Así pues, en el Pacto Verde Europeo (European Green Deal) los estados de la UE se comprometen a alcanzar la neutralidad climática en 2050; y el Consejo Europeo ha fijado como objetivo en el paquete de medidas “Objetivo 55” que la UE reduzca sus emisiones de GEI en al menos un 55% de aquí a 2030 con respecto a los niveles de 1990 [6]. Entre las estrategias para conseguir el despliegue del hidrógeno renovable nos encontramos con la “Estrategia Europea del Hidrógeno” (EU Hydrogen Strategy), y la “Hoja de Ruta del Hidrógeno en España”. Además, como parte del esfuerzo de la UE, la alianza “European Clean Hydrogen Alliance”, fundada en el año 2020, tiene como objetivo apoyar el despliegue a gran escala de las tecnologías del hidrógeno limpio para 2030 [7].

1.3.1 EU Hydrogen Strategy.

En la Estrategia Europea del Hidrógeno [8] se propone el desarrollo de una economía basada en el hidrógeno de manera gradual, constando de tres fases:

- Primera fase (2020-2024): Se pretende instalar al menos 6 GW de electrolizadores de hidrógeno renovable en la UE y la producción de un millón de toneladas de hidrógeno renovable.
- Segunda fase (2025-2030): el hidrógeno debe convertirse en una parte intrínseca de un sistema energético integrado para conseguir instalar al menos 40 GW de electrolizadores de hidrógeno renovable y la producción de hasta 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable en la UE.
- Tercera fase (2030-2050): las tecnologías de hidrógeno renovable deben alcanzar su madurez y desplegarse a gran escala para llegar a todos los sectores de difícil descarbonización.

1.3.2 Proyecto Green Hydrogen Technologies.

Con la intención de contribuir con la “Hoja de Ruta del Hidrógeno en España” y la “European Clean Hydrogen Alliance” en el ámbito de las aplicaciones del hidrógeno renovable en la industria, nace el proyecto GH₂T (Green Hydrogen Technologies) [9].

Este proyecto propone usar uno de los paradigmas más claros de las actividades fósiles, las refinerías, como palanca para desarrollar las tecnologías de hidrogeno verde, en otras palabras, como incubadoras de la tecnología, pues según se define en la “Hoja de Ruta del Hidrógeno en España” las refinerías se pueden considerar como clúster de hidrógeno (incluyendo producción, almacenamiento y uso). Asimismo, las refinerías tienen un cierto grado de flexibilidad que les permite adaptarse a nuevas materias primas, como la

biomasa, aceites vegetales y los residuos, permitiendo un cambio hacia fuentes renovables. Los resultados de este proyecto contribuirán al desarrollo de una economía basada en el hidrógeno evitando la creación de una costosa infraestructura.

En el proyecto, serán analizados dos casos de estudio: las refinerías de “La Rábida” y “San Roque” ubicadas en Andalucía, España; que cuentan con un consumo de más de 215.000 toneladas de hidrógeno al año. Se pretende determinar el potencial de hidrogeno producido por recursos renovables, entre ellos los residuos biogénicos actualmente disponibles 200 km alrededor de estas refinerías (es decir, en las provincias de Huelva, Cádiz y Sevilla). En la Figura 1-2, se muestra la ubicación de ambas refinerías en las provincias mencionadas.

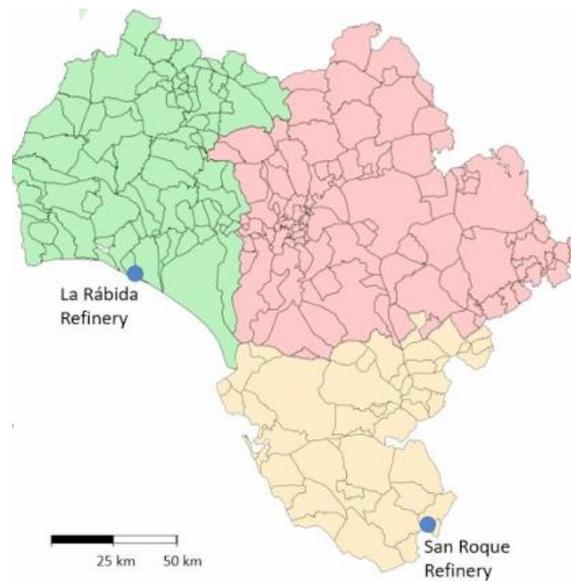


Figura 1-2. Ubicación de las refinerías "La Rábida" y "San Roque"[9].

Como las refinerías son prosumidores de hidrógeno, el proyecto GH₂T puede ser fácilmente (tecnológicamente) adoptado por la mayoría de las refinerías en España y Europa. Este proyecto propone la producción de hidrógeno a gran escala en las refinerías y su almacenamiento en cavernas de sal, pues las refinerías en Europa están en lugares donde se pueden construir dichas cavernas. En España 6 de cada 8 refinerías son adecuadas para su integración junto con el almacenamiento de hidrogeno renovable.

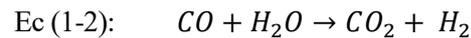
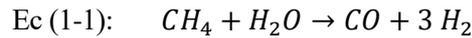
Como parte de este proyecto, en este Trabajo de Fin de Grado, se evalúa la viabilidad de usar los lodos de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) y la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) para producir hidrógeno verde a partir del SMR del biometano, obtenido a través de la purificación del biogás producido por la digestión anaerobia de dichos biorresiduos.

1.4 La problemática actual del hidrógeno en el sector de la industria.

En la actualidad, el hidrógeno representa una pequeña fracción de la combinación de fuentes energéticas mundial y de la UE, y aún se produce en gran medida a partir de combustibles fósiles, en particular del gas natural o del carbón, lo que da lugar a la liberación anual de entre 70 y 100 millones de toneladas de CO₂ en la UE [8]. En España, se consumen alrededor de 500.000 toneladas de hidrógeno anualmente, principalmente de tipología gris generando grandes emisiones de CO₂. Este consumo tiene lugar principalmente en las refinerías (en torno al 70%) y en fabricantes de productos químicos (25%) [5]. Por tanto, la producción del hidrógeno debe descarbonizarse completamente y alcanzar una escala mucho mayor para conseguir contribuir a la neutralidad climática.

1.4.1 Producción de hidrógeno mediante “Steam Methane Reforming” del gas natural.

La mayoría del hidrogeno producido proviene del “Steam Methane Reforming” del gas natural, el cual está compuesto mayoritariamente por metano (90,6%), junto con otros hidrocarburos en menor proporción como el etano (C₂H₆). El SMR es una tecnología de reformado con vapor que se desarrolla en un reactor (reformador), donde reacciona vapor a alta temperatura (700-1100 °C) y presión con los hidrocarburos en presencia de un catalizador de base metálica, y se produce un gas de síntesis (hidrógeno y monóxido de carbono). Posteriormente, se pretende incrementar la producción de H₂ por lo que tiene lugar la etapa “Water-gas-shift” (WGS). Las principales reacciones que tienen lugar se muestran a continuación en las ecuaciones (1-1) y (1-2):



Para mantener las condiciones térmicas del reformador, se quema una cantidad adicional de metano, conllevando una reducción de la producción de hidrogeno, lo cual disminuye la eficiencia, siendo ésta del 75,9% [10]. Esta técnica a pesar de ser rentable y eficiente conlleva importantes impactos medioambientales debido a sus elevadas emisiones de CO₂, haciéndola menos adecuada.

Ante esta situación, se propone aprovechar la tecnología del SMR, que cuenta con la madurez tecnológica más alta (Technology Readiness Level - TRL 9), para producir hidrogeno verde en su lugar. La clave está en sustituir la materia prima habitual (el gas natural) por biometano, pues se considera de origen renovable, ofreciendo así un gran potencial de descarbonización. A esta técnica se le denomina como “Biomethane Steam Reforming” (SR-BM).

1.5 Producción de hidrógeno a partir del SR-BM como solución.

El “Biomethane Steam Reforming” consiste en la producción del hidrógeno verde sustituyendo el gas natural por biometano, cuyo proceso viene esquematizado en la Figura 1-3. En primer lugar, se obtiene el biogás a partir de los residuos orgánicos por digestión anaerobia. Este biogás será sometido a un proceso de purificación conocido como “upgrading”, en el cual sus impurezas y el CO₂ son eliminados, obteniendo un metano del 97% de pureza, conocido como biometano [11]. Gracias a esta purificación se consigue que el biometano tenga una proporción en metano superior, similar al GN, y que pueda ser introducido en el reactor. Simultáneamente, a mayor porcentaje de metano menos gas es necesario como alimentación para producir la misma cantidad de H₂, pues un menor contenido en CO₂ incrementa la eficiencia de conversión de CH₄ a H₂, lo cual se traduce en un rendimiento más favorable.

Tanto la producción como la purificación del biogás se realizará in situ, pues resulta más eficiente transportar el biometano que el biogás, ya que la presencia del CO₂ hace que el biogás tenga menor densidad energética. Finalmente, el biometano puede ser transportado hasta la refinería, aprovechando la infraestructura empleada para el GN. En la refinería, se le aplicará la técnica del SR-BM para obtener hidrógeno renovable.

Esta técnica resulta un método prometedor para la producción de hidrogeno renovable, pudiendo producirse en su punto de consumo (las refinerías) a un coste más competitivo, con una huella de carbono de menor impacto y contribuyendo a la correcta gestión de los RSU [4]. Representa una tecnología prometedora, particularmente para las industrias que son difíciles de electrificar.

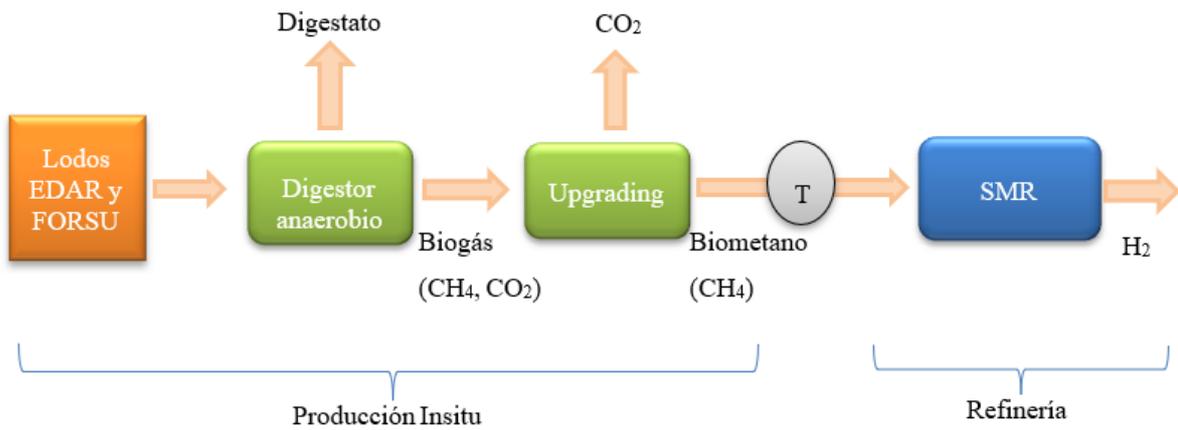


Figura 1-3. Producción de hidrógeno verde.

1.6 Los residuos orgánicos como recurso: una economía circular.

La utilización de los residuos orgánicos para producir energía cuenta con numerosas ventajas, ya que permite sustituir la energía de origen fósil por una de origen renovable, mejorando la seguridad del suministro energético en Andalucía (y en España), pues reduce la dependencia de importaciones de combustibles fósiles de otros países. Por otro lado, al gestionar de manera óptima los residuos, se evita su destino en vertederos, reduciendo los GEI provocados por la descomposición de la materia orgánica y contribuyendo a una economía circular, pues el residuo se convierte en recurso. No obstante, se debe tener en cuenta, que es el último escalón antes de la eliminación, prevaleciendo la prevención de los residuos.

1.6.1 La jerarquía de los residuos.

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [12] establece la siguiente jerarquía de residuos recogida en la Figura 1-4, donde se puede observar que se prioriza la prevención. Sin embargo, este trabajo se centra en la valorización energética de los residuos una vez ya han sido producidos.



Figura 1-4. Jerarquía de gestión de residuos.

1.6.2 Descripción de los biocombustibles.

Los biocombustibles (como el biogás) son combustibles renovables que se obtienen a partir de la materia orgánica. Pueden provenir tanto de recursos naturales como de residuos orgánicos, a estos últimos se les denomina de segunda generación (2G). Como ventaja principal, poseen un nivel de emisiones netas de CO₂ en su ciclo de vida significativamente inferior al de los combustibles fósiles tradicionales (hasta un 90% menos), ayudando así a la descarbonización [13], [14]. Esta materia se transforma en energía mediante procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación) o bioquímicos (digestión anaerobia y fermentación). Dentro de los diferentes residuos susceptibles a ser valorizados energéticamente para la producción de biogás nos encontramos con los lodos EDAR y la FORSU, objeto de nuestro estudio.

1.6.2.1 Lodos EDAR.

Los lodos de depuradora son una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, generados en las distintas etapas de depuración de las aguas residuales. Son un residuo extremadamente líquido (más de un 90% es agua), cuya composición es variable y suelen ser tratados en la propia depuradora para reducir su contenido en agua (hasta un 60-86%), en patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica. Los tratamientos biológicos más frecuentes son: la digestión anaerobia, la estabilización aerobia y el compostaje. Estos tratamientos del agua concentran la contaminación presente en ella y, por tanto, los lodos contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas [15]. Además, presentan un alto valor en materia orgánica, pues un 40-60% de sus elementos sólidos son orgánicos.

1.6.2.2 Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

La Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, define los “Residuos domésticos”: residuos peligrosos o no peligrosos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares en composición y cantidad a los anteriores generados en servicios (comercios) e industrias, que no se generen como consecuencia de la actividad propia del servicio o industria. A su vez, define a los “Residuos municipales” como los residuos mezclados y los recogidos de forma separada de origen doméstico, incluidos los biorresiduos, y los procedentes de otras fuentes cuando sean similares en naturaleza y composición a los residuos de origen doméstico [16].

Las mezclas de los residuos municipales que no se recogen de forma separada se denomina fracción resto. Cuando la materia orgánica sí se recoge de forma separada hablamos de la fracción biorresiduos, también conocida como la FORSU.

Los Biorresiduos de competencia municipal se pueden clasificar en Fracción Orgánica (FO o FORS: Fracción Orgánica Recogida Separadamente) y Fracción Vegetal (FV), tal y como se muestra en la Figura 1-5.

- La Fracción Orgánica está constituida fundamentalmente por:
 - Restos de la preparación o manipulación de la comida y elaboración de los productos alimentarios, restos sobrantes de comida, alimentos en mal estado y excedentes alimentarios que no se han comercializados o consumido (separados de su envase o embalaje);
 - Fracción Vegetal (FV) en forma de restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso procedentes de jardinería y poda. Sus características (contenido en agua, densidad, etc.) son parecidas a los restos de comida y por ello se asimilan a la FO.
- Poda: constituida por la Fracción Vegetal (FV) en forma de restos vegetales de jardinería y poda de mayor tamaño y de tipo leñoso.

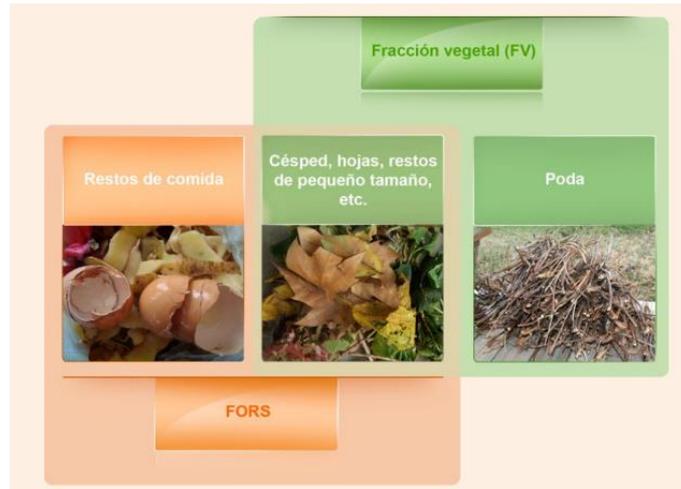


Figura 1-5. Clasificación de Biorresiduos de competencia municipal [17].

La Figura 1-6 muestra la composición media de la fracción resto por material en el ámbito estatal, donde los biorresiduos suponen el porcentaje más elevado, con un promedio de aproximadamente el 47%.

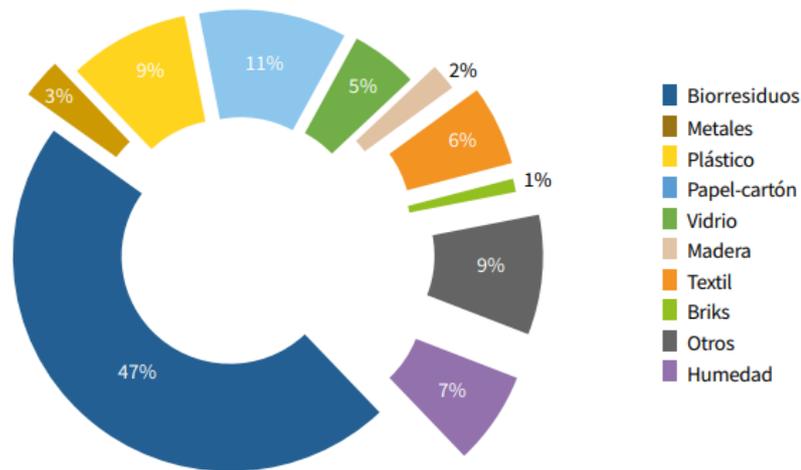


Figura 1-6. Composición media de la fracción resto por material [18].

La Tabla 1-1 muestra las principales características de la FO de los residuos de competencia municipal. Se puede apreciar su gran contenido en agua (alrededor del 80% en peso) y en materia orgánica (hidratos de carbono, proteínas y grasas). Su densidad es elevada pero variable lo cual hace que pese mucho y ocupe poco espacio, presentando en general una baja compactibilidad. No es una fracción uniforme, por su naturaleza y origen, ni en tipología ni en composición pues está sujeta a los hábitos alimentarios y a los cambios estacionales [19].

Tabla 1-1. Características de la FO. Obtenida de datos de [20].

-	FO
Humedad	Alta (75 a 85%)
Materia orgánica	75 a 85%
Nitrógeno orgánico	5,50%
Relación C/N	17
Densidad	0,6 a 0,8 t/m ³
Mal olor	Sí
Generación	Constante

1.6.3 Panorama actual de los lodos EDAR y los biorresiduos.

En el año 2020, la cantidad de lodos de tratamientos de aguas residuales generados en Andalucía fue de 205.899 toneladas de materia seca respecto a las 1.148.222 toneladas generadas en España. Para el caso de Andalucía, solo 0,1% de estos lodos fue destinado a incineración o aprovechamiento energético, un 5,8% fueron eliminados en vertedero y 94,1% se emplearon en agricultura, silvicultura y jardinería. En España el porcentaje en relación con los destinos finales de estos lodos fue 9,5%, 4,5 y 86% respectivamente [21].

La cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España en ese año fue de 22 millones de toneladas, de los cuales el 21% fue recogido selectivamente, siendo el porcentaje de biorresiduos de solo el 6%. El 20,1% de los residuos de competencia municipal fueron destinados a reciclado, el 20,1% a compostaje, el 49,4% a vertederos y el 10,1 % a incineración [22]. En Andalucía, se recogieron 4.235.295 toneladas de residuos municipales, de las cuales 3.534.856 corresponden a residuos mezclados y solo 99.186 a biorresiduos de recogida separada, es decir, solo el 2% corresponde a recogida selectiva de biorresiduos.

El total anual de biorresiduos generados en Europa (UE25) supone entre el 30% y el 45% de los residuos de competencia municipal, de los cuales solamente un 20% está siendo utilizado en la actualidad como recurso [17]. Así pues, existe un gran potencial para el aprovechamiento de los biorresiduos.

1.7 La digestión anaerobia como método para obtener biogás.

Aunque existen distintos tipos de tratamientos biológicos para la obtención de biogás a través de estos residuos, nos centraremos en la digestión anaerobia (D.A).

La digestión anaerobia, también llamada biometanización, es un proceso biológico que consiste en la descomposición de la materia orgánica (M.O) en ausencia de oxígeno en la que se obtiene biogás y un digestato. En el proceso de degradación del sustrato (el alimento de los microorganismos) tienen lugar 4 fases sucesivas, en las que intervienen una población heterogénea de microorganismos, tal y como se muestra en la Figura 1-7. La producción del biogás tiene lugar en reactores cerrados, llamados digestores anaerobios, el más simple es el de mezcla completa (RMC), siendo el más empleado para los residuos [23].

- Fase 1. Hidrólisis: Los compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono son despolimerizados por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas más simples como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes, etc. Las bacterias responsables de su generación son las bacterias hidrolítico-acidogénicas [24].

- Fase 2. Acidogénesis: Las moléculas obtenidas anteriormente se transforman en otras de peso molecular intermedio, se produce la formación de ácidos como por ejemplo el ácido propiónico y el butírico. Esta etapa está controlada por bacterias acidogénicas.
- Fase 3. Acetogénesis: Los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Fase 4. Metanogénesis: Las bacterias metanogénicas se encargan de la formación de CO₂ y CH₄.

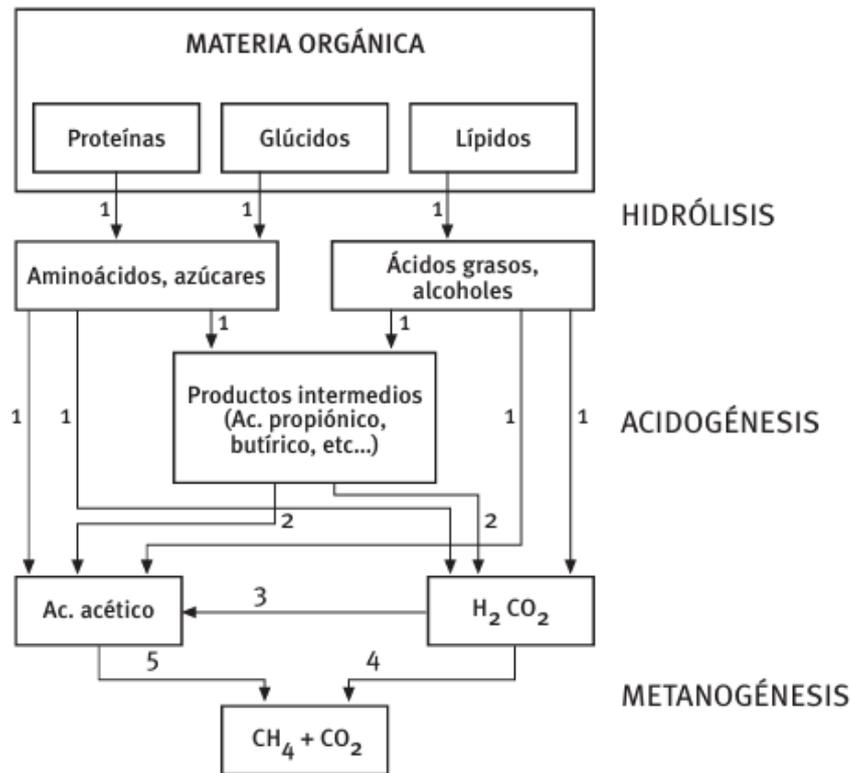


Figura 1-7. Fases de la Fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos [23].

- 1) Bacteria hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclasticas.

1.7.1 Parámetros técnicos y operacionales.

Entre los factores que regulan el proceso de digestión, además de la composición de los materiales de entrada y su contenido en M.O biodegradable, se pueden destacar algunos parámetros tanto técnicos como operacionales descritos en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Parámetros importantes en la D.A [19].

Sólidos totales / Humedad	A pesar de que el agua ocupe volumen y no se transforme en biogás, es necesaria determinada cantidad para que transcurra el proceso de fermentación y facilitar las operaciones de bombeo y agitación.
Sólidos volátiles / Biodegradabilidad	Cuanto mayor es el porcentaje de sólidos volátiles, mejor es el sustrato, pues constituye la materia de la que se obtiene el biogás. Es esencial que el sustrato tenga una elevada biodegradabilidad.

Rendimiento de producción de biogás	El potencial máximo de producción de biogás depende de la composición del residuo, pero también se ve afectado por otros factores como la temperatura, el tiempo de retención en el digestor y periodos de almacenamiento prolongados.
Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	La proporción C/N es importante para el proceso de fermentación, situándose el rango óptimo en torno a 20-30. Una baja relación conlleva a un exceso de amoníaco, que actúa como inhibidor del proceso.
Nutrientes	Son necesarios valores que aseguren el crecimiento de microorganismos. Además del carbono y el nitrógeno, otros nutrientes como el fósforo y el azufre son necesarios para que tengan lugar los procesos bioquímicos y metabólicos.
pH y alcalinidad	El pH afecta a la actividad microbiana y a su tasa de crecimiento. El idóneo se encuentra entre 7 y 8 pero es posible utilizar materias primas con valores distintos dependiendo, por ejemplo, de la presencia de sustancias tampón que neutralizan la acidez de los compuestos originados durante la fermentación. La alcalinidad indica la capacidad tampón del medio.
Sustancias inhibitoras	Algunas sustancias pueden inhibir el proceso de digestión, reduciendo su rendimiento. Estas sustancias pueden estar presentes en el residuo (por ejemplo, los lípidos a partir de cierta concentración) o ser producidas durante la fermentación (los ácidos grasos volátiles en elevadas concentraciones).
Temperatura	Afecta a la actividad de los microorganismos, debe ser estable. El rango más utilizado es el mesofílico (25-45°C).
Tiempo de retención	El cociente entre el volumen del reactor y el caudal de tratamiento representa el tiempo medio de permanencia del sustrato en el digestor y condiciona la productividad.

1.7.2 La codigestión.

La codigestión consiste en el tratamiento conjunto de residuos orgánicos diferentes con la finalidad de maximizar la producción de biogás, en la que se debe tener especial cuidado para que la mezcla escogida permita que los procesos biológicos transcurran sin inhibiciones [25]. Los fangos tienen una relación C/N baja, al añadir la FO (cuya relación es alta), esta relación mejora, incrementando un rendimiento de metano [26], aunque existe un límite dentro del cual este rendimiento mejora. La codigestión aumenta además la cantidad de materia orgánica biodegradable.

La codigestión tiene en general como principales ventajas:

- Aprovechamiento de la sinergia de las mezclas: las carencias de un residuo son compensadas por las características del otro.
- Mayor producción de biogás al mejorar la eficiencia del proceso.
- Ventaja medioambientales y económicas: se comparte la instalación de tratamiento, reduciendo los costes de inversión y explotación.

Es necesario tener en cuenta que el sustrato tiene que ser acondicionado antes de introducirlo al reactor para que sea lo más homogéneo posible pues conlleva a un mayor rendimiento de biogás [23]. Además, para que la

inversión sea viable es crucial que las instalaciones estén lo más próximas posible, pues se reducirán así los costes asociados al transporte de los sustratos [19]. Normalmente, los costes asociados a instalaciones de gestión de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia son altos y tienen una baja productividad en términos de la energía contenida en el biogás en relación con la cantidad de residuo tratado [23]. Por tanto, el tratamiento de digestión anaerobia de la FORSU será más interesante cuando se añada como sustrato a los lodos de depuradora en codigestión, pues las plantas depuradoras ya cuentan con digestores y están sobredimensionadas.

1.8 El biogás.

Como producto de la digestión anaerobia obtenemos el biogás, que es un biocombustible gaseoso obtenido a partir de residuos biodegradables y que puede ser purificado hasta alcanzar una calidad similar a la del gas natural. Usualmente está compuesto por metano (60-70%), dióxido de carbono (30-40%) y otros gases en menor proporción (vapor de agua, CO, N₂, H₂, H₂S, ...).

El tipo de sustrato a digerir influye en gran medida en el rendimiento y composición del biogás obtenido. Para una producción máxima de biogás es preferible utilizar sustratos ricos en grasas, proteínas e hidratos de carbono, ya que su degradación conlleva la formación de cantidades importantes de ácidos grasos volátiles, precursores del metano. En este sentido, la composición de la FORS es adecuada, aunque la selección previa y la mezcla de materiales a digerir es importante ya que determina el rendimiento en metano, además de evitar muchos de los problemas producidos por la acumulación de impropios [17].

La FORS tiene también buena biodegradabilidad y un rendimiento alto en la producción de biogás. Respecto a los lodos, la relación C/N es baja y su rendimiento en la producción de biogás es reducido, pero contienen gran cantidad de nutrientes, que posibilitan la producción de procesos bioquímicos y metabólicos [19]. La composición típica del biogás para lodos de depuradora se encuentra recogida en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Composición típica del biogás de lodos EDAR [27].

Gases	Lodos de depuradora	Efecto
CH ₄	50-80	Combustible
CO ₂	20-50	Inerte
Vap H ₂ O	Saturación	Perjudicial
H ₂	0-5	Combustible
H ₂ S	0-1	Corrosivo
NH ₃	Trazas	Corrosivo
CO	0-1	Combustible
N ₂	0-3	Inerte
O ₂	0-1	Corrosivo
Siloxano	0-100mg/m ³	Abrasivo
HCH (hidrocarburos pesados y halogenados)	Trazas	Perjudicial

1.8.1 Panorama actual del biogás.

En España hay 146 instalaciones de biogás, de las cuales 130 estuvieron operativas en 2020. La producción de biogás en estas plantas fue en torno a 2,74 TWh. De las plantas operativas, 46 están asociadas a plantas de tratamiento de residuos (29 son de gestión de residuos municipales), 34 a estaciones de depuración de aguas residuales (para el tratamiento de los lodos generados en las EDAR), 13 al sector agropecuario, 7 al sector del papel y el resto al sector químico, el alimentario y otros [19].

Actualmente en Andalucía existen 21 instalaciones de producción de biogás para generación eléctrica con una potencia total de 33,4MW, de los que 27,4 MW están conectados a red y 6,0 MW utilizan el biogás generado para autoconsumo [28]. En el ANEXO A se puede consultar la información de cada una de estas instalaciones. Se puede observar que el biogás proviene mayoritariamente del aprovechamiento del gas de vertedero y de la digestión anaerobia de los lodos de depuradora, de las cuales, la mayoría no están conectadas a la red.

AGR Biogás, empresa pionera en Andalucía en promoción, construcción y gestión de plantas de biogás industrial, ha iniciado la construcción de la primera planta de biogás con inyección de biometano a la red en Andalucía, en Granada, que cuenta con una capacidad total de tratamiento de 100.000 toneladas anuales, de las cuales serán principalmente de origen ganadero y olivar generado en sus alrededores. Esta capacidad permitirá la producción de 58 GWh anuales de energía en biometano, contribuyendo a la reducción de 23.000 toneladas de CO₂ al año [29].

2 OBJETIVO Y ALCANCE

Este trabajo tiene como objetivo calcular el potencial de producción de H₂ verde en Andalucía a partir de dos tipos de residuos: los lodos EDAR y la FORS mediante su digestión anaerobia de forma separada y su codigestión conjuntamente. Para ello, se realizará una evaluación de los recursos actualmente disponibles en las provincias de Andalucía, en concreto en las provincias de Huelva, Córdoba, Sevilla y Cádiz. Se hará uso del programa ArcGIS y Excel simultáneamente.

Se han definido los siguientes **objetivos específicos**:

- 1) Cuantificación del recurso disponible: Mediante el programa ArcGIS se pretende localizar las estaciones depuradoras y las plantas de tratamiento de residuos. Se estimará la cantidad de cada recurso disponible en cada una de ellas.
- 2) Caracterización de los recursos disponibles: Se pretende obtener la caracterización necesaria de cada recurso que permita la estimación del biogás obtenido mediante su valorización energética.
- 3) Determinación del potencial: En las instalaciones que sean de mayor interés se calculará la producción de biogás que se podría obtener mediante digestión anaerobia y codigestión de ambos residuos. Posteriormente se realizará una depuración del biogás (“upgrading”) para convertirlo en biometano y así poder someterlo a un proceso de reformado, obteniendo de esta forma el potencial de H₂ verde por provincia.

3 METODOLOGÍA

Este apartado recoge el procedimiento a seguir para el cálculo de cada uno de los objetivos específicos: la cuantificación del recurso, la caracterización y el potencial de biogás e hidrógeno verde en las provincias de Cádiz, Huelva, Sevilla y Córdoba. Los resultados obtenidos se desarrollarán más profundamente en siguiente apartado.

3.1 Cuantificación del recurso.

En primer lugar, se pretende localizar la cantidad de recurso disponible en las provincias citadas. En ambos casos de procederá primero a la localización de las instalaciones mediante el programa ArcGIS y posteriormente a la estimación de la cantidad de cada uno de los residuos.

3.1.1 Lodos de Depuradora.

Se pretende estimar la cantidad de lodos generados en cada EDAR mediante los habitantes equivalentes (h.e) en cada una de ellas y el volumen de lodos generados en Andalucía.

3.1.1.1 Datos utilizados.

Se partirá del catálogo de metadatos del gobierno de España, en el que se encuentran los datos referentes a las Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas en España en 2021 [30]. Se usarán los datos espaciales de Referencia de Andalucía [31] para poder limitar la zona de Andalucía en ArcGIS y se descartarán las depuradoras que no pertenezcan a las provincias mencionadas anteriormente.

Por un lado, hay un panel de atributos que me dará la información de partida de todos los puntos, tal y como se puede apreciar en el ANEXO B. En concreto nos interesa la carga entrante en h.e (uwwLoadEn) y la capacidad de diseño (uwwCapaci) [32]. Por ejemplo, la EDAR de Guadacorte tiene una carga entrante de 6.090 h.e respecto a su capacidad de diseño de 8.000 h.e.

Por otro lado, en el INE se encuentra el volumen de lodos generados en Andalucía en los últimos años, tal y como se muestra en la Tabla 3-1. Se puede observar como el volumen de lodos generados permanece aproximadamente constante, con un ligero descenso en el año 2020.

Tabla 3-1. Volumen de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales. Datos obtenidos del INE [33].

Andalucía	2020	2018	2016	2014
Volumen de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales (toneladas de materia seca/año)	205.899	233.977	230.668	232.900

3.1.1.2 Estimación del caudal de lodos generados en cada EDAR.

Se pretende calcular la cantidad de lodos generados en cada EDAR. No obstante, tenemos la información de los h.e de cada una de ellas y el volumen total de lodos generado en Andalucía. Si calculamos los h.e totales en Andalucía podremos estimar el caudal de lodos que hay en cada punto, mediante una regla de

proporcionalidad (Ec 3-1). La suma de los h.e por provincia, así como el resultante para Andalucía se encuentran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Suma de h.e por provincias y en Andalucía, año 2021. Elaboración propia.

	Cádiz	Córdoba	Huelva	Sevilla	Andalucía
>150.000 h.e.	672.969	520.000	239.826	1.694.980	5.252.346
10.000-150.000 h.e.	757.894	316999	396.480	571.758	3.966.292
2.000-10.000 h.e.	111.844	121.070	100.944	157.675	894.321
Sistema de colectores sin depuradora	0	0	0	0	0
Total	1.542.707	958.069	737.250	2.424.413	10.112.959

En Andalucía obtenemos un total de 10.112.959 h.e que producen 205.899 toneladas de materia seca al año. Añadiremos un nuevo campo en la tabla de atributos “FLodos”, en el que se aplicará la ecuación (3-1). Este campo me calcula automáticamente la cantidad de lodos (toneladas de materia seca/año) para cada punto de la tabla de atributos.

(3-1)

$$\text{Flodos} \left(\frac{\text{toneladas de materia seca}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{lodos Andalucía} * \text{h.e punto}}{\text{h.e Andalucía}} = \frac{205.899 * \text{wwwLoadEn}}{10.112.959}$$

3.1.2 Fracción orgánica de los RSU (o de los residuos domésticos comerciales, RDC)

Se pretende calcular la cantidad de biorresiduos tratados en cada planta de tratamiento de residuos. Se desea calcular el potencial total, es decir, suponiendo el caso ideal en el que toda la fracción orgánica (F.O) contenida en la fracción resto fuera recogida de forma separada. Sin embargo, el potencial accesible actualmente es mucho menor, pues solo se considera accesible aquella F.O que ha sido recogida de forma separada, ya que, en caso contrario, la cantidad de impropios contenida en ella genera numerosos problemas de operación [34].

3.1.2.1 Datos utilizados.

Partimos de un listado en Excel de las plantas de clasificación de residuos municipales en Andalucía en el año 2020 [35], en el que aparecen la cantidad de residuos totales en cada una de ellas. Se añadirán las coordenadas geográficas de cada sitio para poder implementarlo en el programa ArcGIS, obteniendo así la localización de las plantas de tratamiento de residuos. Podremos abrir en dicho programa un panel de atributos que contendrá la información de cada una de ellas.

Se desea estimar qué porcentaje de los residuos tratados en las instalaciones corresponden a biorresiduos mediante los datos de los residuos municipales recogidos para el año 2020 de la REDIAM de Andalucía [36], de los cuales nos interesan la cantidad de los residuos mezclados y biorresiduos recogidos de forma separada por provincia, cuyos datos numéricos se encuentran recogidos en el ANEXO C.

3.1.2.2 Estimación de la cantidad de biorresiduos entrantes en cada planta de tratamiento.

Primero se estima la cantidad de biorresiduos contenida en la mezcla de residuos municipales, ya que sabemos que corresponden al 47% de la fracción resto y los sumamos con los biorresiduos recogidos de forma selectiva para obtener los biorresiduos totales en cada provincia. Posteriormente, se calcula el porcentaje que hay de

biorresiduos sobre el total de residuos, el cual se ha calculado sumando todos los tipos de residuos, ya sean recogidos de forma selectiva o en masa. Estos cálculos intermedios aparecen recogidos en la Tabla 3-3.

Como resultado se obtiene tanto el porcentaje de biorresiduos mediante la suposición anteriormente mencionada, es decir, incluyendo la FO que realmente corresponde a la fracción resto, como el porcentaje de biorresiduos que realmente se recogió de forma separada, tal y como se puede observar en la Tabla 3-4. El porcentaje de biorresiduos sobre el total será aplicado a la cantidad de residuos entrantes en cada planta de tratamiento, según la provincia donde esté ubicada dicha planta, obteniendo así una estimación de la cantidad de biorresiduos en cada una de ellas.

Tabla 3-3. Estimación de biorresiduos, 2020. Datos en toneladas (t). Elaboración propia.

	Biorresiduos en la mezcla	Biorresiduos recogida selectiva	Biorresiduos totales	Residuos totales recogidos
Cádiz	289.320,274	1.198	290.518	682.838
Córdoba	114.867,392	77.534	192.401	334.634
Huelva	116.273,436	0	116.273	261.402
Sevilla	338.724,54	8.842	347.566	1.006.464
Andalucía	1.661.382,83	99.186	1.760.569	4.235.295

Tabla 3-4. Porcentaje de biorresiduos frente a la cantidad total de residuos por planta de tratamiento.

	% biorresiduos sobre total	% biorresiduos recogida separada
Cádiz	42,54	0,18
Córdoba	57,49	23,17
Huelva	44,48	0,00
Sevilla	34,53	0,88
Andalucía	41,57	2,34

Se puede apreciar como el porcentaje de biorresiduos procedente de recogida separada es mucho menor de lo que se podría conseguir. Por tanto, para poder lograr esta situación ideal es necesaria una línea de acción respecto a la gestión de residuos, que promueva la recogida selectiva de materia orgánica. Se prevé que el porcentaje de biorresiduos perteneciente a la recogida separada aumentará considerablemente gracias al artículo 25 de la Ley 7/2022 “recogida separada de residuos para su valorización”, cuya novedad afecta a los biorresiduos. El 30 de junio de 2022 entró en vigor la recogida separada de los biorresiduos de origen doméstico para las entidades locales con población superior a cinco mil habitantes, y el 31 de diciembre de 2023 para el resto [16].

3.2 Caracterización.

A continuación, se procede a la caracterización de dichos recursos, que será importante para el cálculo de la cantidad de energía que seremos capaces de obtener a partir de ellos. En el informe “Estudio de la capacidad de producción de biometano en España, 2023”, realizado por SEDIGAS, se presenta la caracterización necesaria para el cálculo de biogás de ambos residuos, tal como se recoge en la Tabla 3-5, en la que se utiliza la siguiente notación:

MS: % de materia seca respecto a la materia fresca total.

SV: % sólidos volátiles respecto a la MS.

Nm³/tn_{MO}: potencial de producción de biogás por tonelada de materia orgánica seca.

Tabla 3-5. Caracterización de los residuos. Datos obtenidos de [1].

	MS (%)	SV (%)	Biogás (Nm ³ /t SV)	%CH ₄
Lodos EDAR	100%	75%	500	55%
FORSU	29%	77%	382	63%

3.3 Potencial de obtención del Biogás.

Para calcular el potencial del H₂ verde, primero es necesario calcular el potencial de biogás mediante digestión anaerobia que se podría obtener a partir de la M.O de los dos tipos de residuos mencionados. En ambos casos se aplicará la ecuación (3-2) para calcular la producción de biogás.

Ec (3-2)

$$Biogás \left(\frac{Nm^3}{año} \right) = sustrato \left(\frac{t}{a} \right) * x\%_{materia\ seca} * x\%_{materia\ orgánica} * Producción\ biogás \left(\frac{Nm^3}{t_{sv}} \right)$$

3.3.1 Lodos de depuradora.

En España, el 61% de las EDAR de tamaño superior a 50.000 h.e disponen de digestión anaerobia. Sin embargo, debido al coste y la complejidad técnica, menos de un 6% de las EDAR por debajo de este tamaño disponen del tratamiento, pues para depuradoras pequeñas puede resultar inviable [19]. Por consiguiente, se considerará que solo se realizará digestión anaerobia en el caso de que la capacidad de la EDAR sea igual o superior a 50.000 h.e. Las que contengan una capacidad menor serán descartadas.

Se sustituyen los valores de la Ecuación (3-2) conforme a la caracterización anteriormente mencionada en la Tabla 3-5, resultando la Ecuación (3-3), que será aplicada en ArcGIS en la selección de EDAR con una capacidad mayor o igual a 50.000 h.e para poder calcular el biogás generado en esas plantas. Posteriormente, se multiplica ese valor por el porcentaje de metano respecto al biogás (0.55%) para obtener la cantidad de metano generado.

Ec (3-3)

$$Biogás_{lodos\ EDAR} \left(\frac{Nm^3}{año} \right) = Flodos \left(\frac{t}{año} \right) * 1 * 0,75 * 500 \left(\frac{Nm^3}{t_{sv}} \right)$$

3.3.2 Fracción orgánica de los RDC.

La digestión anaerobia requiere de una capacidad mínima para el tratamiento rentable de los residuos biológicos de aproximadamente 15.000 t/año [17]. Por tanto, se descartará la producción de biogás en plantas de tratamiento de tamaño menor al indicado.

Se aplicará la Ecuación (3-4) a las plantas de tratamiento que traten una cantidad de biorresiduos mayor o igual que 15.000 t/año para calcular el biogás generado a partir de la FO. Multiplicando ese valor por 0.63 obtenemos la cantidad de metano generado.

Ec (3-4)

$$Biogás_{FO} \left(\frac{Nm^3}{año} \right) = F.O \left(\frac{t}{año} \right) * 0,29 * 0,77 * 382 \left(\frac{Nm^3}{t_{sv}} \right)$$

3.3.3 Codigestión.

La generación de biogás se ve favorecida mediante la incorporación de la FORSU en la digestión anaerobia de las aguas residuales. Se estima que la relación óptima sustrato-inóculo (FO-lodo) es de un 25%. Otras relaciones conllevan a un rendimiento de metano menor o incluso a la inestabilidad del sistema [37]. El biogás obtenido mediante la codigestión de ambos residuos en esta proporción se cuatuplica respecto al producido solo con agua residual urbana. Además, el porcentaje de metano incrementa hasta un 74% [26].

Por consiguiente, para poder determinar una estimación de la mezcla se considera que el inóculo es el caudal de lodos generados, siendo necesario averiguar la cantidad de fracción orgánica que será incorporada en dicho caudal en las EDARs de un tamaño superior a 50.000 h.e con la finalidad de poder realizar codigestión. Para ello, la cantidad de lodos generados en cada EDARs se multiplicará por 0,25. Asimismo, como sabemos que la producción de biogás se ve cuatuplicada, podemos obtener una estimación del biogás y biometano generados en la codigestión.

Con el fin de poder visualizar los sitios donde resulta más rentable realizar codigestión se ha trazado un ratio de 30 km alrededor de las EDARs de mayor tamaño, las plantas de tratamiento que queden dentro de los círculos trazados serán las más interesantes para transportar sus residuos. Se pretenden trasladar los residuos de aquellas plantas de tratamientos donde no resulte viable la digestión anaerobia de la FO por ser de menor tamaño. A su vez, hay que tener en cuenta que las EDARs donde se pretende realizar codigestión estén sobredimensionadas, es decir, no se encuentren al 100% de su capacidad total.

3.4 Potencial de obtención del Hidrógeno verde.

Aunque parte del biogás (en torno al 10% [34]) pueda ser usado en el propio consumo energético de la instalación para cubrir sus propias necesidades térmicas, se supondrá que su totalidad es destinada a la formación de hidrógeno verde mediante SMR. En este trabajo se despreciarán algunas pérdidas energéticas, como las del transporte, las cuales son de aproximadamente el 1,5% del biometano [38], o las pérdidas en su compresión. Para poder calcular el hidrógeno verde producido, se utilizará el HMR, que es el ratio de producción de hidrógeno por cantidad de metano introducido, el cual equivale a 2.51 [39]. Por tanto, se multiplicará el valor del biometano obtenido mediante la purificación del biogás por el HMR en los distintos casos de estudio.

$$Producción\ de\ H_2: HMR = 2,51 \frac{Nm^3\ H_2}{Nm^3\ CH_4}$$

Una vez calculado la cantidad de hidrógeno obtenido en estado gaseoso, como 1 Nm³ de H₂ equivale a 3 kWh de Energía [40], se puede calcular la energía obtenida.

4 RESULTADOS

Se muestran los resultados obtenidos para ambos recursos, según los objetivos específicos indicados, ofreciéndose una visualización de la localización de todas las instalaciones, así como de las de mayor interés para la producción de biogás. Paralelamente, se señala el número de instalaciones en cada caso y el potencial de biogás e hidrógeno por provincia.

4.1 Cuantificación del recurso.

Se ha realizado un mapeo de las plantas depuradoras y de tratamiento de residuos para facilitar una rápida visualización sobre la localización de los recursos. A su vez, se expone el número total de instalaciones y la cantidad total del recurso disponible por provincia.

4.1.1 Lodos de Depuradora.

En la Figura 4-1 se muestra la localización de las plantas depuradoras en las provincias de Andalucía mencionadas junto con la leyenda según el rango de los h.e al que corresponde cada EDAR. Se puede percibir como las de un rango más elevado de h.e se encuentran sobre todo en la provincia de Sevilla y en las zonas costeras de Huelva y Cádiz.

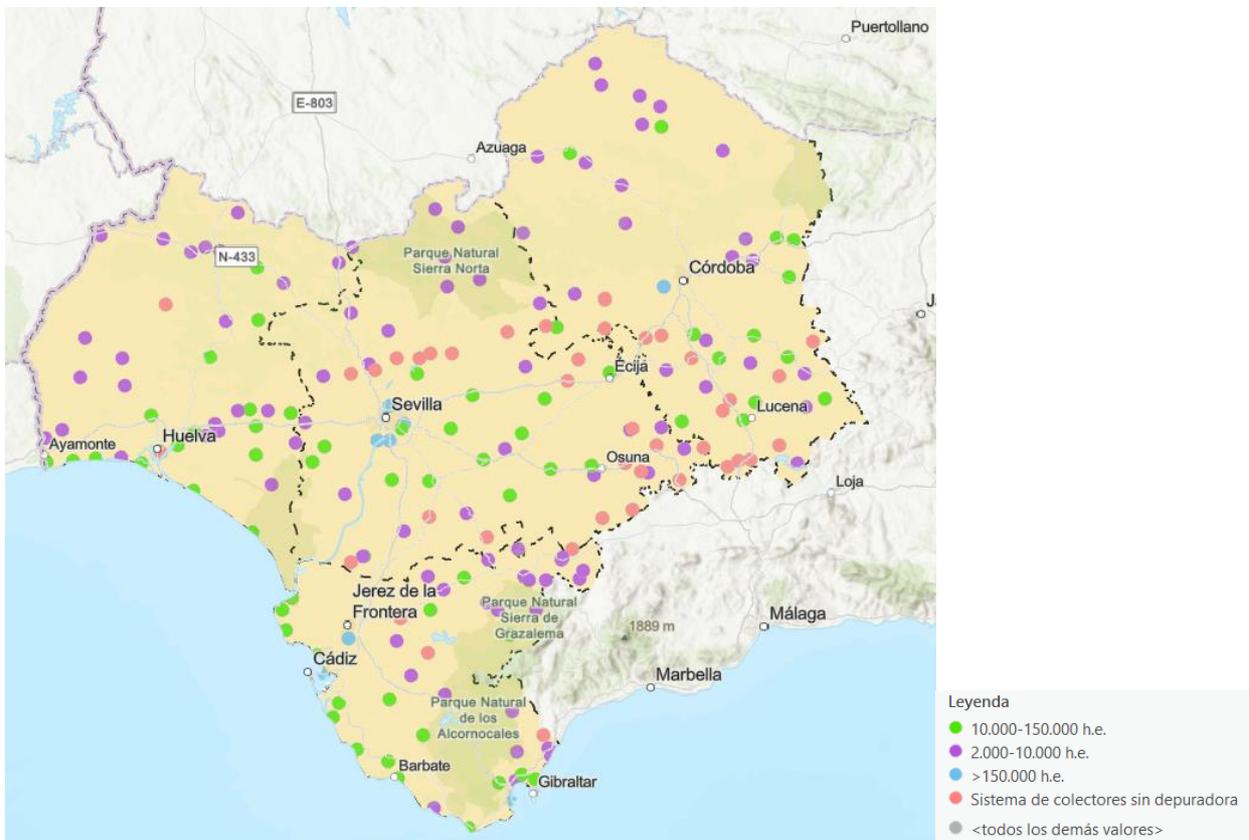


Figura 4-1. Mapeo EDAR según h.e. Elaboración propia.

En la Tabla 4-1 se agrupa el número de plantas depuradoras activas para cada provincia en el año 2021, sin tener en cuenta los sistemas colectores sin depuradora. También se reúne el caudal de lodos generados por provincia, cuya información detallada para cada EDAR se encuentra recogida en el ANEXO E. En total, para las 4 provincias mencionadas hay 164 EDARs, siendo Sevilla la provincia que más lodos generó entre esas cuatro, con un caudal de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales de 49.360 toneladas de materia seca. Entre las 4 provincias generan una cantidad total de lodos de 115.286 t/año frente al total generado en Andalucía de 205.899 (t/año 2020).

Tabla 4-1. Cantidad de lodos generados (t/año). Elaboración propia.

	N.º total EDAR	FLodos (t/año)
Cádiz	42	31.409,385
Córdoba	37	19.506,205
Huelva	40	15.010,348
Sevilla	45	49.360,846
Total	164	115.286,785

4.1.2 Fracción Orgánica de los RDC.

Se puede visualizar en la Figura 4-2 la localización las plantas de tratamientos de RSU (Plantas de clasificación y Plantas de recuperación y compostaje) existentes en las provincias anteriormente mencionadas de Andalucía.

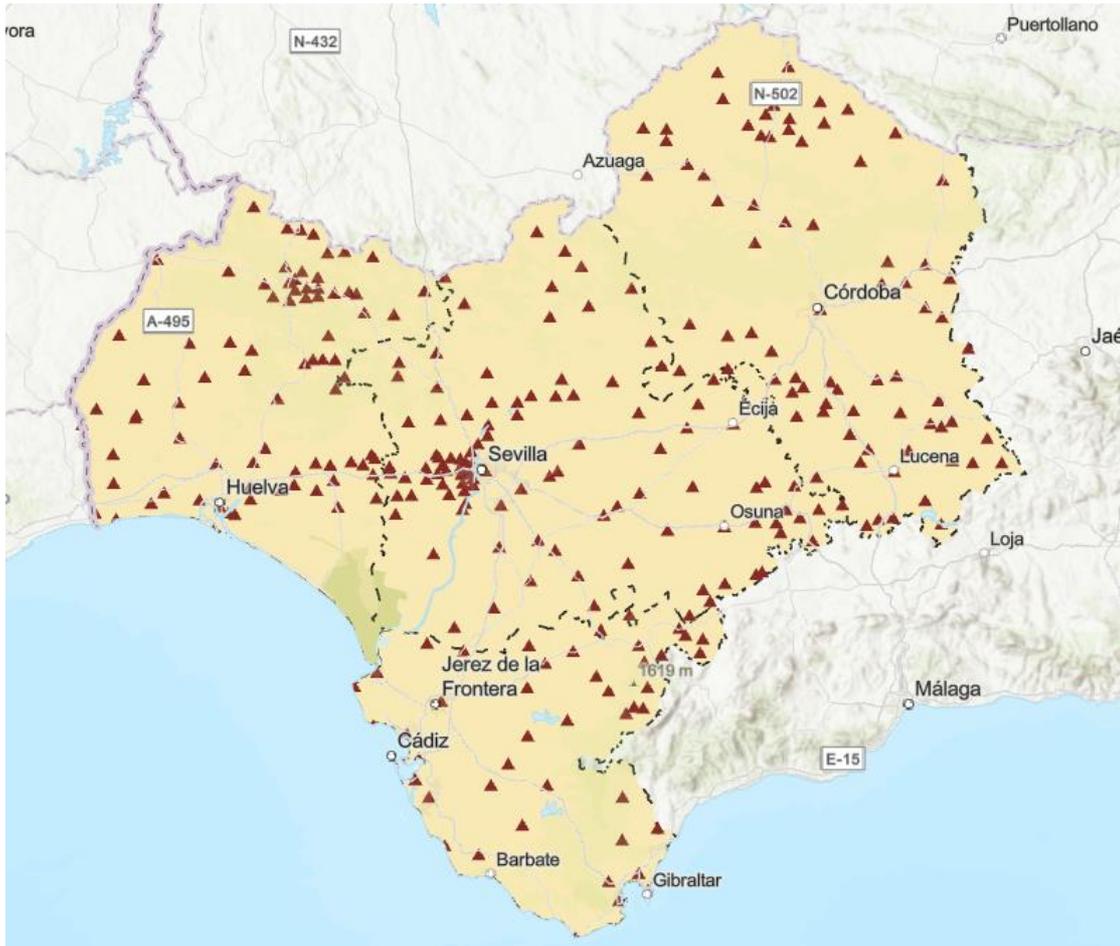


Figura 4-2. Mapeo de plantas de RSU. Elaboración propia.

Para cada provincia en la Tabla 4-2 se encuentra recogido el número de plantas de tratamiento, con un total de 308 para las 4 provincias mencionadas. De igual forma, se muestra el número de biorresiduos tratados, podemos observar que Sevilla es nuevamente la que más genera. Se obtiene un total de 1.005.420 toneladas de biorresiduos para esas 4 provincias. Asimismo, llama la atención que a pesar de que Cádiz cuente con un menor número de plantas de tratamiento que las otras provincias, es la segunda que más biorresiduos al año trata, pues sus instalaciones son de mayor tamaño. En el ANEXO F se puede consultar el listado de cada una de las plantas de tratamiento de RSU por provincia junto con la cantidad de biorresiduos tratados en cada una de ellas.

Tabla 4-2. Número de plantas de tratamiento.

	N.º Plantas	Biorresiduos (t/año)
Cádiz	45	306.346,972
Córdoba	77	208.472,449
Huelva	80	122.949,120
Sevilla	106	367.651,941
Total	308	1.005.420,481

4.2 Potencial de producción del Biogás.

Gracias a la representación mediante el programa ArcGIS se puede observar donde hay mayor potencial de obtención de biogás, así como la localización y distancia entre las instalaciones. Se analizará el potencial de biogás mediante la digestión anaerobia de ambos recursos y la codigestión, es decir, su valorización energética de forma separada y conjunta.

4.2.1 Digestión Anaerobia.

En la Figura 4-3 se puede observar la localización de las EDARs y plantas de tratamiento dónde resulta más interesante la obtención de biogás mediante digestión anaerobia, así como cuales de éstas son de mayor tamaño. En el caso de las plantas de tratamiento, la que trató más biorresiduos es la del municipio de Sevilla con un total de 130.197 toneladas, cuya titularidad corresponde a ABOGARSE-Mancomunidades de Municipios “Los Alcores” y Guadalquivir”. De igual forma, la EDAR que más lodos generó fue la de Sevilla, COPERO con unas 14.465 toneladas de materia seca. Mediante el programa ArcGIS se puede conocer la información detallada de cada planta gracias el elemento emergente que aparece al seleccionarla, un ejemplo de ello se puede ver en el ANEXO D.

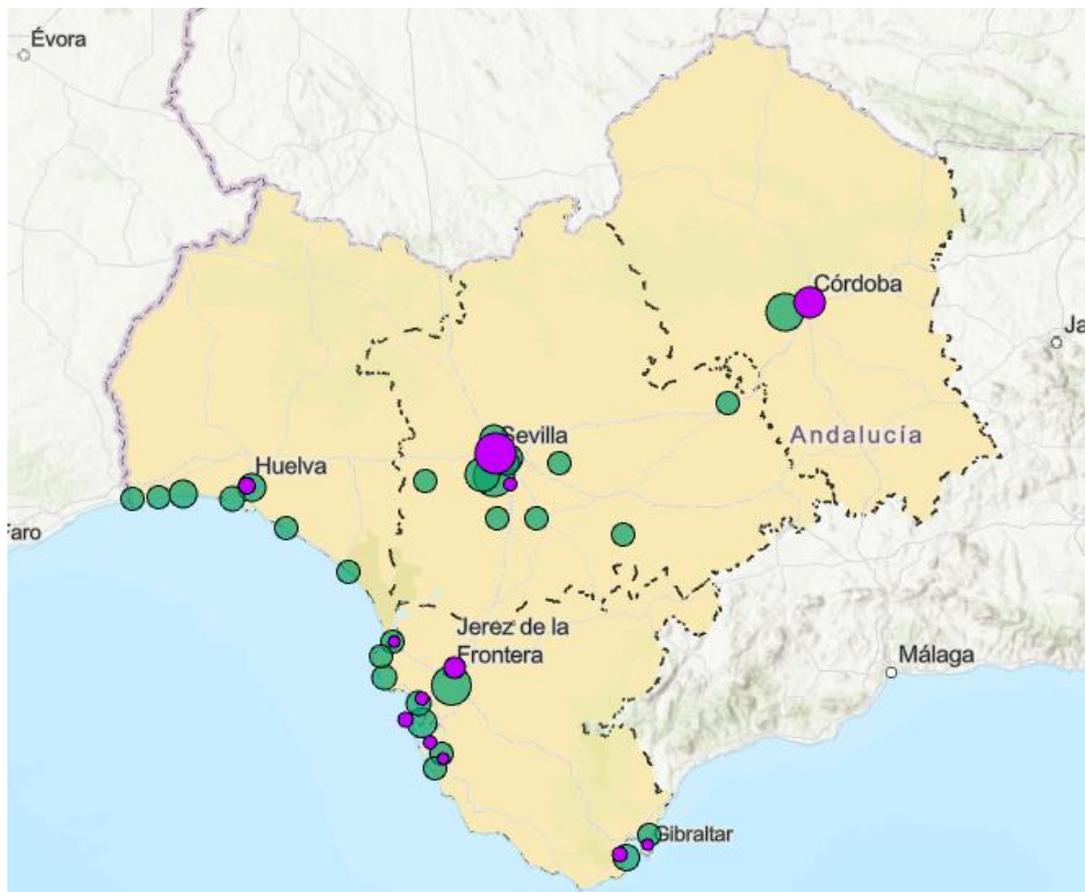


Figura 4-3. Instalaciones de biogás. FORSU: rosa; EDAR: verde

El número de EDARs y de plantas de tratamiento de FO en las que resulta más interesante obtener biogás se encuentra recogido en la Tabla 4-3, con un total de 41 instalaciones de biogás. Para el caso de las EDARs hay 29 instalaciones que cuentan con una capacidad superior a 50.000 h.e y para las plantas de tratamiento hay 12 que constan de una carga superior a 15.000 t/año de biorresiduos.

Tabla 4-3. Número de plantas para la producción de biogás.

	Nº EDAR Biogás	Nº Instalaciones FO Biogás
Sevilla	11	2
Cádiz	10	8
Huelva	7	1
Córdoba	1	1
Total	29	12

En la Tabla 4-4 se muestra el biogás total generado en esas 4 provincias. En este caso, se considera exclusivamente el caudal de lodos generado en las EDARs donde se produce biogás. Los resultados específicos para cada instalación se encuentran recogidos en el ANEXO E. De igual forma ocurre para la F.O, mostrada en la Tabla 4-5 (ANEXO F). La producción de biogás a partir de los lodos de depuración es mayor en la provincia de Sevilla, seguida de Cádiz. Resulta llamativo que Córdoba genere más biogás que Huelva, pues cuenta con un tan solo una EDAR para su producción, no obstante, dicha EDAR es de gran tamaño, con lo cual genera mayor cantidad de lodos que las siete de Huelva juntas. El biogás obtenido a partir de los biorresiduos es por el contrario superior en Cádiz, pues como hemos mencionado anteriormente cuenta con plantas de tratamiento de mayor cantidad de biorresiduos entrantes y por consiguiente posee mayor potencial para la producción de biogás.

Tabla 4-4. Biogás producido por provincia en las EDARs.

	FLodos (t/año)	Biogás (Nm ³ /año)	Metano (Nm ³ /año)
Cádiz	24.284,127	9.106.547,787	5.008.601,283
Córdoba	10.587,157	3.970.183,702	2.183.601,036
Huelva	9.319,18	3.494.693,124	1.922.081,218
Sevilla	42.055,014	15.770.630,92	8.673.847,009
Total	86.245,478	32.342.055,54	17.788.130,55

Tabla 4-5. Biogás producido por provincias en las plantas de tratamiento.

	Biorresiduos (t/año)	Biogás (Nm ³ /año)	Metano (Nm ³ /año)
Cádiz	210.690,4027	17.972.017,77	11.322.371,19
Córdoba	92.621,59995	7.900.678,049	4.977.427,171
Huelva	34.643,81779	2.955.138,443	1.861.737,219
Sevilla	155.362,99	13.252.556,26	8.349.110,445
Total	493.318,8104	42.080.390,52	26.510.646,03

4.2.2 Codigestión.

En la Figura 4-4 se puede visualizar dentro del radio de 30 km las plantas de tratamiento que resultan más cercanas a las EDARs y que, por tanto, resultan más factibles para trasladar sus residuos y tratarlos en codigestión.

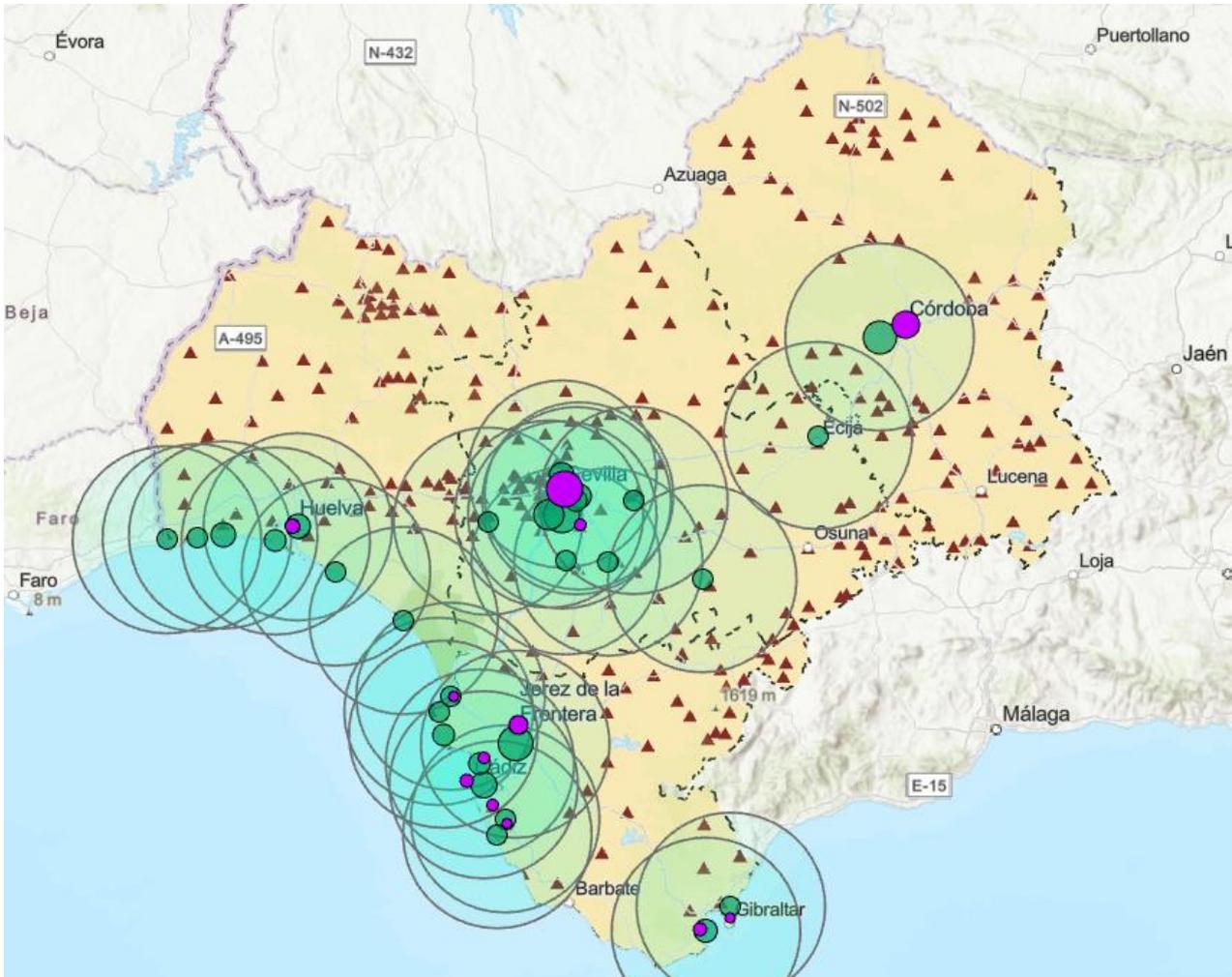


Figura 4-4. Análisis de cercanía para la codigestión. FORSU: rosa; EDAR: verde.

A continuación, en la Tabla 4-6 se encuentran recogidos la cantidad de sustrato-inóculo (lodos-biorresiduos) necesarios para realizar codigestión por provincia. Se presenta a su vez, el biogás y metano generado. En el ANEXO G se encuentran recogidas más detalladamente las EDARs donde se pretende realizar codigestión. Se puede apreciar que es suficiente con trasladar los biorresiduos de una sola planta de tratamiento hasta la EDAR. Por tanto, se escogerá la planta de tratamiento que se encuentre a menor distancia dentro del radio, teniendo en cuenta que dicha planta no sea ya susceptible a la producción de biogás mediante digestión anaerobia. Se puede distinguir como el biogás generado por codigestión es considerablemente superior a cualquiera de los dos casos estudiados por digestión anaerobia.

Tabla 4-6. Codigestion.

	Flodos (t/año)	Biorresiduos (t/año)	Biogás (Nm ³ /año)	Metano (Nm ³ /año)
Cádiz	24.284,127	6.071,03175	36.426.191,15	27.319.643,36
Córdoba	10.587,157	2.646,78925	15.880.734,81	11.910.551,11
Huelva	9.319,18	2.329,795	13.978.772,5	10.484.079,37
Sevilla	42.055,014	10.513,7535	63.082.523,7	47.311.892,77
Total	86.245,478	21.561,3695	129.368.222,1	97.026.166,61

4.3 Potencial de producción del hidrógeno verde.

Finalmente, se puede observar en la Figura 4-5 la producción de hidrógeno según provincia y si la técnica aplicada es digestión anaerobia de los lodos EDAR o de la FORSU, o codigestión de ambos residuos. Se aprecia como la codigestión resulta el método más viable. En la digestión anaerobia de la FO se consigue generar mayor hidrógeno verde que respecto al de los lodos. No obstante, no hay que olvidar que para ello es crucial la recogida separada de la fracción orgánica y que se necesitaría una mayor inversión, pues la digestión anaerobia en las EDARs cuenta con mayor madurez tecnológica.

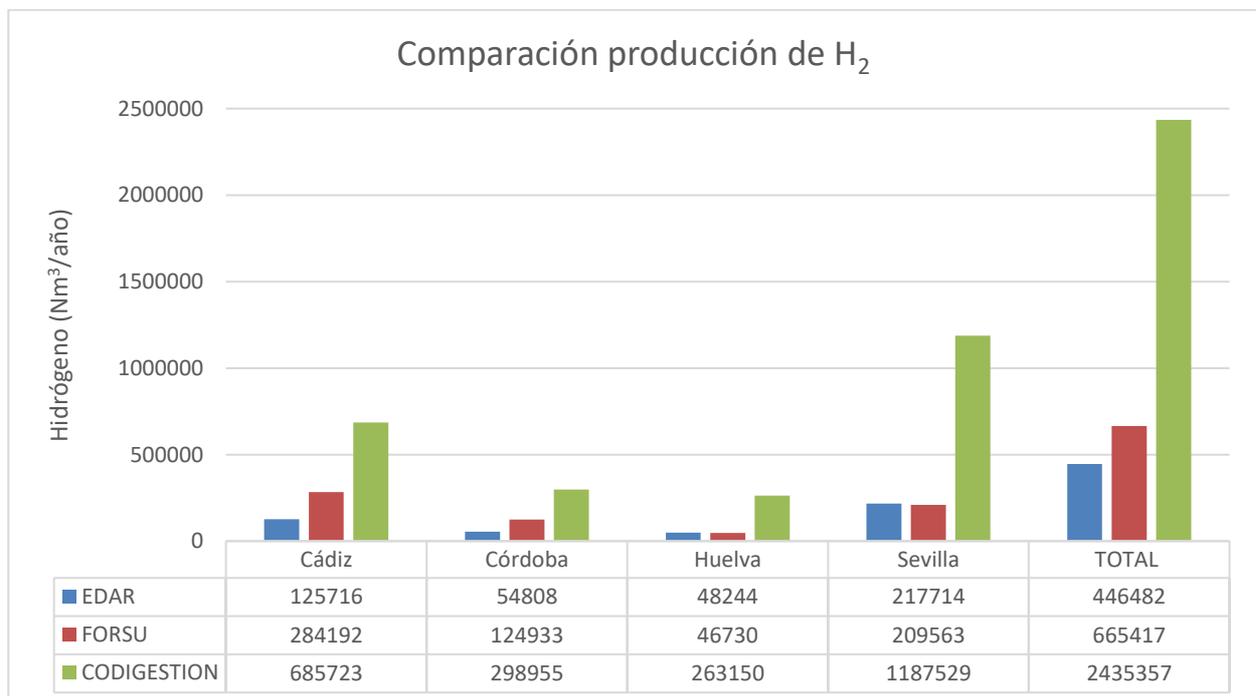


Figura 4-5. Comparación de la producción de hidrógeno en los tres casos de estudio.

Por otro lado, se podrían complementar la codigestión para la EDARs y la digestión anaerobia de la FO, pues los residuos trasladados a las plantas EDAR procederían de otras instalaciones. En este caso, el potencial de hidrógeno verde que se podría obtener es de 310.074 Nm³ al año, es decir, 9.302 MWh/año en términos de energía; la aportación por provincia en este caso se encuentra distribuida según se muestra en la Figura 4-6.

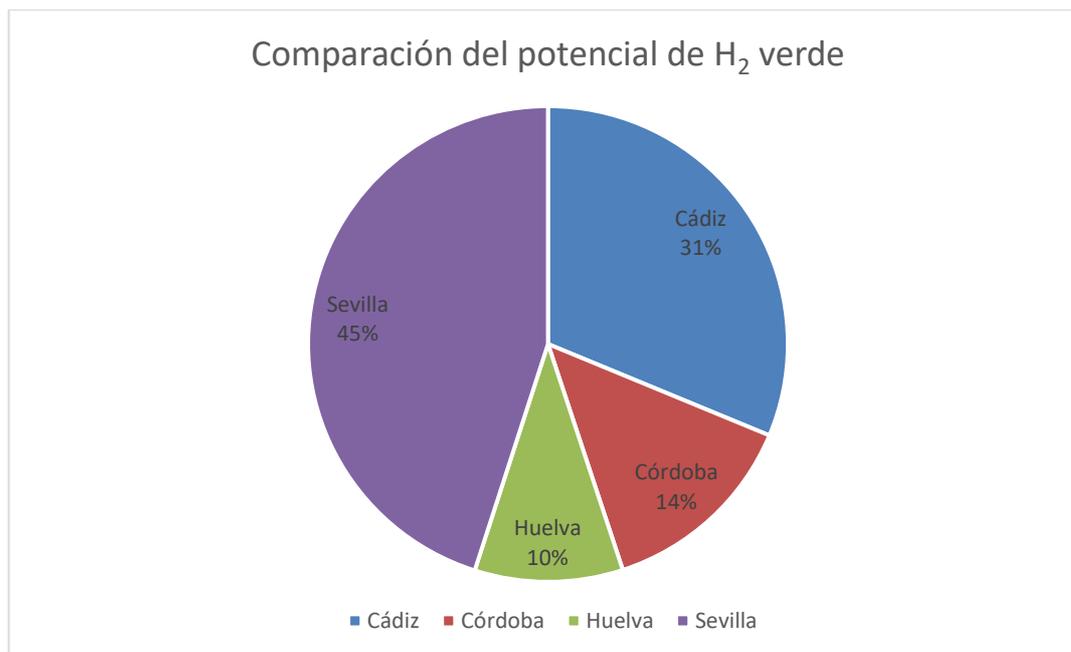


Figura 4-6. Comparación del potencial de producción de hidrógeno verde según la provincia.

Finalmente, el potencial de hidrógeno verde resultante, tanto en los tres casos de estudio, como al combinar la digestión anaerobia de la FORSU y la codigestión, se encuentra recogido en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Potencial de hidrógeno verde resultante (MWh/año).

	EDAR H ₂ (MWh/año)	FORSU H ₂ (MWh/año)	CODIGESTIÓN H ₂ (MWh/año)	FORSU +CODIGESTIÓN H ₂ (MWh/año)
Cádiz	377,147677	852,574551	2.057,16914	2.909,7437
Córdoba	164,425158	374,800266	896,864498	1.271,66476
Huelva	144,732716	140,188813	789,451177	929,639989
Sevilla	653,14068	628,688017	3.562,58553	4.191,27354
TOTAL	1.339,44623	1.996,25165	7.306,07035	9.302,32199

5 CONCLUSIÓN

El uso de la materia orgánica como recurso para producir biometano resulta ventajoso en numerosos aspectos, pues se consigue por un lado reducir los gases de efecto invernadero emitidos de forma incontrolada por la descomposición de la materia orgánica en vertederos como los emitidos por las refinerías, consiguiendo evitar el desperdicio de estos residuos y la quema de combustibles fósiles, junto a una mayor independencia energética.

Así pues, el uso del biometano en las refinerías resulta no solo ventajoso de cara a las emisiones mitigadas, sino también cuenta con un gran atractivo de cara al potencial de hidrógeno verde resultante, pues permite aumentar considerablemente la producción de energía sin tener que hacer una descomunal inversión en la infraestructura, ya que se está aprovechando la existente para el gas natural. Esto facilitaría el cumplimiento de los objetivos marcados en la transición energética actual, basada en una economía circular y sostenible con el hidrógeno verde como clave.

Los resultados muestran como la implementación de cualquiera de los tres casos ya supone un incremento de energía producida interesante. No obstante, el más atractivo resulta la codigestión de ambos recursos, pues consigue una producción de hidrógeno considerablemente superior y a su vez no requiere de una gran inversión pues las EDARs están sobredimensionadas.

La digestión anaerobia de la F.O parece a primera vista más interesante que la de los lodos EDAR respecto a términos de hidrógeno producido, pero no se debe olvidar que se requeriría una inversión mucho mayor pues no cuenta con tanta madurez tecnológica como en el caso de los lodos, en los que en varias EDARs ya se está realizando la digestión anaerobia mayoritariamente para el propio autoconsumo. Asimismo, es importante destacar, que para que los casos estudiados en los que se utiliza la FORSU sea factible es crucial que la recogida separada se implemente de forma adecuada conforme a la Ley 7/2022, para lo que es necesario la participación ciudadana.

Finalmente, se propone la complementariedad de la codigestión junto a la digestión anaerobia de la FO, pues los residuos usados para la codigestion pueden provenir de otras plantas de tratamiento donde no se esté realizando dicha valorización energética.

ANEXO A. Listado de instalaciones de generación de biogás.

Tabla 0-1. Estado de las instalaciones de generación de biogás [41].

Nombre de la Planta	Potencia (MW)	Municipio	Provincia	Tecnología
EDAR Golondrina	0,50	Córdoba	Córdoba	Biogás Autoconsumo
EMASAGRA EDAR Churriana Sur	0,60	Granada	Granada	Biogás Autoconsumo
EDAR Huelva	0,25	Huelva	Huelva	Biogás Autoconsumo
EDAR del Guadalhorce	1,44	Málaga	Málaga	Biogás Autoconsumo
EDAR Ranilla Este	0,50	Alcalá de Guadaira	Sevilla	Biogás Autoconsumo
EDAR Copero Sur	1,90	Dos Hermanas	Sevilla	Biogás Autoconsumo
EDAR San Jerónimo Norte	0,50	Sevilla	Sevilla	Biogás Autoconsumo
EDAR Tablada Oeste	0,50	Sevilla	Sevilla	Biogás Autoconsumo
EDAR Guadalete	0,47	Jerez de la Frontera	Cádiz	Biogás - Generación
Vertedero de Jerez FRA Biogás	1,65	Jerez de la Frontera	Cádiz	Biogás - Generación
Vertedero de Montalban	2,55	Montalbán de Córdoba	Córdoba	Biogás - Generación
RSU Granada (Inagra)	0,62	Granada	Granada	Biogás - Generación
Biometanización y compostaje de RSU Sierra Sur	0,80	Jaén	Jaén	Biogás - Generación
Vertedero Valsequillo Biogás	2,55	Antequera	Málaga	Biogás - Generación
Central Los Ruices (Limasa III)	3,16	Málaga	Málaga	Biogás - Generación
RSU Cónica Montemarta	10,41	Alcalá de Guadaira	Sevilla	Biogás - Generación
Biolix	1,42	Alcalá del Río	Sevilla	Biogás - Generación

ANEXO B. Datos EDAR.

The screenshot shows a GIS software window titled 'H,C,S,C. Depuradoras...s_Urbanas_Q2021'. The interface includes a toolbar with options like 'Agregar', 'Calcular', 'Selección: Seleccionar por atributos', 'Zoom a', 'Cambiar', 'Borrar', and 'E'. Below the toolbar is a table with the following data:

	provincia	uwwName	uwwLoadEn	uwwCapaci	Leyenda	SHAPE *
1	Cádiz	GUADACORTE	6090	8000	2.000-10.000 h.e.	Punto
2	Cádiz	JIMENA DE LA FRON...	5790	15000	2.000-10.000 h.e.	Punto
3	Cádiz	VEJER DE LA FRONTE...	16057	18000	10.000-150.000 h.e.	Punto
4	Cádiz	CHIPIONA	40370	90000	10.000-150.000 h.e.	Punto
5	Cádiz	SIN EDAR SAN MART...	0	0	Sistema de colectore...	Punto
6	Cádiz	BORNOS	7500	7500	2.000-10.000 h.e.	Punto
7	Cádiz	BOLONIA	4400	4400	2.000-10.000 h.e.	Punto
8	Cádiz	SETENIL DE LAS BOD...	3300	3300	2.000-10.000 h.e.	Punto
9	Cádiz	RENALLUR CASAS VIEL...	11202	11202	10.000-150.000 h.e.	Punto

At the bottom of the window, there is a status bar showing '0 de 206 seleccionado(s)' and a 'Filtros:' section with several icons.

Figura 0-1. Panel de atributos. Información inicial EDAR.

ANEXO C. Residuos recogidos en las provincias de Andalucía.

Tabla 0-2. Recogida de residuos municipales en Andalucía, 2020. Datos en toneladas (t) [36].

Provincia	Mezcla de residuos municipales	Residuos biodegradables de parques y jardines	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes
Cádiz	615.575,05	1.197,5	0
Córdoba	244.398,707	7.530,148	70.003,821
Huelva	247.390,29	0	0
Sevilla	720.690,51	7.117,63	1.724
Andalucía	3.534.857,082	27.393,888	71.792,041

ANEXO D. Ejemplo de elementos emergentes al seleccionar una instalación.

Elemento emergente

EDAR_capacidad mayor (1)

COPERO

EDAR_capacidad mayor - COPERO

provincia	Sevilla
uwwName	COPERO
uwwLoadEn	710488
uwwCapaci	950000
Leyenda	> 150.000 h.e.
Vlodos_t/año	14465,476
Biogas (Nm ³ /año)	5424553,6115592
Metano (Nm ³ /año)	2983504,48635756
Biorr_neces_codig	3616,3690743728

1 de 1 | 235.285,65E 4.133.481,46N m

Figura 0-2. Elemento emergente al seleccionar la EDAR COPERO.

Elemento emergente

Plantas de tratamiento mayor (1)

Sevilla

Plantas de tratamiento mayor - Sevilla

ObjectID	293
Provincia	Sevilla
COD_INE	41091
Municipio	Sevilla
Tipología de instalación	Planta de Clasificación y Planta Recuperación y Compostaje Montemarta-Cónica. Alcalá de Guadaíra
Titularidad	ABORGASE-Mancunidades de Municipios "Los Alcores" y "Guadalquivir"
Cantidad (t)	382932,812301
Biorresiduos totales (t/año)	130197,156182
Biogas (Nm ³ /año)	11105895,540635
Metano (Nm ³ /año)	6996714,1906
Hidrogeno (Nm ³ /año)	175617,52618406

1 de 1 | 235.861,58E 4.141.575,47N m

Figura 0-3. Elemento emergente al seleccionar la planta de tratamiento ABORGASE.

ANEXO E. Caudal de lodos generados en cada EDAR de las provincias de Andalucía. Biogás producido en EDARs de mayor tamaño.

Provincias	FLodos (t/año)	Biogás (Nm³/año)	Metano (Nm³/año)
Cádiz	31409,385	9106547,787	5008601,283
ALCALA DE LOS GAZULES	191,383	0	0
ALCALA DEL VALLE	112,489	0	0
ALGECIRAS	3551,645	1331866,838	732526,7606
ALGODONALES	156,771	0	0
ARCOS DE LA FRONTERA	549,718	0	0
BARBATE	750,467	0	0
BENALUP-CASAS VIEJAS	231,94	0	0
BOLONIA	89,584	0	0
BORNOS	152,699	0	0
BOSQUE (EL)	60,306	0	0
CADIZ-SAN FERNANDO	4552,07	1707026,292	938864,4608
CASTELLAR DE LA FRONTERA	66,821	0	0
CHICLANA	1480,695	555260,7306	305393,4018
CHIPIONA	821,93	308223,6847	169523,0266
CONIL	467,708	0	0
ESPERA	92,821	0	0
GASTOR (EL)	61,08	0	0
GRAZALEMA	73,194	0	0
GUADACORTE	123,992	0	0
GUADALETE	5597,878	2099204,093	1154562,251
GUADIARO	55,216	0	0
JIMENA DE LA FRONTERA	117,884	0	0
LA BARCA DE LA FLORIDA	100,374	0	0
LA BARROSA	610,797	229049,0597	125976,9828
LA LINEA DE LA CONCEPCION	2247,083	842656,2208	463460,9214
LAS GALERAS	2610,325	978871,6966	538379,4331
LOS BARRIOS	368,168	0	0
MEDINA SIDONIA	319,243	0	0
OLVERA (NORTE)	146,591	0	0
OLVERA SUR	146,591	0	0
PATERNA DE LA RIVERA	158,461	0	0
PRADO DEL REY	137,837	0	0

ROTA	1427,23	535211,3029	294366,2166
SAN ROQUE	519,178	0	0
SANLUCAR DE BARRAMEDA	1384,474	519177,8687	285547,8278
SETENIL DE LAS BODEGAS	67,188	0	0
SIN EDAR JEDULA	0	0	0
SIN EDAR SAN JOSE DEL VALLE	0	0	0
SIN EDAR SAN MARTIN DEL TESORILLO	0	0	0
SOTOGRADE-TORREGUADIARO	117,375	0	0
TARIFA	418,946	0	0
UBRIQUE	596,546	0	0
VEJER DE LA FRONTERA	326,919	0	0
VILLAMARTIN	299,291	0	0
ZAHARA DE LA SIERRA	48,477	0	0
Córdoba	19506,207	3970183,702	2183601,036
ADAMUZ	123,239	0	0
AGUILAR DE LA FRONTERA	183,239	0	0
ALCARACEJOS-VILLANUEVA DEL DUQUE	117,131	0	0
AÑORA-DOS TORRES	84,697	0	0
BADOLATOSA	0	0	0
BAENA	605,667	0	0
BELALCAZAR NUEVA	105,77	0	0
BÉLMEZ	109,536	0	0
BUJALANCE-CAÑETE DE LAS TORRES	394,962	0	0
CABRA	658,48	0	0
CARCABUEY	61,752	0	0
CASTRO DEL RIO-ESPEJO	425,115	0	0
DOÑA MENCIA	0	0	0
EL CARPIO-PEDRO ABAD	168,987	0	0
ESPIEL	42,328	0	0
FERNAN NUÑEZ	315,009	0	0
FUENTE OBEJUNA	61,426	0	0
HINOJOSA DEL DUQUE	173,263	0	0
HORNACHUELOS	97,728	0	0
IZNAJAR-LA CELADA-EL HIGUERAL	78,773	0	0
LA GOLONDRINA	10587,157	3970183,702	2183601,036
LA VICTORIA	0	0	0

LAS NAVAS DE LA CONCEPCION	73,499	0	0
LUCENA	285,039	0	0
LUQUE	71,932	0	0
MONTEMAYOR	111,98	0	0
MONTILLA	441,81	0	0
MONTORO	305,887	0	0
NUEVA CARTEYA	189,612	0	0
PALMA DEL RIO	580,828	0	0
PEÑARROYA-PUEBLO NUEVO	506,962	0	0
POZOBLANCO	537,42	0	0
PRIEGO DE CORDOBA	343,126	0	0
PUENTE GENIL	816,534	0	0
RUTE NUEVA	0	0	0
SANTAELLA	104,935	0	0
SIN EDAR ALBENDIN	0	0	0
SIN EDAR ALMODOVAR DEL RIO	0	0	0
SIN EDAR BENAMEJI	0	0	0
SIN EDAR CARLOTA (LA)	0	0	0
SIN EDAR ENCINAS REALES	0	0	0
SIN EDAR FUENTE PALMERA	0	0	0
SIN EDAR LA RAMBLA-MONTALBAN	0	0	0
SIN EDAR MONTURQUE	0	0	0
SIN EDAR MORILES-NAVAS DEL SEPILLAR	0	0	0
SIN EDAR PALENCIANA	0	0	0
SIN EDAR POSADAS	0	0	0
VILLA DEL RIO	237,234	0	0
VILLAFRANCA DE CORDOBA	118,006	0	0
VILLANUEVA DE CORDOBA	188,594	0	0
VILLAVICIOSA DE CORDOBA	133,011	0	0
VISO-VILLARALTO	65,539	0	0
Huelva	15010,347	3494693,124	1922081,218
ALOSNO	71,26	0	0
ARACENA NUEVA	210,542	0	0
AROCHE	111,552	0	0
AYAMONTE	501,831	188186,7075	103502,6891
BEAS-TRIGUEROS-S.JUAN	401,416	0	0
BOLLULLOS	417,215	0	0

BONARES	173,059	0	0
CHUCENA-ESCACENA-PATERNA-MANZANILLA	357,031	0	0
CONDADO DE HUELVA I	671,226	0	0
CORTEGANA	148,688	0	0
CUMBRES MAYORES	61,161	0	0
EL ROMPIDO	156,588	0	0
GALAROZA	53,445	0	0
GIBRALEON	211,417	0	0
HIGUERA DE LA SIERRA	48,823	0	0
HINOJOS	106,34	0	0
HUELVA	4882,837	1831063,993	1007085,196
ISLA CRISTINA	671,877	251953,9657	138574,6811
JABUGO	75,719	0	0
LA ANTILLA	1164,424	436659,1275	240162,5201
LA PUEBLA DE GUZMAN NUEVA	105,973	0	0
LUCENA DEL PUERTO	72,38	0	0
MATALASCAÑAS	524,756	196783,6822	108231,0252
MAZAGON	462,659	173497,0278	95423,36528
MOGUER	381,952	0	0
NERVA-RIO TINTO-EL CAMPILLO	352,491	0	0
NIEBLA	79,872	0	0
PALMA DEL CONDADO	211,031	0	0
PALOS DE LA FRONTERA	0	0	0
PUENTE ESURI	81,949	0	0
PUNTA UMBRIA	1110,796	416548,62	229101,741
ROCIO (EL)	72,542	0	0
ROSAL DE LA FRONTERA	78,63	0	0
SAN BARTOLOME DE LA TORRE	98,257	0	0
SANTA OLALLA DEL CALA	65,091	0	0
SIN EDAR CERRO DE ANDEVALO (EL)-CALAÑAS	0	0	0
VALVERDE DEL CAMINO	421,634	0	0
VILLABLANCA-SAN SILVESTRE	96,282	0	0
VILLALBA DEL ALCOR	75,006	0	0
VILLANUEVA DE LOS CASTILLEJOS-EL ALMENDRO	112,611	0	0
VILLARRASA	44,629	0	0
ZALAMEA LA REAL	65,355	0	0

Sevilla	49360,847	15770630,92	8673847,009
AGUADULCE	0	0	0
ALANIS	73,031	0	0
ALJARAFE GUADIAMAR (AZNA)	482,754	181032,7418	99568,00801
ALJARAFE III-B	461,498	0	0
AZNALCOLLAR	196,188	0	0
BRENES	244,319	0	0
CABEZAS DE SAN JUAN (LAS)	150,663	0	0
CAMPANA (LA)	137,531	0	0
CANTILLANA	0	0	0
CARMONA	701,888	0	0
CASARICHE	132,339	0	0
CASTILBLANCO DE LOS ARROYOS	143,049	0	0
CAZALLA DE LA SIERRA	197,878	0	0
CONSTANTINA	131,932	0	0
COPERO	14465,476	5424553,612	2983504,486
CORIPE	48,864	0	0
CORONIL (EL)	166,585	0	0
ECIJA	1091,047	409142,7004	225028,4852
EL ARAHAL	285,039	0	0
EL CUERVO	195,455	0	0
EL RONQUILLO	52,427	0	0
EL RUBIO	122,282	0	0
ESTEPA	0	0	0
FUENTES DE ANDALUCIA	243,79	0	0
GERENA	0	0	0
GILENA	0	0	0
GUADALCANAL	114,077	0	0
HERRERA	138,183	0	0
ISLA MAYOR	180,104	0	0
LA PUEBLA DE LOS INFANTES	135,76	0	0
LA RANILLA	6079,654	2279870,356	1253928,696
LANTEJUELA	105,872	0	0
LEBRIJA	711,64	0	0
LOS ALCORES	973,204	364951,5018	200723,326
LOS PALACIOS-VILLAFRANCA	875,476	328303,6523	180567,0088
MARCHENA	559,165	0	0
MARINALEDA	0	0	0

MARTIN JARA-LOS CORRALES	0	0	0
MORON DE LA FRONTERA	926,376	347391,0739	191065,0907
OSUNA	536,545	0	0
PAJANOSAS (LAS)	42,756	0	0
PALOMARES	7449,347	2793505,237	1536427,881
PARADAS	178,353	0	0
PEDRERA	151,091	0	0
PEDROSO (EL)	91,396	0	0
PEÑAFLOR	0	0	0
PLANTA EXP. TBC CARRION	80,89	0	0
PRUNA	0	0	0
PUEBLA DE CAZALLA	351,697	0	0
PUERTO SERRANO	192,646	0	0
REAL DE LA JARA	50,9	0	0
SAN JERONIMO	6515,173	2443189,97	1343754,484
SIN EDAR BURGUILLOS	0	0	0
SIN EDAR CAÑADA ROSAL	0	0	0
SIN EDAR EL SAUCEJO	0	0	0
SIN EDAR GUILLENA	0	0	0
SIN EDAR LA LUISIANA	0	0	0
SIN EDAR LORA DEL RIO	0	0	0
SIN EDAR MONTELLANO	0	0	0
SIN EDAR PALMAR DE TROYA- GUADALEMA DE LOS QUINTERO	0	0	0
SIN EDAR RODA DE ANDALUCIA	0	0	0
SIN EDAR VILLANUEVA DEL RIO - ALCOLEA DEL RIO	0	0	0
SIN EDAR VILLANUEVA DEL RIO - TOCINA	0	0	0
SIN EDAR VILLAVERDE DEL RIO	0	0	0
TABLADA	2137,791	801671,709	440919,44
TREBUJENA	0	0	0
UTRERA	1058,716	397018,3702	218360,1036
Total	115286,786	32342055,54	17788130,55

ANEXO F. Biorresiduos en cada planta de tratamiento de residuos. Biogás en las de mayor tamaño.

Provincias	Biorresiduos (t/año)	Biogás (Nm³/año)	Metano (Nm³/año)
Cádiz	306346,9715	17972017,77	11322371,19
Alcalá de los Gazules	1156,379077	0	0
Alcalá del Valle	1168,693458	0	0
Algar	328,4797173	0	0
Algeciras	31343,1148	2673586,499	1684359,494
Algodonales	1281,187617	0	0
Arcos de la Frontera	7670,450932	0	0
Barbate	5322,998766	0	0
Barrios (Los)	6058,723675	0	0
Benalup-Casas Viejas	1615,224417	0	0
Benaocaz	161,124968	0	0
Bornos	1792,856598	0	0
Bosque (El)	511,5861395	0	0
Cádiz	27981,20166	2386813,29	1503692,373
Castellar de la Frontera	775,150094	0	0
Chiclana de la Frontera	19879,15112	1695703,518	1068293,216
Chipiona	4602,247197	0	0
Conil de la Frontera	5538,522539	0	0
Espera	909,4425991	0	0
Gastor (El)	413,4086117	0	0
Grazalema	485,9670883	0	0
Jerez de la Frontera	53705,86639	4581142,626	2886119,855
Jimena de la Frontera	1705,477648	0	0
Línea de la Concepción (La)	16322,01107	1392277,337	877134,7225
Medina-Sidonia	2738,622279	0	0
Olvera	1906,645946	0	0
Paterna de Rivera	1237,865805	0	0
Prado del Rey	1339,012317	0	0
Puerto de Santa María (El)	22795,71886	1944488,497	1225027,753
Puerto Real	10001,91858	0	0
Puerto Serrano	1606,555208	0	0
Rota	7859,528897	0	0
San Fernando	22766,72115	1942014,974	1223469,434
San José del Valle	985,4825352	0	0

San Martín del Tesorillo	696,6804392	0	0
San Roque	8057,224392	0	0
Sanlúcar de Barrameda	15896,61769	1355991,027	854274,3468
Setenil de las Bodegas	632,998207	0	0
Tarifa	4863,416647	0	0
Torre Alháquime	191,2711899	0	0
Trebujena	1686,288695	0	0
Ubrique	4068,960858	0	0
Vejer de la Frontera	2947,4193	0	0
Villaluenga del Rosario	108,3978241	0	0
Villamartín	2880,02031	0	0
Zahara	350,3381624	0	0
Córdoba	208472,4487	7900678,049	4977427,171
Adamuz	997,6672789	0	0
Aguilar de la Frontera	3206,132729	0	0
Alcaracejos	638,9130348	0	0
Almedinilla	591,8429447	0	0
Almodóvar del Río	1905,647281	0	0
Añora	473,9760448	0	0
Baena	4893,459422	0	0
Belalcázar	808,4897187	0	0
Belmez	724,0760064	0	0
Benamejé	1273,658486	0	0
Blázquez (Los)	164,1192906	0	0
Bujalance	1823,013829	0	0
Cabra	4850,123948	0	0
Cañete de las Torres	1019,812277	0	0
Carcabuey	590,1809848	0	0
Cardeña	366,058755	0	0
Carlota (La)	3547,336925	0	0
Carpio (El)	1086,781367	0	0
Castro del Río	1960,272453	0	0
Conquista	94,21236095	0	0
Córdoba	92621,59995	7900678,049	4977427,171
Doña Mencía	1172,422619	0	0
Dos Torres	600,5558187	0	0
Encinas Reales	594,5814554	0	0
Espejo	830,0711577	0	0

Espiel	594,7304705	0	0
Fernán - Núñez	2415,174287	0	0
Fuente - Tójar	169,6469009	0	0
Fuente Carreteros	291,6208812	0	0
Fuente la Lancha	84,73568695	0	0
Fuente Obejuna	1124,74666	0	0
Fuente Palmera	2434,555606	0	0
Granjuela (La)	111,0652731	0	0
Guadalcázar	386,9302896	0	0
Guijarrosa (La)	340,7975796	0	0
Guijo (El)	86,89758862	0	0
Hinojosa del Duque	1688,724537	0	0
Hornachuelos	1105,836966	0	0
Iznájar	1047,793168	0	0
Lucena	11061,08183	0	0
Luque	783,4166856	0	0
Montalbán de Córdoba	1124,327964	0	0
Montemayor	969,7213421	0	0
Montilla	6036,108207	0	0
Montoro	2308,235678	0	0
Monturque	488,5692136	0	0
Moriles	952,8843663	0	0
Nueva Carteya	1330,200899	0	0
Obejo	510,9971544	0	0
Palenciana	372,344894	0	0
Palma del Río	5253,217835	0	0
Pedro Abad	832,4057688	0	0
Pedroche	396,9499568	0	0
Peñarroya-Pueblonuevo	2491,125479	0	0
Posadas	1845,215009	0	0
Pozoblanco	4554,921425	0	0
Priego de Córdoba	5672,928415	0	0
Puente Genil	7575,147126	0	0
Rambla (La)	1910,656304	0	0
Rute	2580,587378	0	0
San Sebastián de los Ballesteros	203,5908439	0	0
Santa Eufemia	185,7355137	0	0

Santaella	1172,489148	0	0
Torrecampo	268,3099632	0	0
Valenzuela	278,6200762	0	0
Valsequillo	86,86502795	0	0
Victoria (La)	571,8782612	0	0
Villa del Río	1780,125837	0	0
Villafranca de Córdoba	1239,996029	0	0
Villaharta	156,5764334	0	0
Villanueva de Córdoba	2282,922674	0	0
Villanueva del Duque	363,5590411	0	0
Villanueva del Rey	252,622979	0	0
Villaralto	283,0871662	0	0
Villaviciosa de Córdoba	795,3997629	0	0
Viso (El)	621,9362692	0	0
Zuheros	159,4286757	0	0
Huelva	122949,1204	2955138,443	1861737,219
Alájar	189,4143325	0	0
Aljaraque	5281,637353	0	0
Almendro (El)	62,99837467	0	0
Almonaster la Real	439,0879544	0	0
Almonte	6177,549552	0	0
Alosno	288,6665601	0	0
Aracena	2032,162373	0	0
Aroche	736,2895527	0	0
Arroyomolinos de León	217,3605979	0	0
Ayamonte	5237,76223	0	0
Beas	1051,232871	0	0
Berrocal	76,13822438	0	0
Bollullos Par del Condado	3486,874873	0	0
Bonares	1473,112573	0	0
Cabezas Rubias	48,18473665	0	0
Cala	279,2548647	0	0
Calañas	186,4739112	0	0
Campillo (El)	500,6859589	0	0
Campofrío	190,8295264	0	0
Cañaverl de León	101,9180756	0	0
Cartaya	4888,471696	0	0
Castaño del Robledo	58,44282889	0	0

Cerro de Andévalo (El)	174,1742781	0	0
Chucena	541,9640477	0	0
Corteconcepción	126,9532085	0	0
Cortegana	1095,77387	0	0
Cortelazor	74,61346917	0	0
Cumbres de Enmedio	12,38198605	0	0
Cumbres de San Bartolomé	91,01941029	0	0
Cumbres Mayores	425,9000456	0	0
Encinasola	323,0049558	0	0
Escacena del Campo	554,6192112	0	0
Fuenteheridos	176,1106175	0	0
Galaroza	337,3026694	0	0
Gibraleón	3002,91026	0	0
Granada de Río-Tinto (La)	59,10995495	0	0
Granado (El)	39,26723939	0	0
Higuera de la Sierra	316,8325512	0	0
Hinojales	79,78729656	0	0
Hinojos	977,8598933	0	0
Huelva	34643,81779	2955138,443	1861737,219
Isla Cristina	5265,566192	0	0
Jabugo	549,7399197	0	0
Lepe	6662,349304	0	0
Linares de la Sierra	64,9050829	0	0
Lucena del Puerto	787,0076139	0	0
Manzanilla	514,6412036	0	0
Marines (Los)	99,32194149	0	0
Minas de Riotinto	925,3120923	0	0
Moguer	5200,704531	0	0
Nava (La)	64,05403633	0	0
Nerva	1253,144354	0	0
Niebla	997,7086488	0	0
Palma del Condado (La)	2646,769757	0	0
Palos de la Frontera	2767,8653	0	0
Paterna del Campo	843,8843129	0	0
Paymogo	87,31873418	0	0
Puebla de Guzmán	228,7827928	0	0
Puerto Moral	68,16871471	0	0
Punta Umbría	3827,059816	0	0

Rociana del Condado	1920,347748	0	0
Rosal de la Frontera	417,0436095	0	0
San Bartolomé de la Torre	282,6391487	0	0
San Juan del Puerto	2237,360968	0	0
San Silvestre de Guzmán	153,4214139	0	0
Sanlúcar de Guediana	32,47683269	0	0
Santa Ana la Real	116,8690721	0	0
Santa Bárbara de Casa	78,85909343	0	0
Santa Olalla del Cala	491,1393753	0	0
Trigueros	1907,255196	0	0
Valdelarco	56,59956431	0	0
Valverde del Camino	3013,676313	0	0
Villablanca	705,6546261	0	0
Villalba del Alcor	815,5447925	0	0
Villanueva de las Cruces	28,45203748	0	0
Villanueva de los Castillejos	212,8102726	0	0
Villarrasa	534,0416831	0	0
Zalamea la Real	745,1860016	0	0
Zarza-Perrunal, La	93,25826879	0	0
Zufre	194,2282248	0	0
Sevilla	367651,9406	13252556,26	8349110,445
Aguadulce	373,0280613	0	0
Alanís	352,4468106	0	0
Albaida del Aljarafe	580,2332803	0	0
Alcalá de Guadaíra	13880,20856	0	0
Alcalá del Río	2567,471633	0	0
Alcolea del Río	700,1475636	0	0
Algaba (La)	3369,907491	0	0
Algámitas	222,5740078	0	0
Almadén de la Plata	275,2780432	0	0
Almensilla	1118,897149	0	0
Arahal	3566,26899	0	0
Aznalcázar	831,6677068	0	0
Aznalcóllar	1102,717776	0	0
Badolatosa	549,130102	0	0
Benacazón	1309,240128	0	0
Bollullos de la Mitación	1980,791572	0	0
Bormujos	4037,996934	0	0

Brenes	2545,775087	0	0
Burguillos	1408,042387	0	0
Cabezas de San Juan (Las)	2913,343777	0	0
Camas	5615,368774	0	0
Campana (La)	1088,960998	0	0
Cantillana	2174,31832	0	0
Cañada Rosal	629,8224556	0	0
Carmona	5285,561085	0	0
Carrión de los Céspedes	464,2917089	0	0
Casariche	966,4582316	0	0
Castilblanco de los Arroyos	1018,316668	0	0
Castilleja de Guzmán	513,4864403	0	0
Castilleja de la Cuesta	3642,947288	0	0
Castilleja del Campo	116,6054516	0	0
Castillo de las Guardas (El)	303,3290446	0	0
Cazalla de la Sierra	979,6677395	0	0
Constantina	1212,559335	0	0
Coria del Río	5609,492498	0	0
Coripe	238,241954	0	0
Coronil (El)	905,427449	0	0
Corrales (Los)	699,8277285	0	0
Cuervo de Sevilla (El)	1573,463812	0	0
Dos Hermanas	25165,83378	2146660,721	1352396,254
Écija	7163,658606	0	0
Espartinas	2880,857318	0	0
Estepa	2228,105652	0	0
Fuentes de Andalucía	1296,729376	0	0
Garrobo (El)	159,2998022	0	0
Gelves	1847,664998	0	0
Gerena	1596,808919	0	0
Gilena	675,1772251	0	0
Gines	2495,851522	0	0
Guadalcanal	543,5743984	0	0
Guillena	2666,133357	0	0
Herrera	1150,949022	0	0
Huévar del Aljarafe	557,3784587	0	0
Isla Mayor	1061,959413	0	0
Lantejuela (La)	710,3109446	0	0

Lebrija	5411,474736	0	0
Lora de Estepa	161,7049522	0	0
Lora del Río	3801,373703	0	0
Luisiana (La)	820,3894234	0	0
Madroño (El)	62,50058082	0	0
Mairena del Alcor	4324,208304	0	0
Mairena del Aljarafe	8436,879373	0	0
Marchena	3536,463973	0	0
Marinaleda	459,6416704	0	0
Martín de la Jara	478,7378941	0	0
Molares (Los)	647,7826438	0	0
Montellano	1290,533195	0	0
Morón de la Frontera	5175,728115	0	0
Navas de la Concepción (Las)	320,3009321	0	0
Olivares	1715,575441	0	0
Osuna	3183,889735	0	0
Palacios y Villafranca (Los)	6975,051314	0	0
Palmar de Troya, El	414,0955285	0	0
Palomares del Río	1602,623642	0	0
Paradas	1267,316944	0	0
Pedrera	902,8799554	0	0
Pedroso (El)	441,751935	0	0
Peñaflor	738,9155354	0	0
Pilas	2529,21715	0	0
Pruna	458,8424414	0	0
Puebla de Cazalla (La)	2025,542859	0	0
Puebla de los Infantes (La)	619,3911171	0	0
Puebla del Río (La)	2167,914291	0	0
Real de la Jara (El)	313,7696128	0	0
Rinconada (La)	8094,664108	0	0
Roda de Andalucía (La)	737,7733767	0	0
Ronquillo (El)	289,945623	0	0
Rubio (El)	593,0579349	0	0
Salteras	1008,434712	0	0
San Juan de Aznalfarache	4510,650499	0	0
San Nicolás del Puerto	124,4174395	0	0
Sanlúcar la Mayor	2532,365283	0	0
Santiponce	1547,779862	0	0

Saucejo (El)	753,7146294	0	0
Sevilla	130197,1562	11105895,54	6996714,191
Tocina	1962,340756	0	0
Tomares	5356,165599	0	0
Umbrete	1630,938449	0	0
Utrera	9378,77099	0	0
Valencina de la Concepción	1409,452301	0	0
Villamanrique de la Condesa	811,4689913	0	0
Villanueva de San Juan	191,7878908	0	0
Villanueva del Ariscal	1194,857344	0	0
Villanueva del Río y Minas	971,8633414	0	0
Villaverde del Río	1608,570019	0	0
Viso del Alcor (El)	3537,661418	0	0
Total	1005420,481	42080390,52	26510646,03

ANEXO G. Codigestión.

	FLodos (t/año)	Biorresiduos (t/año)	Biogás (Nm³/año)	Metano (Nm³/año)
Cádiz	24284,127	6071,03175	36426191,15	27319643,36
ALGECIRAS	3551,645	887,91125	5327467,35	3995600,513
CADIZ-SAN FERNANDO	4552,07	1138,0175	6828105,17	5121078,877
CHICLANA	1480,695	370,17375	2221042,922	1665782,192
CHIPIONA	821,93	205,4825	1232894,739	924671,0541
GUADALETE	5597,878	1399,4695	8396816,37	6297612,278
LA BARROSA	610,797	152,69925	916196,2389	687147,1792
LA LINEA DE LA CONCEPCION	2247,083	561,77075	3370624,883	2527968,662
LAS GALERAS	2610,325	652,58125	3915486,786	2936615,09
ROTA	1427,23	356,8075	2140845,212	1605633,909
SANLUCAR DE BARRAMEDA	1384,474	346,1185	2076711,475	1557533,606
Córdoba	10587,157	2646,78925	15880734,81	11910551,11
LA GOLONDRINA	10587,157	2646,78925	15880734,81	11910551,11
Huelva	9319,18	2329,795	13978772,5	10484079,37
AYAMONTE	501,831	125,45775	752746,8299	564560,1224
HUELVA	4882,837	1220,70925	7324255,973	5493191,98
ISLA CRISTINA	671,877	167,96925	1007815,863	755861,8971
LA ANTILLA	1164,424	291,106	1746636,51	1309977,382
MATALASCAÑAS	524,756	131,189	787134,7287	590351,0465
MAZAGON	462,659	115,66475	693988,1111	520491,0833
PUNTA UMBRIA	1110,796	277,699	1666194,48	1249645,86
Sevilla	42055,014	10513,7535	63082523,7	47311892,77
ALJARAFE GUADIAMAR (AZNA)	482,754	120,6885	724130,9674	543098,2255
COPERO	14465,476	3616,369	21698214,45	16273660,83
ECIJA	1091,047	272,76175	1636570,802	1227428,101

LA RANILLA	6079,654	1519,9135	9119481,423	6839611,068
LOS ALCORES	973,204	243,301	1459806,007	1094854,505
LOS PALACIOS-VILAFRANCA	875,476	218,869	1313214,609	984910,9568
MORON DE LA FRONTERA	926,376	231,594	1389564,296	1042173,222
PALOMARES	7449,347	1862,33675	11174020,95	8380515,712
SAN JERONIMO	6515,173	1628,79325	9772759,882	7329569,911
TABLADA	2137,791	534,44775	3206686,836	2405015,127
UTRERA	1058,716	264,679	1588073,481	1191055,111
Total	86245,478	21561,3695	129368222,1	97026166,61

REFERENCIAS

- [1] sedigas, ‘Estudio de la capacidad de producción de biometano en España, 2023’. Accessed: Sep. 20, 2023. [Online]. Available: <https://estudio-biometano.sedigas.es/wp-content/uploads/2023/03/sedigas-informe-potencial-biometano-2023.pdf>
- [2] MITECO, ‘Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera. Emisiones de gases de efecto invernadero, 1990-2021’, 2023, Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen_inventario_gei_ed_2023_tcm30-560383.pdf
- [3] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, ‘A comparative overview of hydrogen production processes’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597–611, 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.044.
- [4] Genia Bioenergy, ‘Hidrógeno’. Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://geniabioenergy.com/hidrogeno/>
- [5] Gobierno de España. MITERD, ‘Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el Hidrógeno Renovable’, 2020, Accessed: Jun. 08, 2023. [Online]. Available: https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf
- [6] Consejo Europeo, ‘Pacto Verde Europeo - Consilium’. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/#what>
- [7] European Commission, ‘European Clean Hydrogen Alliance’. Accessed: Jun. 01, 2024. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en
- [8] European Comission, ‘A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe (COM/2020/301)’. Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [9] Proyecto de investigación. Universidad de Sevilla, ‘Refinerías como Incubadoras de Tecnologías de Hidrógeno Verde’. Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: https://investigacion.us.es/sisius/sis_proyecto.php?idproy=33875
- [10] L. Yagüe, J. I. Linares, E. Arenas, and J. C. Romero, ‘Levelized Cost of Biohydrogen from Steam Reforming of Biomethane with Carbon Capture and Storage (Golden Hydrogen)—Application to Spain’, *Energies 2024, Vol. 17, Page 1134*, vol. 17, no. 5, p. 1134, 2024, doi: 10.3390/EN17051134.
- [11] C. Bento, T. F. Lopes, P. Rodrigues, F. Gírio, and C. Silva, ‘Biogas reforming as a sustainable solution for hydrogen production: Comparative environmental metrics with steam-methane reforming and water electrolysis in the Portuguese context’, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 66, pp. 661–675, 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.04.113.
- [12] El Parlamento Europeo y el Consejo, ‘Directiva - 2008/98 - EN - EUR-Lex’. Accessed: Jun. 01, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:32008L0098>
- [13] PRIMAGAS, ‘Biocombustibles: qué son, tipos, ventajas y desventajas’. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.primagas.es/blog/biocombustibles>
- [14] CEPSA, ‘Biocombustibles para acelerar la descarbonización’. Accessed: Apr. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.cepsa.com/es/negocios/commercial-clean-energies/biocombustibles>
- [15] Gobierno de España. MITECO, ‘Lodos de depuración de aguas residuales’. Accessed: Nov. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujo/lodos-depuradora.html>
- [16] Jefatura del Estado, ‘Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía

- circular’, BOE-A-2022-5809. Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-5809-consolidado.pdf>
- [17] Gobierno de España. MAGRAMA, ‘Gestión de biorresiduos de competencia municipal’. Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/GUIA_MO_DEF_tcm30-185554.pdf
- [18] Junta de Andalucía. CAGPDS, ‘PIRec 2030. Plan Integral de Residuos de Andalucía.’ Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/26992373/2021_10_19_PIR ec_completo5.pdf/6c1a646a-c293-79ca-c201-a913386b86ce
- [19] Gobierno de España. MITERD, ‘Hoja de ruta del biogás’, 2022, Accessed: Dec. 01, 2023. [Online]. Available: https://energia.gob.es/es-es/Novidades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf
- [20] Gobierno de España. MITECO, ‘Biorresiduos’. Accessed: Nov. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/biorresiduos/biorresiduos-que-caracteristicas-tienen.html>
- [21] INE, ‘Destino de los lodos generados por comunidades y ciudades autónomas, tipo de destino y periodo’. Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/10/&file=01008.px&L=0>
- [22] MITECO, ‘Memoria anual de Generación y Gestión de residuos. Residuos de competencia municipal. 2020’, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/memoriaanualdegeneracionygestionderesiduosresiduosdecompetenciamunicipal2020_tcm30-550100.pdf
- [23] Gobierno de España. IDAE, ‘Biomasa: Digestores anaerobios’, 2007, Accessed: Dec. 05, 2023. [Online]. Available: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf
- [24] María Estela Montes Carmona, ‘Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis Doctoral.’, 2008. Accessed: Dec. 01, 2023. [Online]. Available: https://oa.upm.es/1049/1/MARIA_ESTELA_MONTES_CARMONA.pdf
- [25] IDAE, ‘Biogás’. Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>
- [26] Lastra Bravo Tania Elizabeth, ‘Caracterización experimental de la fracción orgánica triturada de los RSU para valorar su incorporación al agua residual y tratamiento de una EDAR’, 2013.
- [27] BGas Tech, ‘Tratamiento del biogás en EDAR’. Accessed: Nov. 30, 2023. [Online]. Available: <https://bgastech.com/tratamiento-del-biogas-en-edar/>
- [28] Agencia Andaluza de la Energía, ‘INFORME DE INFRAESTRUCTURAS ENERGÉTICAS. ANDALUCÍA’, 2023, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/Documentos/Infraestructuras/20231231%20Informe_ANDALUZ_MIEA.pdf
- [29] AGR BIOGAS, ‘Iniciamos la construcción de la primera planta de inyección de biometano en Andalucía’. Accessed: Jun. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.agrbioegas.es/2024/04/29/iniciamos-la-construccion-de-la-planta-de-la-primera-planta-de-inyeccion-de-biometano-en-andalucia/>
- [30] Gobierno de España, ‘Península Ibérica, Islas Baleares, Islas Canarias, Ceuta y Melilla-EPDG:4258’. Accessed: Mar. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.mapama.gob.es/ide/metadatos/srv/spa/catalog.search#/metadata/04195683-9bc4-4a6e-be78-f899e484e2e7>
- [31] Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, ‘DERA-13_35_LimiteAdministrativo’. Accessed:

- Sep. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/g13.htm>
- [32] Gobierno de España. MITERD, ‘Depuradoras de aguas residuales (Q2021. Dir 91/271/CEE)’. Accessed: Jun. 10, 2024. [Online]. Available: https://sig.mapama.gob.es/Docs/PDFServicios/EDAR_Q2021.pdf
- [33] INE, ‘Recogida y tratamiento de las aguas residuales por comunidades y ciudades autónomas, tipo de indicador y periodo.’ Accessed: Jun. 26, 2023. [Online]. Available: <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/10/&file=01005.px&L=0>
- [34] IDAE, ‘Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico PER 2011-2020’. Accessed: Dec. 01, 2023. [Online]. Available: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf
- [35] Junta de Andalucía. Descargas REDIAM. CICA, ‘03_Gestion_de_residuos_municipales_por_municipio_2020’. Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: https://portalrediam.cica.es/descargas?path=%2F16_INDICADORES_ESTADISTICAS%2F01_IMA%2FIMA_edicion_2022%2FEstadisticas_indicadores%2F10_Economia_circular%2F10.01_Residuos_municipales
- [36] Junta de Andalucía. Descargas REDIAM. CICA, ‘02_Recogida_de_municipales_en_Andalucia_por_tipologia_2020’. Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: https://portalrediam.cica.es/descargas?path=%2F16_INDICADORES_ESTADISTICAS%2F01_IMA%2FIMA_edicion_2022%2FEstadisticas_indicadores%2F10_Economia_circular%2F10.01_Residuos_municipales
- [37] Parra-Orobio B. A *et al.*, ‘Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal’, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. XVI, no. 4, pp. 515–526, 2015, doi: 10.1016/J.RIIT.2015.09.004.
- [38] Nicola Asaro, ‘Comparative Life Cycle Assessment of Hydrogen production by Steam Reforming of Natural gas, Landfill gas and Biomethane’.
- [39] V. Soler, J. I. Linares, E. Arenas, and J. C. Romero, ‘Hydrogen from municipal solid waste as a tool to compensate unavoidable GHG emissions. 12CNIT 2022’, Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/66977/CNIT_11_Hydrogen_from_municipal_rev1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [40] Asociación Española del Hidrógeno. Aeh2, ‘¿Cómo funciona el Hidrógeno como fuente de energía?’ Accessed: Jun. 27, 2024. [Online]. Available: <https://aeh2.org/hidrogeno/>
- [41] Agencia Andaluza de la Energía, ‘Info-Energía. Estado de las instalaciones de generación renovable por tecnologías.’ Accessed: Jul. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/info-web/principalController#>