

EL ROL DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA EN LA AGROINDUSTRIA RIOJANA EN EL MARCO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

PEDRO MUÑOZ^{1*}, CARLOS GONZÁLEZ-MENORCA¹,
REBECA SÁNCHEZ-VÁZQUEZ¹, NURIA CANDELA (†)

RESUMEN

El sector agroalimentario está en constante evolución y actualmente enfrenta retos derivados de la necesidad de hacer de la sostenibilidad, un sello reconocible de su gestión productiva. Así, la adecuada gestión de residuos y vertidos ha cobrado gran relevancia desde el punto de vista legislativo, pero también desde el punto de vista operativo y de mercado. Este artículo evalúa la potencialidad de los residuos orgánicos producidos por esta industria, como fuente de generación de biocombustible (i.e. biometano). Para ello, se han recabado datos primarios y tomado muestras in situ para su análisis. En una primera aproximación que deberá actualizarse y mejorarse, se ha estimado que la región tiene un potencial de generación de energía primaria de hasta 200 GWh anuales, que supondrían una importante contribución a la independencia energética de la región, el cuidado del medio ambiente y la generación de valor añadido para empresas y localidades rurales.

Palabras clave: *Biometano, Agroalimentaria, Residuos, La Rioja, Potencial.*

The agri-food sector is permanently evolving and nowadays is facing important challenges derived from sustainability policies and market requirements. Hence, the proper management of residues and effluents has become a key factor not only due to the laws in force, but also because of view of operation efficiency and market requirements, as well. Thus, this paper assesses the potential use of the organic waste generated by agroindustry, in La Rioja, as a source of biofuel generation. For such purpose, primary data have been directly collected from factories and the stream wastes have been sampled and characterized. Despite this study must be further developed, until now, collected data leads to theoretically estimate that the region might

1. Universidad Internacional de La Rioja, Av. de la Paz, 137, 26006 Logroño, La Rioja.

* Corresponding author: pedro.munoz@unir.net

produce up to 200 GWh per year. This value poses an important contribution to the region's energy independence, the improvement of the environmental footprint and the generation of added value for companies and rural localities.

Keywords: Biomethane, food, Waste, La Rioja, Potential.

1. INTRODUCCIÓN

La valorización y el reciclaje de residuos y subproductos de la industria alimentaria (RSIA) suponen un reto cada vez más urgente a nivel mundial (Federici et al., 2009; Murthy and Naidu, 2012; Ahmed et al., 2019). Los subproductos, desechos y efluentes del procesamiento de los alimentos están compuestos principalmente de proteínas, azúcares y lípidos junto con otro tipo de compuestos como aromáticos y alifáticos. A partir de esta composición, en los últimos años, los investigadores han visto la oportunidad de emplear estos flujos de RSIA como una fuente de materias primas, baratas y abundantes, para la síntesis de energía, productos químicos y/o biomateriales de alto valor añadido (Chandrasekhar, 2020).

A pesar de que los RSIA pueden desempeñar, por lo anterior, un papel fundamental en una economía cada vez más tendente al modelo circular, en muchos países, todavía son considerados un problema en lugar de un recurso (Malinauskaitė et al., 2017; Scarlat et al., 2019).

En particular, bajo una coyuntura internacional de fuertes presiones para la disminución de la dependencia de fuentes de energía fósil, la Comisión Europea afirma que la economía circular mediante el empleo de residuos para la obtención de energía (i.e. Waste-to-Energy, WtE) puede favorecer la contribución de las empresas a la descarbonización, en línea con la Estrategia de la Unión Europea y el acuerdo de París (European Commission, 2017).

Egea et al. (2018) describen los esfuerzos e iniciativas actuales para acoplar el complejo agroindustrial existente en Almería (España) con el de un modelo de bioeconomía totalmente sostenible, incluyendo en los procesos el concepto de biorrefinería a partir de los residuos obtenidos. En su estudio consideran que la reducción de residuos y la valorización de la biomasa son las principales carencias en el clúster agroindustrial de la horticultura en la región de Almería.

Los subproductos orgánicos del sector agroalimentario presentan un elevado potencial para producir energía a través de la degradación anaeróbica de la materia orgánica, debido a sus características: elevado contenido de humedad (i.e. entre el 72 y el 85,2 %), alta concentración de sustrato (i.e. demanda química de oxígeno entre 19,3 y 346 g/L; contenido de carbohidratos entre 25,5 y 143 g/L) y una elevada relación carbono/nitrógeno (C: N) (i.e. entre 9 y 21) (Yasin et al., 2013).

En esta ruta del WtE, existen varias alternativas para la transformación de la materia orgánica en energía que se agrupan en dos grandes familias: tecnologías termoquímicas y bioquímicas (Qi et al., 2022).

En general, las plantas de digestión proporcionan un plan financiero más atractivo, aunque de menor capacidad instalada. Es por ello que los criterios de viabilidad suelen decantarse por esta tecnología para zonas con una baja intensidad de generación, mientras que las plantas termoquímicas son las preferidas para zonas de alta densidad de producción (Hadidi et al., 2017). Por esta razón, en la comunidad de La Rioja, las tecnologías basadas en la acción microbiana pueden suponer una mayor contribución tanto para la gestión de residuos como para la descentralización y diversificación de la matriz energética.

Estos procesos se basan en un consorcio de microorganismos que, tras sucesivas etapas, transforman la materia orgánica en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Figura 1).

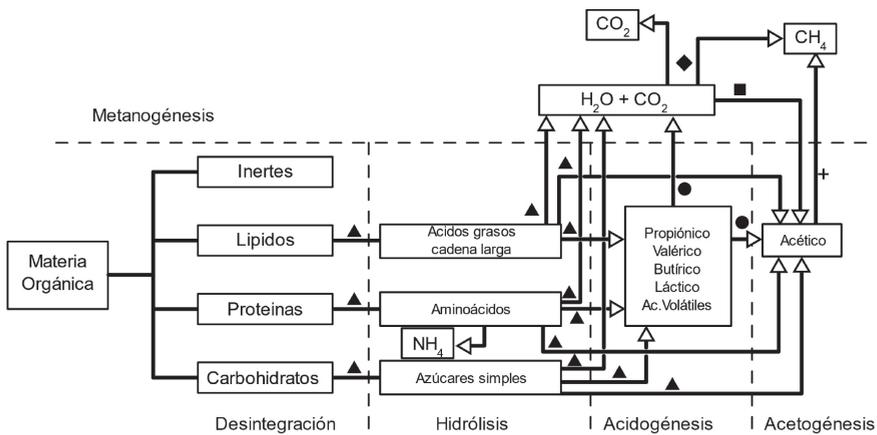


Figura 1. Procesos y familias de bacterias involucradas en la transformación de la materia orgánica en metano (▲) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas, (●) Bacterias acetogénicas, (■) Bacterias homoacetogénicas, (◆) Bacterias metanogénicas-hidrogenófilas y (+) Bacterias metanogénicas-acetoclásticas.

Sin embargo, aunque se hable de fases diferentes, la realidad del proceso es que la actividad de cada grupo de bacterias resulta influyente en el resto de los grupos, configurándose un ecosistema microbiano. Así pues, la fragmentación de los compuestos de cadena larga a cargo de las hidrolíticas acidogénicas permite la reacción de acetogénesis. De ahí, el acetato, el H_2 y el CO_2 posibilitan la metanogénesis que es la encargada de retirar el hidrógeno molecular del medio, de manera que no se inhiba la reacción de la acetogénesis (Mühl et al., 2022).

Por lo anterior, se deduce que las características fisicoquímicas de cada subproducto agroalimentario son importantes en el diseño y operación de

las diferentes rutas para la producción de biometano. El rendimiento específico de cada sistema dependerá de diferentes parámetros operativos como el pre-tratamiento de la materia (e.g. tamaño de partículas, contenido de fibras) o las condiciones de la reacción (e.g. temperatura, pH, cantidad de carga orgánica, etc.). No obstante, para el cálculo teórico de la cantidad de energía disponible por residuo, se suelen emplear diferentes aproximaciones teóricas que han dado buen resultado empírico (Pramanik, 2022).

2. METODOLOGÍA

2.1. Inventario de empresas y residuos

La metodología aplicada se ha basado en la recogida de información de fuentes primarias (i.e. las propias empresas), la recogida y análisis de muestras y la estimación, a partir de estos parámetros de la producción potencial de biometano. Del universo de empresas riojanas existentes se ha llevado a cabo una clasificación según actividades y, sobre estas categorías, se ha procedido al contacto con empresas líderes de cada subcategoría. Para ello se realizó un inventario de las empresas sitas en la Comunidad Autónoma de La Rioja (CAR) mediante la consulta de la base de datos SABI. Dentro de los diferentes sectores económicos participantes en la cadena agroalimentaria, se han considerado sólo aquellos cuya actividad productiva está relacionada con la elaboración y procesado de materias vegetales o animales. Es decir, se han excluido aquellas explotaciones cuyo proceso consiste en el mero envasado o etiquetado de productos, habida cuenta de que no generan flujos de residuos de relevancia. Igualmente, los sectores del transporte o de la fabricación de envases o útiles para las industrias transformadoras, tampoco han sido considerados.

Siguiendo el informe de la industria alimentaria, realizado la década pasada, se han empleado dos grandes grupos de clasificación: residuos de origen animal y residuos de origen vegetal. A su vez los restos de origen animal se han subdividido en residuos derivados de la industria del pescado, la carne y los productos lácteos. Por su parte, los residuos vegetales consideran el procesado de frutas y verduras, los productos oleicos y la industria de las bebidas (e.g. vino, cervezas, zumos, etc.). Según este informe, en la década pasada estos sectores tenían el peso relativo, en términos de generación de residuos, que se observa en la figura 2.

El estudio de la población, de cada sector identificado, se realizó a través de la caracterización de las muestras seleccionadas para dicho sector. Así, con la información del subconjunto de individuos se infirió la característica de toda la población correspondiente (Figura 3).

Para cada sector, se ordenaron las empresas y se seleccionó una muestra aleatoria simple como inicio del método. En caso de que las empresas seleccionadas aleatoriamente se negaran a participar se volvió a obtener de forma aleatoria una muestra, eliminando de los individuos aquellas cuya negativa se constató.

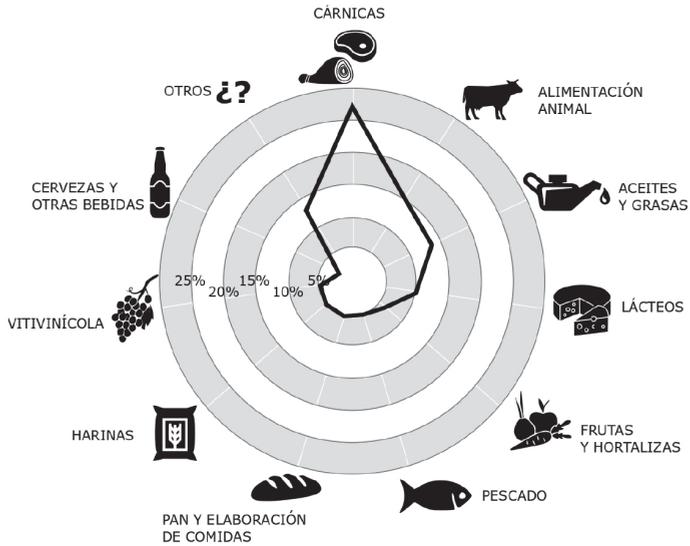


Figura 2. Clasificación de fuentes de generación de residuos según informe de la industria alimentaria 2010-2011.

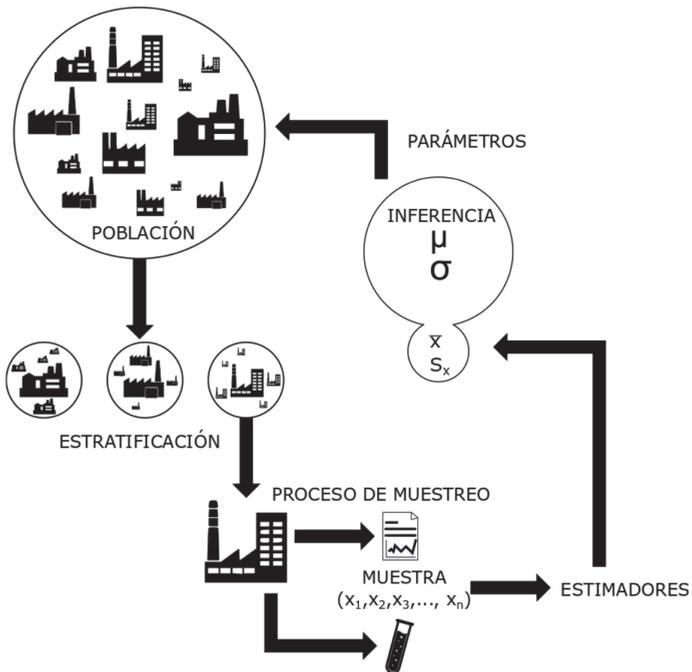


Figura 3. Esquema de la metodología estadística para la determinación del potencial global. (Fuente: Elaboración propia)

Así, con el proceso de muestreo completo, se obtuvo un resultado expresado en m^3 o toneladas que se intensificó dividiéndolo por la facturación de cada empresa (i.e. $\text{m}^3 \text{€}^{-1}$ o $\text{Ton} \text{€}^{-1}$). Esta variable sirvió para, con los datos de facturación de las empresas riojanas de cada sector, se infiriese la cantidad de residuo disponible.

2.2. Toma de muestras de campo

El plan de muestreo se realizó en base a la norma UNE-EN 14899:2007. En primer lugar, se coordinó con cada empresa participante unas fechas de toma tal que las producciones fueran representativas. Así, se estableció un intervalo de toma de muestras teniendo en cuenta las fuentes de variabilidad temporal (i.e. cíclica y aleatoria). Por ello, se evitó tomar muestras durante los procesos de cambio de producción/producto o en aquellos casos en los que imprevistos de cualquier naturaleza afectasen a la subpoblación del residuo accesible.

Para cada caso se definió la población global (i.e. cantidad total de residuo o subproducto anual), la población (i.e. cantidad total de residuo o subproducto en la fecha de inspección) y la subpoblación (i.e. cantidad tomada de la entrada al depósito, almacén o contenedor de residuo). La subpoblación para el ensayo se conformó a partir de fracciones elementales de 200 mL -para el caso de líquidos y lodos- y 250 g para el caso de sólidos. El procedimiento de toma de muestras se basó en lo dispuesto en la norma UNE/CEN/TR 15310-2.

2.3. Análisis de muestras de campo

Con el objetivo de caracterizar la calidad de los residuos y subproductos, en términos de potencial generación energética, se ha llevado a cabo el análisis de las muestras de las diferentes empresas colaboradoras, en laboratorio.

Tabla 1. Relación de ensayos y normativa de referencia. (Fuente: Elaboración propia)

Parámetro	Norma de ensayo
Proteínas	REGLAMENTO (CE) 152/2009
Hidratos de Carbono	UV-VIS
Grasas	REGLAMENTO (CE) 152/2009
Sólidos Volátiles	Incineración 900°C
Cenizas	Incineración 550°C
Fósforo Total	UV-VIS
Nitrógeno Total Kjeldahl	UNE25663 Kjeldahl
Potasio Total	UV-VIS
Materia Orgánica Total	ISO 10694

Las muestras, como se ha comentado, se trasladaron en un tiempo máximo de 12 horas y se conservaron en el laboratorio hasta su análisis, siguiendo las recomendaciones dadas por la norma CEN/TR 15310-4:2006.

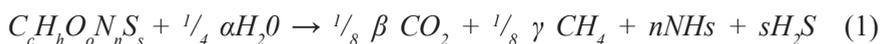
Los parámetros analizados y las normas bajo las cuales se han llevado a cabo los ensayos figuran en la tabla 2.

Además, se determinó el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre mediante norma ISO 21663:2021 y se calculó el contenido de oxígeno mediante la sustracción estos parámetros. Las muestras se prepararon conforme a lo descrito en la norma ISO 21646.

La humedad de las muestras se determinó mediante UNE-EN ISO 21660-3:2021 por el método de secado en estufa.

2.4. Determinación del potencial energético

Los datos se han estimado en base a la ecuación de Buswell (1) ampliamente utilizada para la predicción del potencial metano producible por una biomasa determinada. Esta fórmula se fundamenta en la composición química elemental de la materia orgánica del sustrato de modo que se puede resolver la siguiente reacción RedOx balanceada (1).



Donde:

$$\alpha = 4c - h - 2o + 3n + 2s \quad (2)$$

$$\beta = 4c - h + 2o + 3n + 2s \quad (3)$$

$$\gamma = 4c + h - 2o - 3n - 2s \quad (4)$$

Desde este punto de vista, la determinación del contenido de grasas i.e. $C_{16}H_{32}O_2^b$, proteínas i.e. $C_{13}H_{25}O_7(N_3S)^c$ e hidratos de carbono i.e. $(CH_2O)_n^a$ del sustrato aporta información de gran utilidad para una evaluación preliminar de su potencial. De acuerdo con estos componentes, el valor teórico de la producción de biogás y del metano contenido, pueden ser estimados según se indica en la norma VDI 4630 y se resume en la tabla 3.

Tabla 2. Factores de conversión para la determinación del potencial de generación.

Elemento	Biogás [NL kg _{sv} ⁻¹]	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]
Grasas	1390	72	28
Carbohidratos	746	50	50
Proteínas	800	60	40

Sin embargo, esta formulación no tiene en cuenta la reducción de la producción derivada de la cantidad de material no-biodegradable presente en el sustrato y del propio consumo energético de los cultivos bacterianos intervinientes. En este sentido y con objeto de reportar cantidades más ajustadas

a la realidad, se ha tenido en cuenta un coeficiente de minoración, según se indica en la norma VDI 4630 y ha sido corroborado por diferentes autores (Drosg et al., 2013). Así, para las producciones a partir de los valores de grasas y carbohidratos de origen animal se considera una producción del 85 %, mientras que el valor resultante de producción, para los mismos elementos de origen vegetal se han reducido hasta un 60%. Para el caso de las proteínas la norma VDI 4630 establece un valor del 70 % para ambos orígenes.

Una vez obtenidas las cantidades de CH₄ teóricas y, aplicados los factores de reducción en base a la parte no biodegradable, se ha considerado un potencial de 10 kWh para cada metro cúbico de metano, medido en condiciones normales (1 atm, 20 °C).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Inventario de empresas

En base al inventario de empresas existentes en La Rioja se determina que el 30 % aproximadamente está relacionado con la cadena de suministros alimentarios. Dentro de este sector, la mayor cantidad de empresas se concentran en la hostelería y la restauración (51%) seguidos por el sector vitivinícola (15 %). En cuanto a la relevancia de estos sectores, la hostelería y restauración se han excluido de este estudio ya que tienen gestión directa de los residuos y vertidos, a través de los servicios municipales.

Por su parte, atendiendo al volumen de negocio que comprometen, la clasificación del peso de los sectores varía. Así, más del 70 % del total de facturación corresponde al sector vitivinícola (i.e. 32 %), seguido por la industria cárnica (i.e. 21 %) y las conservas vegetales (i.e. 18 %). Del resto de sectores destaca la contribución, nuevamente, de la hostelería con un 21 % del restante (i.e. 6 % del total), la producción de café, la elaboración de galletas y panes y la de salsas, con un 18, 12 y 7 % respecto del restante, (sobre el total el 5, 3 y 2% respectivamente).

3.2. Potencial biometano de origen animal

En cuanto al potencial desde el sector primario, los purines inventariados (i.e. restos de cama, deyecciones y resto de alimentación) suponen una importante cantidad anual de más de 345 mil toneladas. La mayor parte de este residuo proviene de la cría y engorde de la cabaña porcina (285 mil toneladas) seguida de la estabulación bovina (33 mil toneladas) y de las aves (31 mil toneladas). Cabe hacer notar que las producciones derivadas de las explotaciones ganaderas extensivas no se han tenido en cuenta debido a la imposible recolección efectiva de las deyecciones.

En la actualidad, estos purines son recogidos por agricultores de la zona y empleados como fertilizante. A pesar de su extendida práctica y sus aparentes beneficios económicos, su impacto social y medioambiental ha alcanzado niveles de alarma. Los nutrientes contenidos en el purín contribuyen a la contaminación del agua superficial, los reservorios subterráneos y

la masa oceánica a través de los procesos de eutrofización (e.g. sólo el purín de la industria porcina representa el 26% de las emisiones de NH_3 y NH_4^+ a nivel global) (Sommer et al., 2019).

En cuanto a la calidad de estos flujos de residuos, se ha comprobado que existen diferencias importantes en relación con los valores más habituales mostrados por la literatura. Así, se destaca un mayor contenido de proteínas en los purines recogidos de la cabaña bovina y en el manejo de aves (i.e. aproximadamente 30 y 40%, respectivamente). Los valores de referencia sitúan este contenido entre el 11 y el 9 % para deyecciones bovinas y restos de camas de aves (Triolo et al., 2013). La explicación de dicho incremento se atribuye a la presencia de restos de pienso sin consumir que se mezclan con las deyecciones y los restos de camas. Esta diferencia redonda en un mayor contenido de nitrógeno que reduce el ratio C:N de referencia (i.e. 19:1 y 25:1 para aves y bovino, respectivamente) hasta valores en el entorno de 10:1. Esta relación C:N es un indicativo de la viabilidad de la digestión, en tanto las bacterias consumen aproximadamente 30 veces más carbono (i.e. empleado como fuente de energía) que nitrógeno (i.e. catalizador para producción de nuevas bacterias) por lo que la relación óptima considera un rango entre 30:1 y 20:1 (Croatto-Vega et al., 2014).

A mayores, estas explotaciones de cría de ganado suministran los animales vivos a los 3 centros registrados de matanza y sacrificio de ganado que existen en La Rioja. El flujo de residuos en estos establecimientos se puede descomponer en: grasas de depuradora, vísceras, contenido gástrico, sangre y restos de carne con y sin hueso. En total se puede estimar que existen alrededor de 212 Ton/año de grasas de la depuradora, 1900 Ton/año de vísceras, 473 Ton/año de contenido gástrico, 265 Ton/año de sangre, 4.86 mil Ton/año de carne con hueso y 2.12 mil Ton/año de carne sin hueso (tendones, etc.). Este último tipo de residuo también se produce en las fábricas de elaboración de embutido o en aquellas que realizan un ulterior procesado de esta carne. El grueso de residuos manejados por esta industria transformadora se debe fundamentalmente a los despieces de magros, huesos y grasas y un agua de vertido con importante cantidad de sales disueltas. Sin atender a este último efluente, se han cuantificado en un total de 1.42 mil Ton/año de restos de grasa y 142 Ton/año de carne magra.

En general, todos estos flujos se caracterizan por elevados contenidos de grasas y proteínas. Así, en las vísceras o los restos de carne no apta para el consumo humano encontramos porcentajes de entre el 15 % y el 30% elevándose hasta el 87 % en el caso de los restos de sangre. La grasa, al margen de los restos obtenidos de los desgrasadores de depuradoras (i.e. más del 85%) suele oscilar en entre el 40 y el 60%. Este alto contenido de grasa proporciona una buena digestibilidad si bien conlleva la formación de espumas y la posibilidad de generar concentraciones de ácidos grasos volátiles que inhiban el proceso de digestión (Otero et al., 2021).

Finalmente, según el extracto del censo de vertidos autorizados (actualización de marzo de 2020) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), los vertidos clasificados como "Industrial Piscifactoría" suponen el 68,16%

de los vertidos totales a río en la Comunidad Autónoma de La Rioja. Estas instalaciones están ubicadas en las cuencas del río Najerilla y del río Iregua.

Se pueden distinguir dos tipos de productos en el cultivo de peces de río. Por un lado, los residuos derivados de las operaciones de limpieza y descarte de los pescados. Estas operaciones generan subproductos animales no destinados para el consumo humano que suponen alrededor de 400 Toneladas al año. Por otra parte, el agua empleada para la cría de los peces, así como otros efluentes derivados del proceso son depurados generándose unos lodos que se conducen a través de un proceso de centrifugado donde se densifican hasta suponer alrededor de 450 Toneladas al año. Estos residuos se caracterizan por un elevado contenido de proteínas que varía entre el 20 y el 25% para lodos y hasta el 67% en los restos de limpieza de los peces. Para estos residuos el contenido en grasa se encuentra entre el 10 y el 15%. Este porcentaje de grasa alcanza el 70% para el agua de limpieza del viscerado de los peces. A pesar de la influencia del tipo de peces criados, la composición de su alimentación y/o la estrategia de manejo, los valores obtenidos se corresponden con los rangos publicados por otros autores (Choudhury et al., 2022). Además, las producciones teóricas de metano resultantes (i.e. 458 ml por g de sólido volátil) están en el intervalo publicado por otros autores (i.e. 300 a 500 ml por g de sólido volátil) (Kafle et al., 2013; Cadavid-Rodríguez et al., 2019).

Como resultado final, el total de metano potencialmente aprovechable de los residuos de origen animal sería de aproximadamente 190 GWh anuales, donde la mayor cantidad provendría de la cría de cerdos (aproximadamente 48%) (Figura 4).

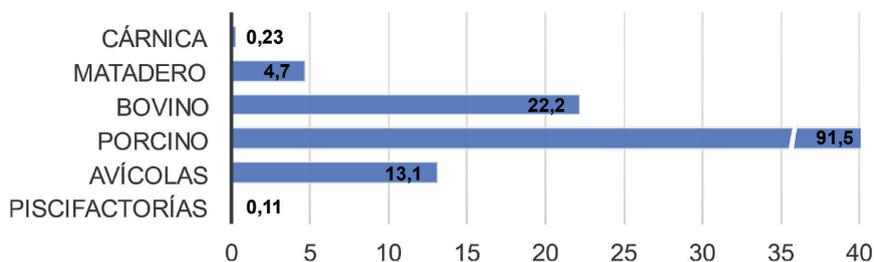


Figura 4. Potencial producción de metano de residuos de origen animal por cada subsector considerado.

3.3. Potencial biometano de origen vegetal y del procesado de comida preparada

Los flujos de residuos vegetales tienen su origen, de una parte, en los procesos de destrío, procesado y limpieza de frutas y verduras (i.e. eliminación de tallos, hojas, pieles, etc...) y, de otra parte, en los lodos generados en la depuración de las aguas de proceso. La fabricación de conservas es la actividad más extendida en la comunidad y genera la mayor parte del flujo de residuos. En total se puede estimar que existen alrededor de 745 mil

Ton/año de restos orgánicos fruto del descarte en producción, 4,9 mil Ton/año de restos de tamiz antes del sistema de depuración y 1.520 mil Ton/año de lodos de depuradora. Dentro de este sector agrícola secundario destacan por su alta intensidad las fábricas de congelados vegetales y los almacenes de fruta y verdura. La producción estimada de subproductos y residuos de la industria de la congelación de vegetales se divide en flujos de restos vegetales y lodos de los procesos de depuración. En total se puede estimar que existen alrededor de 16 mil Ton/año de restos vegetales y de 3.5 mil Ton/año de lodos de depuradora.

Por su parte, las empresas dedicadas al almacenamiento y venta de frutas y verduras suelen llevar a cabo una criba previa para garantizar la calidad que el mercado exige. Así, los productos que no cumplen con dichos estándares y no son aptos para ninguna cadena de valor (i.e. bien por su calibre o estado de conservación) se tiende a gestionar como alimentación animal. Estas empresas no procesan producto por lo que no tienen disponibles efluentes líquidos y, por tanto, carecen de sistemas de depuración. En total se puede estimar que existen alrededor de 32 mil Ton/año de diferentes tubérculos (e.g. patata, zanahoria) y frutos complejos (e.g. pera, manzana) y simples carnosos (e.g. melocotón, cereza).

Si bien los residuos sólidos son revalorizados para la alimentación animal, los lodos de depuración suponen, según las cantidades inventariadas, un importante impacto medioambiental. Los lodos se generan en las estaciones depuradoras de las que deben disponer estas empresas y que procesan efluentes con altas cantidades de sólidos en suspensión (i.e. entre 1500 y 1800 mg/L) y en ocasiones altas cargas de salmueras que proporcionan una alta conductividad. Estos lodos, si bien difieren entre productores debido a la variabilidad de las materias primas y los procesos aplicados se caracterizan, en general, por porcentajes muy bajos de grasas (i.e. inferiores al 4%) y altos contenidos en carbohidratos (i.e. hasta el 70%) con gran presencia de celulosa, lignina y otros de cadena más corta (e.g. pentosanos, hexosanos).

Esta composición suele representar un problema para la digestión anaerobia debido a que, en ausencia de cosustratos, se promueve una rápida acidificación que resulta inhibitoria de la metanogénesis. No obstante, la mezcla de diferentes sustratos (i.e. co-digestión) ha demostrado tener un efecto beneficioso, no sólo con respecto a la mejora de la continuidad de la digestión, sino también como mecanismo de maximización de la producción (Valenti et al., 2018).

Detrás de estas industrias conserveras, la elaboración del vino (i.e. actividad económica más extendida en la región y con mayor peso en el producto interior) supone la segunda mayor fuente de residuos disponible. El proceso de elaboración del vino genera diferentes tipos de residuos sólidos y vertidos líquidos que se caracterizan por su estacionalidad. Sin embargo, los residuos sólidos tienen ya establecidos canales de distribución que cuentan con barreras al cambio de tipo legislativo y que, por tanto, no permiten considerarlos (i.e. subproductos más concretamente) para procesos de generación de biogás.

En cuanto a los vertidos (i.e. aproximadamente 400.000 m³ en La Rioja) la mayor parte de los sistemas de depuración se basan en procesos aerobios provistos de filtros en los que se elimina gran parte de los hollejos, por lo que el contenido orgánico de estos efluentes es relativamente bajo. La materia orgánica remanente se almacena en balsas durante años y una vez se saturan se reciclan y espesan empleándose como abono. La producción total de este lodo alcanza las 1.800 Toneladas anuales y se emplea normalmente para el abono de terrenos agrícolas.

Estos vertidos, antes del tratamiento depurativo, según las analíticas practicadas, son susceptibles de producir hasta 250 mL de CH₄ por gramo de sólido volátil, con una relación C: N que asegura una buena operación del digestor (i.e. aproximadamente 28.3±4.1) (Rodrigues et al., 2019).

Lejos de las cantidades ofrecidas por estos subsectores, se ubica la industria del aceite. En La Rioja existen varios trujales que se concentran, principalmente en La Rioja Baja y Media. El proceso de extracción del aceite de oliva se realiza por centrifugación en todas ellas del que resultan aceite (i.e. aproximadamente 27%) y orujo (i.e. 73%) evitándose la generación del pernicioso “alpechín”. Del orujo se extraen nuevamente aceites (i.e. aproximadamente 62% del orujo) y quedan como residuos las denominadas orujillas (i.e. aproximadamente 27% del orujo) y los huesos de oliva que juntos conforman el denominado alperujo. En La Rioja se producen alrededor de 400.000 Litros de aceite que originan, de forma estacional, cerca de 380 toneladas anuales de este residuo.

En la actualidad la forma más habitual de gestionarlo consiste en su almacenamiento en grandes pilas al aire libre y su posterior aplicación directa como fertilizante. Sin embargo, los importantes valores de demanda química y biológica de oxígeno, así como las altas concentraciones de sustancias de difícil degradación (e.g. lípidos, taninos y compuestos fenólicos, entre otros) hacen que esta salida se considere nociva (Bernardi et al., 2017). De hecho, esta composición conlleva dificultades de digestión y por ello, se aconseja pretratar el residuo o mezclarlo con otros sustratos (i.e. habitualmente deyecciones ganaderas) (Mouftahi et al., 2021; Benalia et al., 2021). No obstante, existen técnicas de pretratamiento de bajo coste, como la aireación del residuo que permiten un incremento de la producción de metano de hasta 2.4 veces. Sin tener en cuenta estas técnicas, el potencial estimado en este trabajo es de aproximadamente 400 L de biometano por gramo de sólido volátil, similar al obtenido en experiencias de autores previos (Borja et al., 1995).

Por último, el sector de la comida preparada produce un sustrato óptimo para su digestión ya que en sí mismo es un mix de residuos vegetales y animales que favorece la producción de metano y la estabilidad de la digestión. En la región, la mayor producción de comida preparada está relacionada con la elaboración de productos a base de harinas (e.g. pizzas, bocadillos, emparedados, etc.). Así, se puede estimar que existen alrededor de 87 Ton/año de grasas provenientes de los sistemas de depuración, 600 Ton/año de masas de harina y 1 mil Ton/año de un mix de vegetales y derivados cárnicos. Las producciones máximas estimadas varían desde los 250 a los

450 L de CH₄ por g de sólido volátil para el caso de grasas de depuración y masas de pan y son coincidentes con los mostrados en ensayos previos (Wickham et al., 2016; Narisetty et al., 2022). No obstante, las producciones de metano en los casos en los que el residuo consta de un mix de productos permiten producciones superiores a los 600 L de CH₄ por g de sólido volátil en función de los pretratamientos (i.e. fundamentalmente el tamaño de partículas y la carga orgánica del reactor) (Okoro-Shekwaga et al., 2020).

Todo lo anterior supone, en una primera aproximación, alrededor de 57 GWh al año de metano (Figura 5).

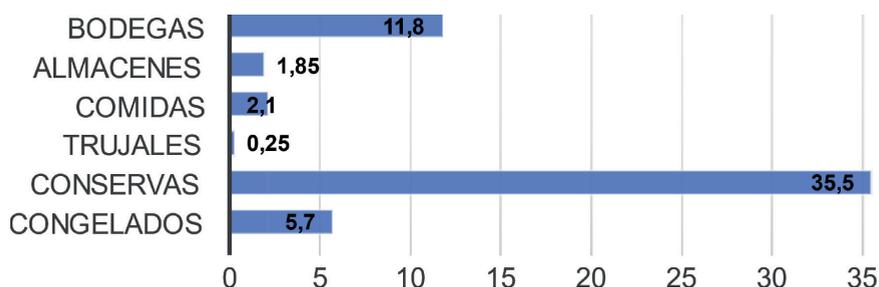


Figura 5. Potencial producción de metano de residuos de origen vegetal y de comidas preparadas por cada subsector considerado.

4. DISCUSIÓN

En La Rioja, el escenario energético está claramente marcado por una enorme dependencia de los combustibles de origen fósil. Alrededor del 85 % de las fuentes de energía primaria provienen de los derivados del petróleo (i.e. 32%) y del gas natural (i.e. 52%). Es decir, sólo un 15% de la energía tiene origen renovable (INE, 2022). En la actualidad, los derivados del petróleo y el gas natural son las fuentes de energía que permiten desplazarnos y transportar cargas a lo largo de la comunidad y también las que alimentan más del 50% de los procesos industriales o nos proporcionan, en un 50%, el confort térmico requerido en nuestros hogares. La mitad de esta energía tiene su origen en el gas natural (CORES, 2022).

Nuestra comunidad, en consonancia con su estructura económica tiene un consumo industrial relativamente bajo (alrededor del 20% del total de energía primaria consumido), protagonizado fundamentalmente por la agroindustria y su dependencia de las fuentes fósiles (i.e. superior al 50%) (Gobierno de La Rioja, 2022).

En particular, el consumo de gas natural en La Rioja se situó en 2021 en los 3.816 GWh lo que implica una tendencia ligeramente decreciente en los últimos años (Figura 6). Con relación a la generación, este recurso existe en La Rioja a partir de la explotación de gas Viura que, produce alrededor del 37% de este consumo (i.e. 1.400 GWh/año).

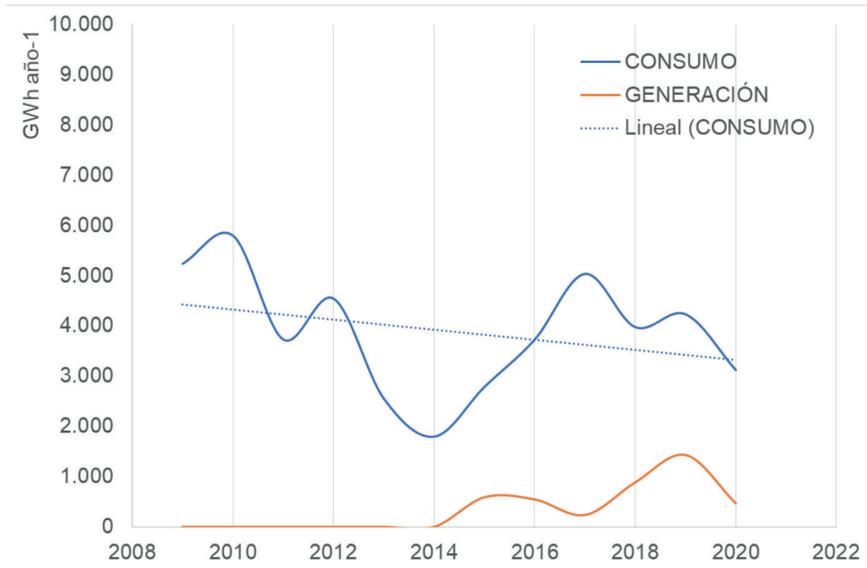


Figura 6. Evolución del consumo de gas natural en La Rioja en la última década. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CORES (2022)

El precio de este recurso es variable en función de los planes de producción, las tecnologías disponibles y la coyuntura geopolítica. No obstante, el rápido incremento de precio registrado por el mercado ibérico del gas (Mibgas) para España y Portugal hace pronosticar un periodo relativamente largo de precios al alza (Figura 7)

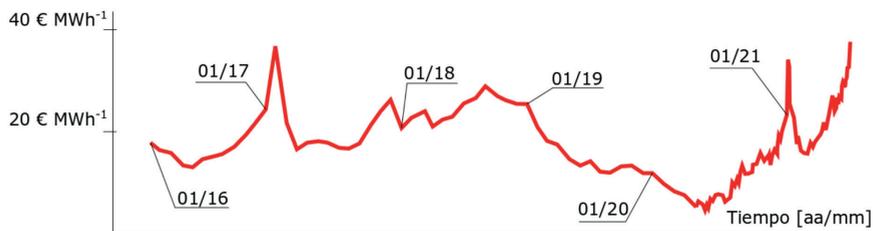


Figura 7. Evolución del precio de gas natural registrado en el MIBGAS. (Fuente: Elaboración propia a partir de datos el MIBGAS)

Con estos datos, se puede aproximar la factura regional por gas natural a unos teóricos 130 millones de euros al año.

Con este escenario, la gestión de los residuos identificados en rutas de digestión anaerobia puede contribuir de forma importante en la disminución de la dependencia externa, la factura energética y en la mejora del medioambiente.

Por sectores, las industrias conserveras generan las mayores cantidades de residuo orgánico, aunque son las explotaciones porcinas las que más potencial de generación presentan.

Cabe destacar que el sector conservero ha arrojado unos valores de dispersión muy elevados por lo que los datos de producción deben ser analizados más en detalle. Para ello, se requeriría la sub-clasificación de este sector en base a los tipos de productos tratados. De esta manera, se conseguirían disminuir los rangos de incertidumbre.

El sector del vino ha resultado ser un agente de relevancia en términos de volumen de negocio, pero debido a las restricciones legislativas relacionadas con el manejo de los residuos, las cantidades disponibles se limitan a los efluentes de los procesos cuyo contenido orgánico es relativamente bajo.

Entre todos los sectores considerados, La Rioja sería capaz de generar hasta 200 GWh al año mediante la revalorización de estos residuos. Considerando que la industria en La Rioja consume alrededor del 20 % del total del gas natural (i.e. 750 GWh de 3.200 GWh) se puede estimar un impacto máximo del 25%.

5. CONCLUSIONES

El cómputo total, en los sectores identificados, alcanzaría más de un millón de toneladas al año de residuo sólido, al que se le debe sumar 147 mil m³ de agua residual que debe ser tratada.

De estas cantidades, se deben exceptuar como candidatos, aquellos residuos sólidos producidos por la industria vitivinícola. Estos residuos están obligados a ser gestionados a través de empresas que producen productos alcohólicos y por ende no pueden optar a otras cadenas de valor. En total, se estima que los residuos susceptibles de ser empleados en aplicaciones de generación de metano alcanzarían 850 mil toneladas al año.

En general, las empresas transformadoras de los productos agrícolas se caracterizan por una estacionalidad que depende de las campañas a lo largo del año. No obstante, en este caso, se han identificado periodos de trabajo que prácticamente abarcan todos los meses del año y que consiguen un funcionamiento cuasi-permanente por la adaptabilidad de muchas empresas que procesan diferentes tipos de productos o reciben estos desde diferentes orígenes del planeta.

En relación con las cantidades de metano disponibles, las variables de operación de los reactores (e.g. carga orgánica diaria, etapas de digestión, temperatura, pH, etc.) influyen notablemente en el grado de eficiencia de la digestión anaerobia y por tanto en la producción de metano real disponible. Sin embargo, la determinación del máximo potencial, a partir del contenido de macronutrientes de la muestra (i.e. proteínas, carbohidratos y lípidos y grasas), permite cuantificar la máxima capacidad de generación de metano en la región.

Bajo esta perspectiva, se puede estimar una potencial generación máxima de metano cercana a los 200 GWh anuales, lo que supone el 5.2% del total de gas natural consumido anualmente en la región. Si tenemos en cuenta que el 40% de este gas se emplea en la alimentación de la central de ciclo combinado de Arrúbal y que la industria riojana consume el 20%, podemos concluir que la adecuada gestión de los residuos agroalimentarios podría suponer una cuarta parte del total de gas consumido por la industria riojana.

Considerando que no fue posible tomar muestras y analizar la totalidad de residuos de la región, basando los resultados potenciales en la bibliografía publicada, es necesario dar continuidad al estudio para la obtención de resultados aún más ajustados a la realidad regional.

Asimismo, es necesario mantener esta línea de investigación para realizar la prospección de la nueva realidad industrial, tanto a nivel de consumo energético por mejora de la eficiencia energética, como en la generación de residuos y subproductos disponibles para su tratamiento posterior, gracias a los avances introducidos en los equipos.

Estas cantidades, con un precio promedio de 40 €/MWh, supondrían un volumen de negocio de unos 8 millones de euros. Cantidad, lo suficientemente atractiva como para hacer viable la construcción de entre uno y tres biodigestores, repartidos a lo largo de la geografía riojana, con posibilidad de conexión a la red de gas.

Considerando la producción actual de gas natural en la región (i.e. yacimiento de Viura) y la digestión anaerobia de residuos, la región alcanzaría una autosuficiencia del 45% de gas aproximadamente.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro especial agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Internacional de La Rioja por su inestimable apoyo durante la ejecución del presente proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed P., Fernández P., de Figueroa L., Pajot H. (2019) Exploitation alternatives of olive mill wastewater: production of value-added compounds useful for industry and agriculture. *Biofuel Research Journal*, 22, 980-994.
- Benalia, S., Falcone, G., Stillitano, T., De Luca, A.I., Strano, A., Gulisano, G., Zimbalatti, G., Bernardi, B. (2021) Increasing the Content of Olive Mill Wastewater in Biogas Reactors for a Sustainable Recovery: Methane Productivity and Life Cycle Analyses of the Process, *Foods* 10(5),1029.
- Bernardi, B.; Benalia, S.; Zema, D.A.; Tamburino, V.; Zimbalatti, G. (2017) An automated medium scale prototype for anaerobic co-digestion of olive mill wastewater. *Information Processing in Agriculture*, 4, 316–320.

- Cadavid-Rodríguez, L.S., Vargas-Muñoz, M.A., Plácido, J. (2019) Biomethane from fish waste as a source of renewable energy for artisanal fishing communities, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34, 110-115.
- Choudhury, A., Lepine, C., Witarsa, F., Good, C. (2022) Anaerobic digestion challenges and resource recovery opportunities from land-based aquaculture waste and seafood processing byproducts: A review, *Bioresource Technology*, 354, 127144.
- CORES (Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos), 2022. Disponible en: <https://www.cores.es/es/estadisticas> (último acceso, febrero 2022)
- Croxatto-Vega, G.C., ten Hoeve, M., Birkved, M., Sommer, S.G., Bruun, S. (2014) Choosing co-substrates to supplement biogas production from animal slurry – A life cycle assessment of the environmental consequences, *Bioresource Technology*, 171, 410-420.
- Drosg, B., Rudolf Braun, Günther Bochmann, Teodorita Al Saedi, (2013) 3 - Analysis and characterisation of biogas feedstocks, Editor(s): Arthur Wellinger, Jerry Murphy, David Baxter, In Woodhead Publishing Series in Energy, *The Biogas Handbook*, Woodhead Publishing, 52-84.
- Egea F., Torrente R.G., Aguilar A. (2018) An efficient agro-industrial complex in Almería (Spain): Towards an integrated and sustainable bioeconomy model. *New Biotechnology*, 40, 103–112.
- European Commission (2017) Waste-to-energy in the circular economy. COM (2017). 34 final. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels.
- Federici, F., Fava, F., Kalogerakis, N., Mantzavinos, D. (2009) Valorisation of agro-industrial by-products, effluents and waste: concept, opportunities and the case of olive mill wastewaters, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(6), 895-900.
- Gobierno de La Rioja, Estadísticas de consumo energético, 2022. Disponible en: <https://www.larioja.org/estadistica/es/area-tematica-economia/industria-energia/consumo-combustibles> (último acceso febrero 2022).
- Hadidi, L.A., Omer, M.M. (2017) A financial feasibility model of gasification and anaerobic digestion waste-to-energy (WTE) plants in Saudi Arabia, *Waste Management*, 59, 90-101.
- INE (Instituto Nacional de Estadística), 2022. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254735570688 (último acceso, febrero 2022).
- Kafle, G.K., Kim, S.H., Sung, K.I. (2013) Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics, *Bioresource Technology*, 127, 326-336.
- Malinauskaite J, Jouhara H, Czajczynska D., Stanchev P, Katsou E, Rostkowski P, Thorne RJ. Colon J, Ponsa S, Al-Mansour F, Anguilano L, Krzyzynska R,

- Lopez IC, Vlasopoulos A, Spencer N. (2017) Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe, *Energy*, 14, 2013-2044.
- Mouftahi, M., Tlili, N., Hidouri, N., Bartocci, P., Alrawashdeh, K.A.B., Gul, E., Liberti, F., Fantozzi, F. (2021) Biomethanation Potential (BMP) Study of Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Abundant Bio-Wastes in Southern Regions of Tunisia. *Processes* 9(1), 48.
- Mühl, D.D., de Oliveira, L. (2022) Features of anaerobic digestion plants in the brazilian agricultural sector, *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 1, 100001.
- Murthy, P.S., Naidu, M.M. (2012) Sustainable management of coffee industry by-products and value addition-a review, *Resources, Conservation & Recycling*, 66, 4-58.
- Narisetty, V., Nagarajan, S., Gadkari, S., Ranade, V.V., Zhang, J., Patchigolla, K., Bhatnagar, A., Awasthi, M.K., Pandey, A., Kumar, V. (2022) Process optimization for recycling of bread waste into bioethanol and biomethane: A circular economy approach, *Energy Conversion and Management*, 266, 115784.
- Okoro-Shekwa, C.K., Turnell Suruagy, M.V., Ross, A., Camargo- Valero, M.A. (2020) Particle size, inoculum-to-substrate ratio and nutrient media effects on biomethane yield from food waste, *Renewable Energy*, 151, 311-321.
- Otero, A., Mendoza, M., Carreras, R., Fernández, B. (2021) Biogas production from slaughterhouse waste: Effect of blood content and fat saponification, *Waste Management*, 133, 119-126.
- Pramanik, S.K. (2022) Anaerobic co-digestion of municipal organic solid waste: Achievements and perspective, *Bioresource Technology Reports*, 20, 101284.
- Qi, M., Liu, Y., He, T., Yin, L., Shu, C-H., Moon, I. (2022) System perspective on cleaner technologies for renewable methane production and utilisation towards carbon neutrality: Principles, techno-economics, and carbon footprints, *Fuel*, 327, 125130.
- Rodrigues, R.P., Rodrigues, D.P., Klepacz-Smolka, A., Martins, R.C., Quina, M.J. (2019) Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates, *Science of The Total Environment*, 649, 1599-1608.
- Scarlat N., Fahl F., Dallemand J.F. (2019) Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe, *Waste and Biomass Valorization*, 10, 2425-2444.
- Sommer, S.G., Webb, J., Hutchings, N. (2019) New emission factors for calculation of ammonia volatilization from European livestock manure management systems, *Front. Sustain. Food. Syst.*, 3, 1e9.

- Triolo, J.M., Ward, A.J., Pedersen, L., Sommer, S.G. (2013) Characteristics of Animal Slurry as a Key Biomass for Biogas Production in Denmark, *Bio-mass Now*, Chapter 12.
- Valenti, F., Zhong, Y., Sun, M., Porto, S.M.C., Toscano, A., Dale, B.E., Sibilla, F., Liao, W. (2018) Anaerobic co-digestion of multiple agricultural residues to enhance biogas production in southern Italy, *Waste Management*, 78, 151-157.
- Wickham, R., Galway, B., Bustamante, H., Nghiem, L.D. (2016) Biomethane potential evaluation of co-digestion of sewage sludge and organic wastes, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 3-8.
- Yasin N.H.M., Mumtaz T, Hassan M.A, Rahman N.A.A. (2013) Food waste and food processing waste for biohydrogen production: A review. *Journal of Environmental Management*, 130, 375-385.