

El impacto positivo de la codigestión anaerobia en la reducción de gases de efecto invernadero (GEI)

Estudio de caso 

María José Galván^{1*}; Salvador Degano¹; Francisco Badin¹; Mara Cagnolo¹
Analia Becker¹; Roberto Manno¹; Diego Acevedo²; Jorge Hilbert³; Mauren Fuentes⁴

¹Instituto Multidisciplinario de Investigación y Transferencia. Agroalimentaria y Biotecnológica; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Villa María, Argentina.

²Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

³Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.

⁴Instituto de Desarrollo y Diseño. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

*mariajosegalvan@yahoo.com.ar

Resumen

El objetivo del trabajo fue medir la huella de carbono de la planta de digestión anaeróbica (DA) utilizando definiciones y directrices establecidas en la normativa europea. El inventario de GEI muestra los conceptos incluidos para estimar la huella de carbono a lo largo del ciclo productivo (Ciclo de vida parcial de producto). La unidad de medida sobre la que se cuantificó el impacto en el estudio fue KgCO₂eq./KWh. También se determinaron las reducciones o los beneficios ambientales generados por la planta de DA de los residuos de faena porcina y residuo de cribado de maíz, en comparación con los valores de emisiones generados por la producción de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles informados por la secretaria de energía de Argentina.

Palabras clave:

Huella de carbono;
Codigestion anaeróbica; Gases de efecto invernadero.

The positive impact of anaerobic co-digestion on greenhouse gas reduction (GHG)

Abstract

The objective of the work was to measure the carbon footprint of the anaerobic digestion (AD) plant using definitions and guidelines established in European regulations. The GHG inventory shows the concepts included to estimate the carbon footprint throughout the production cycle (partial product life cycle). The unit of measurement used to quantify the impact of the study was KgCO₂eq./KWh. The environmental reductions or benefits generated by the AD plant from swine slaughter waste and corn screening waste were also determined in comparison with the values of emissions generated by the production of electricity from fossil fuels as reported by the Argentine Energy Secretariat.

Keywords:

Carbon footprint;
Anaerobic co-digestion - GHG.

Forma de citar: Galván, M. J., Degano, S., Badin, F., Cagnolo, M., Becker, A., Manno, R., Acevedo, D., Hibert, J., & Fuentes M. El impacto positivo de la codigestión anaerobia en la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). RedBioLAC, 6(1), 21-27.

Introducción

Argentina se caracteriza por tener un sólido sector agropecuario y agroindustrial, además, por ser un gran productor de granos, carnes, productos lácteos, alimentos, etc. Estas actividades generan una amplia cantidad y diversidad de residuos y subproductos que pueden tener un enorme potencial de generación de biogás o biometano. De esta manera contribuye con la reducción de las emisiones de GEI y la disminución de la contaminación ambiental (Hilbert, 2014). Según la Tercera Comunicación Nacional Sobre el Cambio Climático presentada por la República Argentina en la COP 21 de París, la agricultura, ganadería y el cambio en el uso del suelo implican un 37 % de las emisiones de GEI del país. Además, la gestión del estiércol genera una cantidad importante de metano y óxido nítrico, que se podría evitar si parte de este se utilizara para producir biogás (FAO, 2019). Las emisiones de la industria frigorífica también se podrían utilizar para la generación de biogás, y así disminuir el impacto ambiental de estas plantas de faena y mejorar su balance energético. Asimismo, en la Cuenca porcina de Marco Juárez predominan los tratamientos de efluentes mediante lagunas abiertas (FAO, 2019, 2019). Es así que, para evitar estas emisiones y la lixiviación de nutrientes y materia orgánica al entorno natural, es necesario cerrar los circuitos desde la producción hasta la utilización, mediante medidas óptimas de captura de metano y recuperación de nutrientes (Holm-Nielsen *et al.*, 2009).

Además de las potenciales emisiones de GEI de la propia planta de DA de los residuos de faena porcina, se han identificado una serie de emisiones potenciales de GEI relacionadas con las instalaciones de esta, e incluyen: el tratamiento por DA de residuos de faena porcina, el transporte a la planta del RCM y estiércol, el almacenamiento del digestato después de la DA, la gestión de este durante la aplicación al suelo y la conversión de biogás en energía (Burg *et al.*, 2018).

El objetivo de este trabajo fue elaborar un inventario de GEI utilizando definiciones y directrices establecidas en la normativa europea, la cual plantea los conceptos a incluir para estimar la huella de carbono a lo largo de todo el ciclo productivo y de consumo de los productos (ciclo de vida del producto). Para el cálculo de las emisiones de la planta bajo estudio se incluyeron los eslabones productivos identificados dentro de los límites hasta la puerta de la planta (ciclo de vida parcial del producto). Adicionalmente se determinaron las reducciones logradas por la planta de DA de los residuos de faena porcina y residuo de cribado de maíz en comparación con los valores de emisiones generados por la producción de energía eléctrica, a partir de combustibles fósiles, informados por la secretaria de energía de Argentina. Este balance de emisiones, utilizando

los valores de rendimientos de biogás y metano obtenidos experimentalmente por ensayos por *Batch* a escala de 5 L, utilizando una relación C/N 15 a sólidos totales (ST) finales del 5 % en una proporción RCM/SF 3,35:1 en condiciones mesofílicas y agitación controlada (Galván *et al.*, 2021), permitirá obtener una primera estimación de las emisiones incorporando la estrategia de codigestión anaeróbica (CoDA) entre los subproductos de faena (SF) y el residuo de cribado de maíz (RCM).

Descripción del caso

El caso de estudio corresponde a una industria procesadora de carne de cerdo que se encuentra ubicada en Córdoba, Argentina (Lat: S -32°53'54" Long: W -62°40'37 "W). Esta cuenta con una capacidad mensual de 10 000 animales (950 t). Diariamente se generan 3 t de subproductos. La mezcla de los subproductos de faena está compuesta por una fracción sólida (30 %) de estómago, vísceras, riñones, pulmones e hígados de cerdo previamente picados y una fracción líquida (70 %) de sangre de cerdo. La planta de biogás ubicada en el mismo establecimiento cuenta con dos digestores de 1057 m³ de volumen, aislado térmicamente, con dos agitadores y sistema de calefacción mediante serpentinas. La generación eléctrica y térmica de la planta consiste en un módulo que integra un motor de potencia nominal de 435 kW, un generador asincrónico y sistemas de intercambio de calor.

Mientras que los residuos de cribado de maíz (RCM) para la codigestión anaeróbica (CoDA) se obtuvieron de una planta de producción de bioetanol situada en Villa María, Córdoba, Argentina (Lat: S -32°41'54" Long: W 63°16'11"), la producción anual de RCM actualmente es de 3000 t/año. El inóculo (PM) utilizado se obtuvo de la laguna de estabilización en instalación porcina centralizada, situada en Bell Ville, Córdoba, Argentina (Lat: S -32°40'12" Long: W 62°51'11"). Este se conservó, desgasificó y caracterizó según la metodología propuesta por Angelidaki *et al.* (2009) y Holliger *et al.* (2016).

Para la construcción de la metodología de estimación de emisiones de GEI se tomó como base la Directiva europea 2018/2021, que plantea en sus Anexos 5 (Normas para calcular el impacto de los biocarburantes, biolíquidos y los combustibles fósiles de referencia en las emisiones de GEI), los conceptos a incluir para estimar las emisiones del ciclo de vida parcial y el cálculo de las reducciones logradas por los biocombustibles. A su vez, algunos conceptos no se incluyeron debido a que no corresponden en función al ciclo de producción de la planta de biogás evaluada. A continuación, se detalla la Ecuación 1 básica de acuerdo con la directiva, y la Tabla 1 con los conceptos que se han incluido o no en el presente estudio.

$$E = e_{ec} + e_i + e_p + e_{td} + e_u + e_{sca} + e_{ccs} + e_{ccr} + e_{ee} \quad (1)$$

Tabla 1 | Definición de tipos de emisiones y su inclusión o no al caso de estudio. Metodología de cálculo aplicada- anexo V de la directiva europea de biocombustibles EU 2018 – RED II. (Metodología A):

Definición	Inclusión en caso de estudio
E = Emisiones totales procedentes del uso del combustible.	
e_{ec} = Emisiones procedentes de la extracción o del cultivo de las materias primas.	No No se utilizan cultivos energéticos.
e_i = Cambios en la reserva de carbono en suelos.	No Se considera que no hay cambios en las reservas de carbono de las tierras y que están en producción agrícola desde antes de enero de 2008
e_p = Emisiones procedentes de la transformación.	Si
e_{td} = Emisiones procedentes del transporte y la distribución.	Si No
e_u = Emisiones procedentes del combustible cuando se utiliza.	Directiva Europea - Anexo V “se considerará nula para los biocarburantes y biolíquidos”
e_{sca} = Reducción de emisiones procedente de la acumulación de carbono en suelo mediante una mejora de la gestión agrícola.	No Se considera que no hay cambios de gestión, ni mejora de los stocks de carbono.
e_{ccs} = Reducción de emisiones procedente de la captura y retención del carbono.	No No se realiza este tipo de prácticas de almacenamiento geológico.
e_{ccr} = Reducción de emisiones procedente de la captura y sustitución del carbono.	No No se utiliza biomasa del proceso para sustitución de combustibles fósiles.
e_{ee} = Reducción de emisiones procedente de la electricidad excedentaria de la cogeneración.	Si Se genera energía eléctrica con fuentes renovables reemplazando fósiles.

Reducción = $(EF - EB) / EF$ (EB = las emisiones totales procedentes del biocarburante o biolíquido, EF = las emisiones totales procedentes del combustible fósil de referencia).

Para la elaboración del calculador se optó por una planilla Excel de relevamiento de datos y cálculos de emisiones por factores de emisiones correspondientes. Teniendo en cuenta las materias primas, se incluyeron todos los movimientos de RCM e inóculo (PM) desde el lugar de origen hasta la ubicación de la planta. En todos los transportes, se consideraron las emisiones del viaje ida y vuelta según lo indicado en la metodología ACM0017 e ISCC *Guidance Document 201-3: Biogas and Biomethane*. Además, se tuvieron en cuenta los volúmenes necesarios para la producción anual de la planta y disposición final de los coproductos, así como los consumos de energía eléctrica y gas, insumos químicos de procesos y generación de efluentes. Conjuntamente se estimaron las emisiones generadas con base en los factores de emisiones planteados en la Ecuación 1 por los correspondientes factores de emisiones energéticos, de transporte y proceso. Para la etapa de producción, de acuerdo con la directiva europea (Anexo V, Punto 11), las emisiones de la transformación (e_p), incluirán las emisiones procedentes de la transformación propiamente dichas, tales como, emisiones de los residuos de faena y la producción de sustancias químicas o productos utilizados en la transformación. La generación de subproductos de faena (SF) en kg/año, fue proporcionado por la industria. A partir del mismo se calcularon los kg de RCM e inóculo necesario para la CoDA, usando la relación C/N 15 con ST 5 % finales. Además, para el cálculo, se utilizaron los rendimientos obtenidos experimentalmente

de biogás y metano (Galván *et al.*, 2021). En el desarrollo del calculador se incorporaron todas las etapas del proceso, desde el transporte de las materias primas (residuos) hasta la disposición final de los digestatos.

Resultados y lecciones aprendidas

En la [Figura 1a](#) se presentan las emisiones correspondientes en cada etapa, la actividad involucrada en el proceso en tCO₂eq y en la [Figura 1b](#) se muestran los respectivos porcentajes de cada actividad. Los alcances que comprende son: materia prima, transporte de RCM y estiércol, proceso productivo de biogás, almacenamiento interno de biofertilizantes, distribución y aplicación de biofertilizantes en campo, generación de electricidad (no se considera el mantenimiento, paradas técnicas, consumo de aceite y filtro del generador).

Considerando que el uso del digestato es la aplicación agrícola como fertilizante y este se genera durante todo el año, se debe almacenar en tanques descubiertos durante un máximo de 180 días, generando emisiones de GEIs, como el CO₂ y el CH₄ (Menardo *et al.*, 2011). Holly *et al.* (2017) indicaron que el almacenamiento del digestato no es fuente significativa de las emisiones totales de N₂O de las plantas de biogás, pero sí es un gran contribuyente a las emisiones de CH₄ de los sistemas anaeróbicos. Las emisiones de CH₄ de los digestatos no están bien cuantificadas, ya que son pocos

los estudios que aportan datos (García- González, 2019). En este caso de estudio, Ealmf generaría el 41,5 %, mientras Baldé *et al.* (2016) estimaron que las emisiones del almacenamiento eran aproximadamente el 12 %. Gioelli *et al.* (2011) informaron que el almacenamiento de digestato representa alrededor del 27 % del total de las emisiones de CO₂eq generadas durante los procesos anaeróbicos. Los valores de la bibliografía revisada podrían ser inferiores a los presentados en la Figura 1, debido a que es una primera estimación y se debe disminuir el grado de incertidumbre (incorporando más datos, continuando con la elaboración y comparaciones sucesivas de estos). Se podría recuperar el CH₄ durante el almacenamiento siendo económicamente viable, y operando a una OLR alta y a un THR bajo. Cubrir los tanques de almacenamiento ofrece la opción de reducir las emisiones de GEI, capturando el CH₄ residual del digestato (Kaparaju, 2006). Además, las emisiones que provienen del almacenamiento de digestato son menores en comparación con el almacenamiento de estiércol no tratado. Maldaner *et al.* (2018) indicaron una reducción del 85 %, si se comparan las emisiones del estiércol sin tratar con el almacenamiento de digestato. Como se observa en la Figura 1a las emisiones de la aplicación de biofertilizantes (29,03 %) y el transporte de materia prima (24,59 %), también se encuentran dentro de las actividades que mayores aportes de emisiones generan. Las emisiones durante el transporte del digestato y su

aplicación en suelo dependen en gran medida de la distancia a los sitios desde la planta de DA y si el digestato se trata posteriormente para reducir el contenido de agua (Møller *et al.*, 2009). Esto podría deberse al bajo contenido de ST del digestato (<10 %), el cual causa que el almacenamiento y el transporte sean costosos. Tras la aplicación en suelo, comienza la biodegradación del digestato, lo que da lugar a emisiones de CO₂ y N₂O que también fueron estimadas en el calculador. Clemens *et al.* (2006) indicaron que las emisiones procedentes del almacenamiento son más importantes que las de aplicación a campo, coincidente con los resultados obtenidos de la planta bajo estudio. Conjuntamente, las emisiones de N₂O de la aplicación del digestato fueron entre un 17 y un 71 % menores que las del estiércol no digerido, dependiendo entre otras cosas de las características del suelo. Esta disminución podría deberse al menor contenido de C fácilmente degradable de la materia prima digerida (Nkoa, 2014). Existe una gran variabilidad en los resultados encontrados, y es necesario llevar a cabo investigaciones adicionales sobre las emisiones tras la aplicación de digestato en suelo, reduciendo así el grado de incertidumbre en la estimación de GEI de cada calculador elaborado.

Finalmente, en la Tabla 2 se resumen las emisiones totales del proceso y la reducción de emisiones del proceso de CoDA.

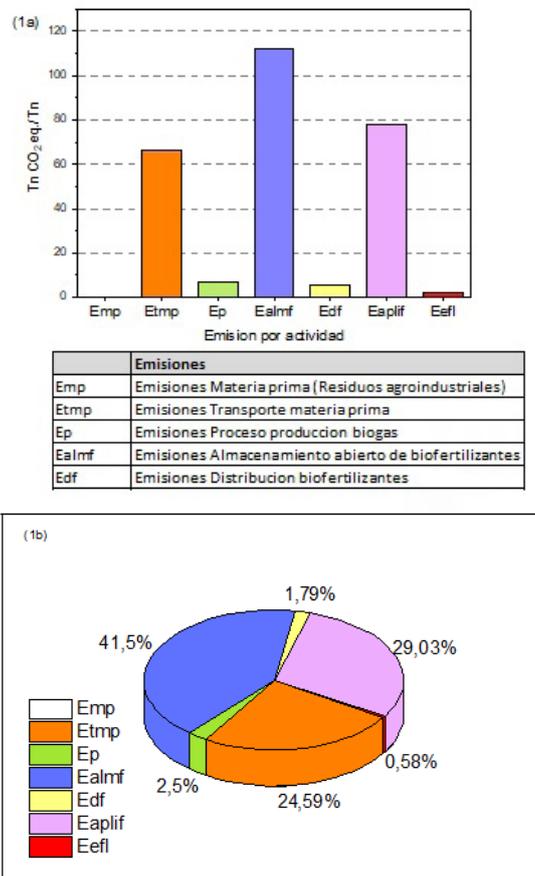


Figura 1 | Emisiones de cada actividad en tCO₂eq (a). Porcentajes de cada actividad (b).

Tabla 2 | resumen de los balances de emisiones.

Calculador Huella de Carbono Planta de Biogás		
Resultados 1		
Total de emisiones	269 314	kgCO ₂ eq
kg CO ₂ eq/kWh Energía total producida disponible (eléctrica + térmica)	0,033	kgCO ₂ eq/kWh
kg CO ₂ eq/kWh Energía eléctrica disponible	0,058	kgCO ₂ eq/kWh
kg CO ₂ eq/kWh Energía térmica disponible	0,078	kgCO ₂ eq/kWh
Resultados 2: Reducción de emisiones		
Energía total producida (Eléctrica + Térmica)	92,8	%
Energía total eléctrica disponible	87,5	%
Energía total térmica disponible	83,1	%

Las emisiones totales asociadas a toda la cadena productiva del biogás y sus co-productos durante el periodo 2020-2021, son de 269 314 kgCO₂eq.

Los kgCO₂eq/kWh de energía total disponibles (Energía eléctrica + energía térmica) generados por la planta, fueron de 0,033. Considerando dentro del cálculo de las emisiones el uso promedio del 50 % de la energía térmica generada para la calefacción de los digestores y parte de la energía eléctrica para el funcionamiento de agitadores y bombas principalmente.

Los kgCO₂eq/kWh de energía eléctrica disponibles (sin tener presente la energía térmica) generados por la planta, fueron de 0,058 con una reducción de emisiones para la producción de energía eléctrica a partir del biogás del 87,5 %. Comparando las emisiones generadas por la producción de 1 kWh de energía eléctrica por la planta de biogás versus valores de emisiones generados por la producción de 1 kWh de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles informados por la Secretaría de Energía de Argentina de 0,464 kgCO₂eq/kWh-margen de operación (Este valor no incluye las energías renovables, ni las pérdidas por transporte y distribución).

Si tomamos para el cálculo de reducción, los kgCO₂eq/kWh de energía total (energía eléctrica + energía térmica) disponibles en lugar de los kgCO₂eq/kWh de energía eléctrica únicamente, la reducción alcanzaría un mayor valor (92,8 %).

Conclusiones y recomendaciones

A partir de la elaboración del inventario de GEI se estimaron las emisiones del ciclo de vida parcial (Cuna a la puerta) y se realizó el cálculo de las reducciones logradas por la planta de DA de los residuos de faena porcina, incorporando la estrategia de codigestión anaeróbica (CoDA) entre los subproductos de faena (SF) y el residuo de cribado de maíz (RCM).

La actividad que mayor impacto generó en este caso de estudio fue el almacenamiento abierto de biofertilizantes (Ealmf) con 111,78 tCO₂eq, esto representa el 41,5 % del total de las emisiones, las cuales se pueden reducir al cubrir los tanques de almacenamiento y recuperar el biogás pobre. Adicionalmente se puede incorporar la tecnología de deshidratación y pelletizado del este. Las emisiones procedentes de la aplicación de biofertilizantes (Eaplif) con 78,19 tCO₂eq representan el 29,03 % del total de las emisiones. Este tipo de emisiones se pueden reducir mediante una correcta estabilización del digestato y tomando en consideración prácticas adecuadas de aplicación según las características del suelo y cultivos. El cálculo de reducción de emisiones arrojó un valor de 85,7 %. El calculo de reducción de emisiones arrojo un valor de 85,7 %, al comparar los kgCO₂eq/kWh de energía eléctrica producidas a partir de biogás versus los kgCO₂eq/kWh de energía eléctrica producidos a partir de combustibles fósiles, tomando como valores de referencia los informados por la secretaria de energía de Argentina. Se debe continuar con los análisis de las emisiones anuales de planta, y de esta manera reducir y mejorar aquellas actividades que generan mayor impacto. Conjuntamente, es necesario elaborar diferentes calculadores de plantas de biogás, unificando metodologías para su posterior comparación, ya sea a partir de residuos agroindustriales o cultivos energéticos teniendo en cuenta las emisiones de la gestión agrícola y del transporte de las mismas a la planta de biogas.

Referencias

- BioGrace project – Aligning GHG emission calculations in Europe. (2013). <https://energee-watch.eu/publication/biograce-project-aligning-ghg-emission-calculations-in-europe/>
- Angelidaki I., Alves M., Bolzonella D., Bprzacconi L., & Campos J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, Water Science and

- Technology, 59(5), 927-934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Balde, H., VanderZaag, A. C., Burt, S. D., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Desjardins, R. L., & MacDonald, D. J. (2016). Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology*, 216, 914-922. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031>
- Branzini, A., Denaday, F., & Escartín, C. (2019). Estudio de cuencas de biogás. Colección Informes Técnicos (FAO) spa no. 4.
- Burg, V., Bowman, G., Haubensak, M., Baier, U., & Thees, O. (2018). Valorization of an untapped resource: energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.004>
- Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ de la Red Argentina de Energía Eléctrica. Secretaría de Gobierno de Energía. Subsecretaría de Planeamiento Energético. Dirección Nacional de Información Energética.
- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., & Amon, B. (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 112(2-3), 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.016>
- Ecoinvent. (2011). Inventario del ciclo de vida (LCI) de materiales y productos versión 2.2. Centro de competencia del Instituto Federal Suizo de Tecnología.
- FAO. (2019). Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico. Colección. Documentos Técnicos N° 6. Buenos Aires. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5190ES/>
- FAO. (2019). Estudio de cuencas de biogás. Colección Informes Técnicos N.º 4. Buenos Aires. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5726ES/>
- Galván, M. J., Degano, S., Cagnolo, M., Becker, A., Hilbert, J., Fuentes, M., & Acevedo, D. (2021). Batch optimization of biogas yield from pasteurized slaughterhouse by-products incorporating residues from corn sieving. *Biomass and Bioenergy*, 151, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106136>
- García-González, M. C., Hernández, D., Molinuevo-Salces, B., & Riaño, B. (2019). Positive impact of biogas chain on GHG reduction. In *Improving Biogas Production* (pp. 217-242). Springer, Cham.
- Gioelli F, Dinuccio E, Balsari P (2011) Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. *Bioresource Technology*, 102(22), 10248–10251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.076>
- Hilbert, J. A. (2014). Tecnología de procesos en la generación de biogás a partir de subproductos agrícolas. *Agropost OnLine*, 131, 1-3. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/983>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa M., de Wilde V., Ebertseder F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., Fruteau de Lacroix, H., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M.,... & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Holm-Nielsen J., Al Seadi T., & Oleskiewicz-Popiel P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>
- Holly, M. A., Larson, R. A., Powell, J. M., Ruark, M. D., & Aguirre-Villegas, H. (2017). Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 239, 410-419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
- ISO. (1997). Environmental management -Life cycle assessment -Principles and framework EN ISO 14040.
- Kaparaju, P. L. N., & Rintala, J. A. (2006). Thermophilic anaerobic digestion of industrial orange waste. *Environmental Technology*, 27(6), 623-633. <https://doi.org/10.1080/09593332708618676>
- Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A. C., Gordon, R., & Duke, C. (2018). Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.184>
- Menardo, S., Gioelli, F., & Balsari, P. (2011). The methane yield of digestate: effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding. *Bioresource Technology*, 102(3), 2348-2351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.094>

- Møller, J., Boldrin, A., & Christensen, T. H. (2009). Anaerobic digestion and digestate use: Accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste management & Research*, 27(8), 813-824. <https://doi.org/10.1177/0734242X09344876>
- Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 473-492. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>