

Evaluación económica y ambiental de las tecnologías de utilización del biogás y perspectivas del análisis multicriterio

Jean Agustín Velásquez-Piñas¹; Orly Denisse Calle-Roalcaba¹; Luis Ramiro Miramontes-Martínez²; Leonardo Alexis Alonso-Gómez^{3a}

¹Universidade Federal de Uberlândia. Av. João Naves de Ávila 2121, Santa Mônica. Uberlândia-MG, Brasil.

²Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, 64451, San Nicolas de los Garza, Nuevo León, México.

³Universidad de los Llanos, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Grupo de investigación Ciencia Tecnología e Innovación Agroindustrial (CITIA), kilómetro 12 Vía a Puerto López, Vda. Barcelona, Villavicencio, Meta, Colombia.

^alalonso@unillanos.edu.co

Fecha recepción: agosto 29 de 2022

Fecha aceptación: enero 11 de 2023

Resumen

La tecnología de digestión anaerobia (DA) es un proceso implementado para producir biogás y biol mediante la gestión de residuos orgánicos. El biogás producido puede ser convertido en electricidad de origen renovable y el biol en biofertilizante. La adecuada comercialización de esta electricidad permite disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (EGEI) por la sustitución de electricidad de origen fósil y el biofertilizante puede disminuir el uso de fertilizantes nitrogenados basados en la urea. En Latinoamérica, la DA presenta retos operativos que limitan la comercialización de estos productos y comprometen la sostenibilidad de estos proyectos a escala industrial. En este trabajo se presenta un análisis crítico de las principales metodologías utilizadas para cuantificar la rentabilidad económica y ambiental de la DA, complementando con experiencias prácticas y teóricas en Latinoamérica. Las herramientas económicas analizadas fueron el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI), los cuales mediante un análisis de los costos operativos y de capital, y los posibles ingresos por la reducción de EGEI, permiten cuantificar la viabilidad financiera de estos proyectos. Como criterio de desempeño ambiental se analizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, la cual permite cuantificar todas las cargas ambientales evitadas por la DA. La información que reúne este trabajo ayuda significativamente a enriquecer la base de datos sobre el tratamiento de residuos orgánicos y ayudará a la toma de decisiones con respecto a los problemas ambientales.

Palabras clave: Digestión anaerobia; Residuos orgánicos; Análisis de ciclo de vida; Valor actual neto.

Economic and environmental evaluation of biogas technologies use and perspectives of multi-criteria analysis

Abstract

Anaerobic digestion (AD) technology is a process implemented to produce biogas and digestate by managing organic waste. The biogas produced can be converted into electricity of renewable feedstock and the liquid fraction into biofertilizer. The proper commercialization of this electricity allows to reduce greenhouse gas emissions (GGE) by the substitution of electricity of fossil origin and the biofertilizer can reduce the use of nitrogen fertilizers based on urea. In Latin America, the AD presents operational challenges, which limit the commercialization of these products and compromise the sustainability of these projects on an industrial scale. This paper presents a critical analysis of the main methodologies used to quantify the economic and environmental profitability of AD, complemented by practical and theoretical experiences in Latin America. The economic tools analyzed were the net present value (NPV), the internal rate of return (IRR) and the payback period (PP), which through an analysis of operating and capital costs, and the possible income from the reduction of GGE, allow quantifying the financial viability of these projects. As an environmental performance criterion, the Life Cycle Assessment methodology was analyzed, which allows quantifying all the environmental loads avoided by AD. The information that this work brings together significantly helps to enrich the database on the treatment of organic waste and in the future, it will help decision-making regarding environmental problems.

Keywords: *Anaerobic digestion; Organic waste; Life cycle assessment; Net present value.*

Avaliação econômica e ambiental das tecnologias de uso do biogás e perspectivas de análise multicritéria

Resumo

A tecnologia de digestão anaeróbica (DA) é um processo implementado para produzir biogás e digestato, gerenciando resíduos orgânicos. O biogás produzido pode ser convertido em eletricidade de origem renovável e o digestor em fertilizador. A comercialização adequada dessa eletricidade permite reduzir as emissões de gases de efeito estufa (EGEI) pela substituição da eletricidade de origem fóssil e o fertilizador pode reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados à base de ureia. Na América Latina, a Promotora apresenta desafios operacionais, que limitam a comercialização desses produtos e comprometem a sustentabilidade desses projetos em escala industrial. Este artigo apresenta uma análise crítica das principais metodologias utilizadas para quantificar a rentabilidade econômica e ambiental da DA, complementada por experiências práticas e teóricas na América Latina. As ferramentas econômicas analisadas foram o valor presente líquido (VNPV), a taxa interna de retorno (IRR) e o período de retorno (PRI), que através de uma análise dos custos operacionais e de capital, e os possíveis rendimentos provenientes da redução do EGEI, permitem quantificar a viabilidade financeira desses projetos. Como critério de desempenho ambiental, foi analisada a metodologia de Análise do Ciclo de Vida, que permite quantificar todas as cargas ambientais evitadas pela AD. As informações coletadas por este trabalho ajudam significativamente a enriquecer o banco de dados sobre o tratamento de resíduos orgânicos e no futuro ajudará na tomada de decisão sobre problemas ambientais.

Palavras-chave: *Digestão anaeróbica; Resíduo orgânico; Análise do ciclo de vida; Valor presente líquido.*

Introducción

La DA es una propuesta prometedora para contribuir con la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Puede ser considerada como una práctica ambientalmente amigable siempre y cuando sea utilizada de una manera sostenible [1]. Los principales productos de la DA son el biogás y el biol. Por medio de esta tecnología se puede contribuir con cerrar ciclos de uso de nutrientes, debido al reconocido contenido nutricional del biol, y se puede contribuir a la diversificación energética por la versatilidad de usos que tiene el biogás. Uno de los principales retos de la agroindustria está principalmente en cerrar estos ciclos de uso de nutrientes y en alcanzar, si no una soberanía energética, por lo menos una diversificación de la canasta energética en las regiones donde se establecen proyectos agroindustriales, sobre todo en países de bajos y medianos ingresos.

El uso de la DA tiene el potencial de mejorar la productividad agrícola, al tiempo que facilita un desarrollo sostenible y duradero. Etiquetarla como una tecnología descentralizada sostenible, que recupera nutrientes, agua y energía de los flujos de deshecho no es siempre acertado. Su establecimiento debe ser estudiado y analizado a profundidad si se quiere cumplir con su premisa de proporcionar agroindustrias con flujos limpios, fertilizantes concentrados y energía limpia.

En este mismo sentido, al lograr la integración de la producción de alimentos, la transformación de alimentos y el reciclaje de los desechos (agroindustriales, agrícolas, animales y alimentarios), se genera también un nexo con el saneamiento de aguas residuales y la producción energética que es ideal para cualquier agroindustria. Por definición, el proceso de DA, requiere de un ambiente anaerobio que garantice proporcionar al consorcio bacteriano las condiciones necesarias para transformar material orgánico crudo en biogás con un contenido de metano entre 50 y 70 %v. La DA comprende cuatro etapas, la de hidrólisis, la de acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis. Diversos grupos de microorganismos en sintrofia se relevan en cada fase para llegar a la fase final de la metanogénesis [2].

Las plantas de biogás deben tener la capacidad de responder a una serie de factores que incluyen condiciones climáticas, calidad y cantidad del sustrato, disponibilidad de materiales de construcción, geotécnica, trabajo especializado

y alto nivel de estandarización [3]. El principio común de esta tecnología consiste en depositar los sustratos en tanques de almacenamiento donde son bombeados al digestor, que es un tanque hermético de acero o concreto, en la mayoría de los casos, aislados para mantener temperatura constante. Los digestores pueden ser horizontales o verticales, generalmente con sistemas de agitación, para minimizar la formación de sedimentos. El biogás producido se utiliza para la producción de electricidad mediante un equipo de cogeneración de calor y electricidad (CHP). Alrededor del 10 al 30 % de la electricidad producida se reincorpora a la planta de biogás para el funcionamiento de los equipos. Como equipos adicionales se pueden incluir tanques de almacenamiento para los sustratos, equipos de separación líquido-sólido y secadores térmicos para el biol. La cantidad de equipos puede variar debido a la legislación de cada país, la legislación europea (reglamento (CE) No. 1069/2009) exige un proceso de saneamiento térmico de los residuos de origen animal antes de su uso como sustrato [4].

Además del control de todas las variables necesarias para la vida de estos microorganismos, un factor primordial es el tipo de biodigestor a utilizar, que debe adaptarse no solamente a las condiciones ambientales, sino también al tipo de sustrato y a los recursos financieros disponibles.

Aparte de los beneficios ambientales y de cierre de ciclos de nutrientes, los biodigestores para la aplicación de la tecnología de la DA, proporcionan seguridad energética, generan una diversificación en los ingresos para la agroindustria e incrementan las oportunidades de generación de empleo [5].

Por lo que además de todas las variables de la DA, existen otras variables por tener en cuenta, que se relacionan y que influyen en el éxito de la implementación de esta tecnología. Los biodigestores son influenciados por los contextos locales y las prácticas tradicionales. Por lo tanto, analizar todo este contexto merece un examen más detallado, para que un mayor número de proyectos de DA puedan llegar a ser sostenibles.

Entonces, una vez analizadas y controladas las variables técnicas de los proyectos de la DA, la rentabilidad económica de un proyecto no representa, ni debe representar, la totalidad de evaluaciones que deben ser realizadas para determinar la sostenibilidad de la producción de biogás. Otros análisis muy importantes para considerar son, los análisis ambientales, sociales y por último los multicriterio. Estos análisis deben

ser abordados en búsqueda de la comprensión integral del impacto que pueden generar diferentes tecnologías y escalas para la producción de biogás. El uso de análisis más detallados contribuye a que se llegue a un equilibrio entre los aspectos económicos y medio ambientales, y se pueda también dar viabilidad en el tiempo a las iniciativas de producción de biogás, lo que determina su sostenibilidad.

En este trabajo, se presentan algunos criterios importantes para el análisis económico y ambiental de proyectos de DA, mostrando algunas experiencias latinoamericanas, prácticas y teóricas, que pueden ayudar a comprender la forma de abordar estos estudios. Finalmente, el enfoque en análisis multicriterio también es abordado desde una óptica de desarrollo sostenible, como complemento, principalmente enfocado en biogás productivo o industrial.

Principales indicadores económicos por evaluar para emprendimientos en biogás

Existen diferentes indicadores económicos que tienen que ser tomados en cuenta al momento de tomar decisiones en relación con el establecimiento de diferentes iniciativas para la instalación de plantas de biogás, con la finalidad de conseguir sostenibilidad económica y recuperar la inversión en el menor plazo posible. Estos indicadores permiten conocer la viabilidad, y el tiempo que puede tomar la recuperación total de la inversión. El valor actual neto (VAN), es uno de los indicadores importantes para la toma de decisiones, el VAN da una idea de la inversión proyectada, y compara en términos de valor actual el impacto de eventos futuros asociados con una alternativa de inversión [6]. Como regla general, una iniciativa para la implementación de biodigestores debería ser emprendida si el VAN de la alternativa analizada es positivo.

Otra herramienta para el análisis económico es la tasa interna de retorno (TIR), que tiene el propósito de establecer cuál es la rentabilidad absoluta a una tasa mínima de atracción (TMA) dada. Por definición, la TIR es la tasa de retorno de la inversión cuando el valor actual neto es igual a cero [6]. El método que utiliza la TIR es ampliamente recomendado para analizar la viabilidad económica de proyectos aislados, quiere decir sin comparación de alternativas excluyentes [7]. De esta forma, para analizar un proyecto se tendría en consideración que una TIR mayor que la TMA sería una iniciativa viable.

Con los métodos VAN y TIR se puede realizar un análisis del periodo de recuperación de la inversión (PRI), o *payback* (PB) que es el tiempo en el que se puede recuperar la inversión realizada en un determinado proyecto. El PRI, generalmente es un indicador de inversión al momento de hacer proyecciones, puede ser expresado en meses o años. En el caso de proyección para sistemas de DA, tendrían que contemplarse dentro del PRI, todos y cada uno de los componentes implementados que involucran el sistema, (biodigestores, lagunas, sistemas de remoción de H₂S, sistemas de purificación de metano, sistemas de gestión del biol etc.), además de los ingresos, producto de la venta de energía y fertilizante. Este indicador puede ser analizado desde dos puntos de vista, el primero, desde el PRI simple, nominal o no descontado, y el segundo, desde el PRI actualizado o descontado.

Costos asociados a plantas de digestión anaerobia

En términos generales, los costos económicos de un proceso a nivel industrial, que se pueden adjudicar a los procesos de DA, se dividen en costos de capital y costos operativos [8]. Ambos pueden considerarse en distintas etapas del proyecto y, con frecuencia, podrían verse como necesidades del proyecto que compiten entre sí. Un costo de capital más alto a menudo da como resultado un costo operativo más bajo, asociado con activos de alto rendimiento, con bajos costos operativos y de mantenimiento. Por el contrario, un costo de capital más bajo da como resultado un costo operativo más alto que causa una caída crítica en la calidad o en la producción [9].

Costos de inversión de capital (CAPEX). Los costos del capital son conocidos como CAPEX (por su traducción en inglés, *Capital expenditures*). Los CAPEX en los proyectos de DA comprenden muchos elementos, enmarcados principalmente dentro de las inversiones en bienes para la puesta en marcha del proyecto. Son compras importantes que realiza una empresa y que están diseñadas para utilizarse por largo plazo.

Por ejemplo, los costos de los equipos de proceso para uso del biogás y del efluente, los costos de ingeniería civil para el digestor y los cimientos del edificio y la carretera de acceso, etc. También dentro de los CAPEX se incluyen los costos de conexión a la red eléctrica, si es el caso, y los

costos de transacciones financieras. Así como el capital de trabajo y, dependiendo del proyecto, también los costos de compra de tierras.

Por lo tanto, cada proyecto tiene un conjunto de factores específicos del sitio, que impactan en el costo final del capital, de manera que plantas de DA idénticas ubicadas en diferentes ubicaciones pueden tener costos de capital significativamente diferentes. Los CAPEX pueden ser afectadas también por la capacidad de procesamiento y por el tipo y forma de producción de energía. Los factores que típicamente son tenidos en cuenta para evaluar los CAPEX de un proyecto de DA son resumidos a continuación.

- Civiles y estructurales, de suministro e instalación de equipos mecánicos, de suministro e instalación eléctrica, y los costos indirectos del proyecto (ingeniería, administración de la construcción, contingencias de construcción, estudios preliminares de viabilidad e ingeniería, permisos e inscripciones, honorarios legales, adquisición de tierras, impuestos, licencias) [10].
- Obra civil e infraestructura, sistema de recepción y pretratamiento, digestores y auxiliares, decantadores, sistema de limpieza del biogás, sistema de cogeneración, sistema de gestión del biol, sistema de control y adquisición de datos (medición de condiciones del biodigestor), desarrollo del proyecto y contingencias [11].

Los CAPEX, en resumen, son una inversión a largo plazo en la que los costos están asociados con la compra de equipos importantes. Por ejemplo, los equipos de laboratorio que se usen para mediciones de contenido de metano en el gas, u otras mediciones necesarias para el funcionamiento de los biodigestores. Incluyen instalación, o incluso renovación de activos fijos importantes, incluidas las unidades de construcción y producción que se utilicen durante un año o más (teniendo en cuenta que la vida útil de los biodigestores superan el año) [12].

Costos operacionales OPEX. Los costos operativos, operacionales o de funcionamiento se traducen al inglés como *operating expenses* y son conocidos en formulación de proyectos como OPEX. Son los costos diarios en los que incurre una empresa para mantener su negocio operativo. Para la proyección de un sistema de DA se pueden configurar de varias formas al momento de considerar la viabilidad potencial de una

instalación. Por lo tanto, dependiendo de cómo se obtenga la financiación, se pueden incluir los costos de desarrollo y los honorarios profesionales. Los OPEX de cada planta son muy particulares, por lo que de plantas aparentemente idénticas se pueden obtener resultados muy diferentes.

Los OPEX consisten en componentes fijos y variables. Los fijos son los que es necesario pagar, aunque la planta esté sin funcionar. Generalmente comprenden la maquinaria (bombas, tuberías, unidad de cogeneración, etc.), la energía comprada (electricidad, vapor, etc.), mano de obra (de gerencia, supervisores y operarios), costos de administración (pruebas de laboratorio, permisos, etc.), así como costos de capacitación del personal que opera y los costos derivados del mantenimiento, tanto preventivo, como reactivo. El componente variable depende de la capacidad de producción de la planta, este componente generalmente comprende operaciones, es decir, costos de mantenimiento, compra de materia prima, compra de suministros o aditivos, costos de eliminación de desechos, etc.

En Latinoamérica se presentan algunos proyectos que han realizado este tipo de estudios, como el de García-Núñez, *et al.* [13], en el que determinaron, mediante un análisis técnico, económico (CAPEX y OPEX) y ambiental, que el uso de los efluentes de extractoras de aceite de palma en Colombia, para la producción de biogás, es una práctica que impacta positivamente, tanto los factores ambientales como los económicos en las plantas extractoras analizadas.

En Colombia, el análisis de los CAPEX y OPEX, sirvió para hacer la comparación entre diferentes escenarios de generación de energía eléctrica a partir de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), dentro de los cuales estaba la DA [14], en este estudio, Alzate, *et al.*, compararon tres municipios colombianos (Guayatá, Andes y Pasto), y encontraron que los beneficios económicos no fueron significativos en el pequeño municipio de Guayatá, que, en Andes, el municipio mediano, el precio elevado de la electricidad (100 USD/MWh) supondría una TIR positiva del 2,6 %. Por otro lado, en Pasto, que es la municipalidad más grande de las tres, la TIR máxima de gas de vertedero y digestión anaeróbica alcanzó el 13,59 % y 14,27 %, respectivamente. De igual manera, concluyeron que este tipo de proyectos pueden tener efectos económicos positivos, siempre y cuando se tengan en cuenta los incentivos fiscales y gubernamentales, toda

vez que se puede aprovechar que en Colombia hay un marco legal (Ley 1715 de 2014) de políticas e incentivos relativamente nuevo para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de residuos para la generación de energías alternativas.

Costos relacionados con la certificación de reducción de emisiones. La dinámica ambiental, a partir del acuerdo de París 2015 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, dio lugar a un acuerdo global sobre el fortalecimiento de la reducción de emisiones. En este acuerdo histórico que involucra a casi todos los países del mundo se hace un esfuerzo por reducir las emisiones de carbono y contener los efectos del calentamiento global [15]. Este acuerdo permitirá que iniciativas para reducción de emisiones sean más valoradas y que el componente ambiental tenga una mayor participación dentro de la matriz de ingresos. Es así como un análisis de viabilidad, además de

evaluar indicadores económicos, debe tener en cuenta los costos relacionados con la certificación de reducción de emisiones, cuando se quieren poner los créditos a la venta en mercados de carbono. Los costos por tonelada de carbono pueden tener una influencia en la rentabilidad de proyectos de biogás. Existe la posibilidad de obtener créditos de reducción certificada de emisiones (RCE) por evitar la liberación del metano que se generaría por la inadecuada disposición de los residuos, ya que al hacer la combustión del gas metano se emite dióxido de carbono que tiene un potencial de calentamiento global 25 veces menor que el gas metano [16,17]. Además, se pueden obtener créditos de carbono adicionales, si la tecnología a utilizarse, en este caso DA, es utilizada para la generación de energía renovable, que contribuye a la matriz energética de cada país o región. Para el análisis de los ingresos derivados del uso de créditos de carbono, se deben tener en cuenta las ecuaciones 1, 2, 3 y 4:

$$(CO_2Eq)_{quemada} = FE_{quemada} \times EM \quad (1)$$

$$(CO_2Eq)_{generación} = EE \times FE_{energía} \quad (2)$$

$$CO_2Eq = [(CO_2Eq)_{quemada} + (CO_2Eq)_{generación}] \quad (3)$$

$$RCE = CO_2Eq \times VRCE \quad (4)$$

Donde:

$(CO_2Eq)_{quemada}$ es el dióxido de carbono equivalente evitado en $[ton CO_2Eq/año]$

$(CO_2Eq)_{generación}$ es el dióxido de carbono equivalente evitado por la generación en $[ton CO_2Eq/año]$

FE_{metano} es el factor de emisión por quema de metano en $[ton CO_2Eq/ ton CH_4]$

EM es el metano total producido por año en $[ton CH_4/año]$

$FE_{energía}$ es el factor de emisión de electricidad generado en $[ton CO_2Eq/MWh]$

EE es la electricidad total generada por año en $[MWh/año]$.

CO_2Eq es el total de dióxido de carbono equivalente evitado en $[ton CO_2Eq/año]$.

RCE son las reducciones totales certificadas de las emisiones por año en $[USD/año]$.

$VRCE$ = es el valor de reducción de emisiones certificado en $[USD/ton CO_2Eq]$.

Estudios realizados en Latinoamérica, reconocen que si se considerara la remuneración que muchos países dan a las empresas agroindustriales por la reducción de las emisiones de gases. Se reducirían los costos operativos de los sistemas que trabajan con biogás. Como en el estudio realizado en Colombia por Valencia, *et al.* [18], en el que analizaron un sistema de cogeneración utilizando biogás como fuente principal de combustible. Los resultados de este estudio muestran que el sistema que trabaja con gas natural presenta una disminución de 5,66% en el costo operativo anual sobre el sistema que trabaja con biogás. Sin embargo, aunque el sistema de biogás provoca una disminución del 19,39% en producción de dióxido de carbono en comparación con los otros sistemas, por costos operacionales lo declararon inviable, haciendo la aclaración de que, si en Colombia se diera remuneración por la reducción de emisiones, efectivamente podría llegar a ser viable. En Brasil, por ejemplo, si existe un sistema de compensación.

Brasil y el sistema de compensación de energía eléctrica

El sistema de compensación energética establecido por las Resoluciones Normativas 482/2012 y 687/2015 de la Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) establece las condiciones generales para la conexión a la red de micro generación (potencia instalada menor o igual a 75 kWp) y la minigeneración (potencia instalada entre 75 kWp y 5 MWp) distribuida en Brasil [19, 20]. Esto permite que los sistemas fotovoltaicos y otras formas de generación eléctrica a partir de fuentes renovables con hasta 5 MWe de potencia instalada en hogares, empresas o asociaciones, puedan realizar la conexión a la red eléctrica de forma simplificada, atendiendo el consumo local e inyectando el excedente a la red, generando créditos energéticos.

Empresa con unidades de consumo múltiples.

En Brasil, también existe la resolución normativa 687/2015, que contempla las empresas con múltiples unidades de consumo y la generación compartida, estas empresas se caracterizan por el uso de electricidad de forma independiente, en la que cada fracción con uso individualizado constituye una unidad de consumo y las instalaciones para el servicio de las áreas de uso común constituyen una unidad de consumo distinta [19]. Esta normatividad incentiva y da viabilidad económica a proyectos de generación distribuida con biogás.

Generación compartida. caracterizada por la reunión de consumidores, dentro de una misma concesión o área de permiso, a través de un consorcio o cooperativa, integrado por una persona física o jurídica, que cuenta con una unidad de consumo con micro generación o minigeneración distribuida en un lugar distinto de las unidades de consumo en las que se compensará el excedente de energía [19].

Con este tipo de sistema de compensación es factible que los sistemas de producción de biogás en un lugar puedan reducir el costo de las facturas de electricidad en otro lugar del mismo propietario en el que necesite electricidad, y, en el caso de conformarse asociaciones en la modalidad de cooperativas o consorcios puedan negociar internamente el precio de la energía. En este caso el precio de la electricidad puede ser similar al precio de la electricidad suministrada por la red de energía nacional, sin necesidad de subastar la energía, que tiene un precio más bajo y que depende de cada subasta.

Modelos de operación de digestión anaerobia centralizados vs descentralizados

Las plantas de biogás funcionan mediante dos modelos de operación, centralizada o descentralizada. Los modelos centralizados son comunes en países europeos y utilizan digestores hasta de 8,000 m³ de volumen [21] y son construidos a una distancia máxima de 25 km de los centros de generación de residuos orgánicos [22]. En países latinoamericanos, predominan las plantas descentralizadas con biodigestores de volumen variable entre 200 a 1200 m³, construidos en su mayoría en las cercanías de granjas lecheras o porcinas, debido a esto, las distancias de transporte de residuos se consideran insignificantes [23].

En la **Tabla 1** se comparan diversos procesos de DA. En Europa la generación de biogás se realiza generalmente en reactores de tanque agitado (CSTR) en modo semicontinuo con control de temperatura (37 – 40 °C), que operan con tasas de carga orgánica (TCO) de 2,11 a 4,25 kg SV/m³d¹ y productividades de 0,32 a 12 m³ CH₄/m³d¹. Los amplios rangos de productividades se pueden deber a los tipos de sustratos utilizados (residuos agroindustriales, residuos de matadero, cultivos energéticos y estiércol de vaca y cerdo), la temperatura de operación o la estabilidad del proceso.

Tabla 1. Productividad de biogás para digestión anaerobia a escala industrial en Europa y Latinoamérica.

Digestor (m ³)	Sustrato	TCO (kg SV/m ³ d ¹)	TRH (d)	Productividad (m ³ /m ³ d ¹)	Ref.
Europa					
CSTR (3000)	CE y RM		40	3,90	[24]
CSTR (2500)	CE y RM		60	6,35	
CSTR (3500)	Estiércol y RM		45	7,88	
CSTR (3000)	CE, estiércol y RM		40-50	9,20	
CSTR (9000)	Lodos	1,35	22,5	0,44	[25]

CSTR (5000)	Estiércol de cerdo			1,13	[26]
CSTR (2200)	Lodos y FORSU	0,87	25-30	0,35	[27]
CSTR (5000)	Lodos y FORSU	1,38	30-40	0,72	
CSTR (8000)	Lodos			1,28	[28]
Latinoamérica					
Laguna cubierta (12.3)	Estiércol de cerdo	1,17	15,9	0,15	[29]
Laguna cubierta (68)	Estiércol de vaca	1,01	39	0,25	[30]
Laguna cubierta (7.5)	Estiércol de cerdo	0,6	75	0,026	[31]
Laguna cubierta (7.5)	Estiércol de vaca	0,34	90	0,066	[31]
Laguna cubierta (7.5)	Estiércol de cerdo	1,01	60	0,018	[31]
Laguna cubierta (7.5)	Estiércol de vaca y cerdo	0,82	60	0,044	[31]
Laguna cubierta (12.9)	Estiércol de cerdo	0,58	68,21	0,065	[32]

CE: Cultivos energético; RM: Residuos de matadero; FORSU: Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Los procesos de DA en Latinoamérica se caracterizan por gestionar estiércol de ganado en digestores con TCO de 0,34 a 1,17 kg SV/m³d¹, logrando productividades dentro de 0,018 a 0,525 m³ CH₄/m³d¹, utilizando reactores de tipo laguna cubierta operados a temperatura ambiente [29,31,33,34]. En Latinoamérica, en la mayoría de los casos, las bajas productividades de CH₄ reducen la viabilidad financiera y el éxito de la DA [35]. Con el fin de maximizar las productividades de CH₄ y la cantidad de residuos gestionados, los procesos de DA deben ser monitoreados continuamente. Sin embargo, su gestión operativa se basa en muchos casos en la experiencia del operador [36], lo que resulta en prácticas de gestión no estandarizadas, bajo nivel de automatización [37] e inestabilidad del proceso.

En México, por ejemplo, la Secretaría de Energía contabiliza 1259 digestores a escala industrial (>1000 m³ de volumen operativo) [38], la mayoría se encuentran abandonados debido al desconocimiento técnico de los operadores, por lo general son los mismos trabajadores de la granja [39]. Además, solo el 15 % de los digestores están equipados con equipos de cogeneración de electricidad [40].

La distancia de transporte del centro de generación de residuos a la planta de biogás es un factor que compromete la viabilidad ambiental y económica de la DA. La cantidad de transportes y número de recolecciones resulta en costos operativos, así como en altas emisiones de CO₂ proporcionales a la distancia recorrida, debido al uso de combustible diésel [41]. Pérez-Camacho, *et al.* [42] realizaron un análisis de sensibilidad de la distancia de transporte de residuos (0 km a 200 km) desde

el punto de generación hasta la planta de DA y determinaron un potencial de calentamiento global del proceso para una distancia menor a 1 km de 53 kg CO₂ eq y para una distancia de 200 km de 225 kg de CO₂ eq por MWh de electricidad generada.

En general, en Latinoamérica las plantas de DA presentan distancias mínimas de transporte debido a que están ubicadas en las inmediaciones de los centros de generación de los residuos agropecuarios gestionados. Sin embargo, a futuro las plantas de DA en Latinoamérica tienden a especializarse y gestionar una alta variedad de residuos orgánicos, aumentando las distancias de transporte y las EGEL asociadas, comprometiendo su sostenibilidad, lo que se debe compensar con un mejor análisis de sostenibilidad de los proyectos para que no fracasen.

Análisis de ciclo de vida como herramienta para sostenibilidad de los proyectos de biodigestión

La metodología para el análisis de ciclo de vida (ACV) se ha aplicado principalmente para cuantificar el impacto ambiental de los productos y es una herramienta potencial para el análisis y diseño de procesos. Es así como el ACV, se puede hacer antes de poner en marcha un proyecto, para visualizar y modelar los posibles impactos en la sostenibilidad del proyecto, o también se pueden aplicar para proyectos que ya estén en marcha para analizar los puntos de control o puntos con mayor índice de contaminación ambiental.

Para determinar la sostenibilidad de un proyecto de DA, se debe llevar a cabo una evaluación del proyecto con la integración como mínimo, de un ACV y un análisis técnico y económico,

además, en lo posible realizar una optimización multicriterio para optimizar simultáneamente el desempeño ambiental y el desempeño económico del proyecto [43]. El ACV es un método fiable para la evaluación de los impactos ambientales de cualquier proceso o producto. La metodología de ACV busca identificar y cuantificar con precisión la energía y los flujos másicos liberados al medio ambiente. También busca determinar cuáles flujos generan el mayor impacto en el medio ambiente, la salud humana y los recursos naturales durante todo su ciclo de vida [44]. La norma ISO 14040, 2006 proporciona orientación sobre las fases del ACV y sobre las fases para realizar una evaluación del ciclo de vida.

Fase 1 Objetivo y alcance del estudio. En esta fase, se evalúa el propósito y alcance del estudio. Se realiza un análisis cuantitativo definiendo la unidad funcional, la cual está configurada para comparar el tratamiento con otros tratamientos de la DA en términos de costo, transporte, consumo energético y valorización del producto. Por ejemplo, un estudio realizado en China determinó como unidad funcional el tratamiento de “1 tonelada de desperdicio de alimentos” en el sistema. En este estudio se consideraron factores de evaluación como ubicación de la planta de biodigestión, generación de electricidad, producción de combustible y descarga de contaminantes [45].

Fase 2 Inventario de ciclo de vida. El ICV implica la recopilación de datos apropiados con respecto a la cantidad de mano de obra, tiempo de biodigestión, insumos que entran al sistema, emisiones ambientales, producción de energía, etc. Los datos pueden ser el resultado de una inspección in situ, en el caso de analizarse un proyecto en marcha, tomados de sitios web gubernamentales o completados utilizando un software de LCA como por ejemplo el SimaPro que ofrece bases de datos muy completas como la base de datos Ecoinvent 3, que es la más utilizada actualmente. Existen otros softwares como por ejemplo el OpenLCA 1.10.2 [46], que actualmente está en expansión.

Fase 3 Análisis del impacto del ciclo de vida. Esta fase tiene como objetivo evaluar la importancia de los impactos potenciales en función de los resultados del ICV. Consta de los siguientes pasos:

- **Selección:** El primer paso es seleccionar las categorías de impacto que se considerarán como parte ACV general. Este paso debe completarse como parte de la fase inicial de definición de objetivos y alcance para guiar el proceso de recopilación de datos de ICV y requiere una reconsideración después de la fase de recopilación de datos.
- **Clasificación:** El propósito de la clasificación es organizar y posiblemente combinar los resultados de ICV en categorías de impacto.
- **Caracterización:** A través de la caracterización, los flujos de ICV categorizados se transforman en impactos.

Fase 4 Interpretación de los resultados. Es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, verificar y evaluar información de los resultados del ICV. Los resultados del análisis del inventario y la evaluación de impacto se resumen durante la fase de interpretación. El resultado de la fase de interpretación es un conjunto de conclusiones y recomendaciones para el estudio. De acuerdo con ISO 14040: 2006, la interpretación debe incluir la identificación y estructuración de los resultados de las fases de 2 y/o 3 para ayudar a determinar los problemas importantes, de acuerdo con la definición de objetivo y alcance.

También debe incluir la evaluación, donde se establece y mejora la confianza y la confiabilidad de los resultados del estudio y, por último, sacar las conclusiones, limitaciones y recomendaciones, para ser entregados a los destinatarios del ACV.

A continuación, se presentan algunos casos concretos, en relación con substratos provenientes de residuos de empresas agroindustriales de aceite de palma, residuos alimenticios y vinaza.

- **Lodos de empresas agroindustriales de aceite de palma en Malasia:** Se investigó el comportamiento medioambiental de la producción de biogás mediante un ACV en el contexto de Malasia. Identificaron los puntos críticos ambientales en la cadena de suministro de biogás del efluente de fabricación de aceite de palma. Se encontró que los impactos, calentamiento global, consumo de agua y cambio de uso de la tierra fueron los predominantes. Sin embargo, también se encontró que el biogás derivado del efluente de fabricación de aceite de palma ayuda a una

correcta gestión de residuos y valorización energética [47].

- Residuos alimenticios en Italia: Se analizaron residuos de alimentos de 5 supermercados en la región de Umbría en el centro de Italia. Se analizaron la conveniencia ambiental de producir biogás a partir de residuos alimenticios mediante dos estudios de ACV basados en diferentes enfoques. En los resultados Se mostró que se puede obtener una reducción del 42 % en la huella de carbono de la electricidad producida en una planta de biogás sustituyendo alrededor de 9900 t de ensilado de maíz por 6600 t de residuos alimenticios [48].
- Vinaza en México: Se evaluaron los impactos de las plantas de energía de digestión anaeróbica versus lagunas a cielo abierto para vinaza en México. Barrera, *et al.* [49], propusieron las mejores opciones de plantas de energía de digestión anaeróbica para vinaza. Según el ACV, se encontró que las plantas de energía de digestión anaeróbica pueden reducir el impacto ambiental en un 77 %. En parte, debido a que el 24 % del contenido de exergía de la vinaza se pudo convertir en energía útil.
- Lodos de palma de aceite en Brasil: Se muestra el ejemplo del realizado en Pará Brasil, [50]. Munasinghe, *et al.*, encontraron que las mejoras en la eficiencia de recolección, tratamiento y utilización de metano para energía (y transferencia a la red nacional) han contribuido a mejorar los indicadores ambientales. Sin embargo, en la región amazónica brasilera, el uso de energía renovable a partir de subproductos se ha visto obstaculizada debido a la falta de infraestructura o mercados para el suministro de combustibles o energía renovable. La transferencia de conocimientos de las manufacturas asiáticas maduras a las nuevas manufacturas en Brasil ayudaría a dar un salto tecnológico para que la sostenibilidad arrojada por los análisis de ciclo de vida de los proyectos pueda ofrecer resultados viables y sostenibles. Munasinghe, *et al.*, concluyeron que, además, una política gubernamental que fomente las manufacturas para la producción de energía renovable puede beneficiar el tratamiento de aguas residuales en todo el sector de la Amazonía brasilera, enfocados más en el medio ambiente que en los retornos financieros.

La evaluación del impacto social de proyectos de energía a partir de la biomasa aún se encuentra en desarrollo debido a la falta de indicadores cuantitativos [51]. El análisis social se convirtió en un desafío para los investigadores debido a la nula o baja disponibilidad de metodologías o herramientas que permitan una evaluación precisa, ya que un análisis social debe ser inclusivo, involucrando aspectos como, generación de empleo (a nivel de tierras y procesos), suministro de alimentos y salud [52]. En el caso específico de la DA, también es importante tener en cuenta desde el punto de vista social, indicadores como la disminución de olores a las comunidades vecinas, el impacto de las redes de distribución de biogás en radios pequeños para las comunidades, la disponibilidad de un biocombustible que contribuye a la diversificación fuentes energéticas.

Entender los anteriores aspectos, como se dijo, es un gran reto, y todavía no está estandarizado, pero definitivamente contribuiría a mejorar la calidad de vida de los usuarios, diversificar su matriz energética y combatir la pobreza energética. Entonces, el análisis social de una planta de DA debe realizarse utilizando una amplia variedad de indicadores contextualizados con las condiciones geopolíticas y públicas de la ubicación de la instalación. Aspectos como condiciones de trabajo dignas, actores de la cadena de valor, contribución al desarrollo comunitario, inclusión de minorías, transparencia y responsabilidad al final de la vida útil de los equipos, deben considerarse como parte de la evaluación de impacto social. Para ello, diferentes entidades internacionales, empresas, institutos y universidades han extendido el concepto de ACV desde el ámbito ambiental al social, lo que han denominado Evaluación del Ciclo de Vida Social (S-ACV). El S-ACV intenta involucrar tanto los aspectos positivos como los negativos de toda la cadena productiva. Una herramienta que está conduciendo a unificar y estandarizar los indicadores sociales es la base de datos "Product Social Impact Life Cycle Assessment (PSILCA)" desarrollada por *Greendelta* [53].

Análisis económico y ambiental de plantas de biogás en Brasil

El análisis económico y ambiental de plantas de biogás tiene que ser realizado sobre la perspectiva de rentabilidad. Las emisiones de CO₂ producto de actividades antropogénicas tienen que ser tenidas

en cuenta en el momento de realizar un análisis de inversión, de tal forma que influye en la rentabilidad final; recursos como el agua también tienen que ser considerados para análisis de viabilidad, principalmente en iniciativas de mediana y gran escala donde volúmenes grandes son utilizados principalmente en biodigestores húmedos. A continuación, es mostrado un análisis económico y ambiental realizado en plantas de diferentes tamaños con la finalidad de dar a conocer el punto de equilibrio en el cual una planta de biogás que utilice estiércoles de ganado vacuno pueda ser rentable.

En el estudio realizado por Velásquez-Piñas, *et al.* [54], fueron evaluados diferentes tamaños de plantas de biogás basados en la utilización de reactores CSTR. La idea principal fue encontrar un tamaño óptimo (en términos de la potencia) en el cual una planta de biogás en estas condiciones pueda ser rentable.

El sistema evaluado es un sistema tradicional de producción de biogás para la producción de energía eléctrica y térmica (Figura 1), la energía puede ser aprovechada para usos productivos al interior de la misma empresa ganadera, por ejemplo, para electrificación de toda la propiedad rural o para el calentamiento de becerros en épocas de invierno, pudiendo descontarse costos involucrados en esta actividad. Otra forma de conseguir una rentabilidad, podría ser la venta

de energía eléctrica directamente a través de subastas de venta de energía renovable en la cual la energía eléctrica producida puede ser inyectada directamente a la red eléctrica, debido a que la normatividad brasilera así lo permite. Un subproducto importante producido dentro de la planta de biogás es el fertilizante orgánico o también llamado biol, el cual puede ser utilizado si acaso existiera actividad agrícola vinculada a la actividad pecuaria. Otra forma de obtener beneficios del biol sería por la venta directa a productores rurales.

Los costos de inversión para diferentes tamaños de plantas de biogás y sus respectivos costos de inversión pueden ser apreciados en la Figura 2. Los datos relacionados con los costos de inversión total varían en función del tamaño de la planta de biogás, pudiendo tener plantas de biogás instalados con costos de inversión entre 8 - 9 USD/kWe y otras con costos de inversión de 3 USD/kWe. La diferencia de costos para una inversión en plantas de biogás no sigue necesariamente una tendencia lineal, sino más bien sigue una tendencia basada en el factor de escala de la inversión, en el cual, a medida que el tamaño de planta se incrementa, la inversión por cada kWe instalado puede llegar a disminuir, pudiendo esto ayudar a inversiones mayores ser más rentables para este tipo de biodigestores.

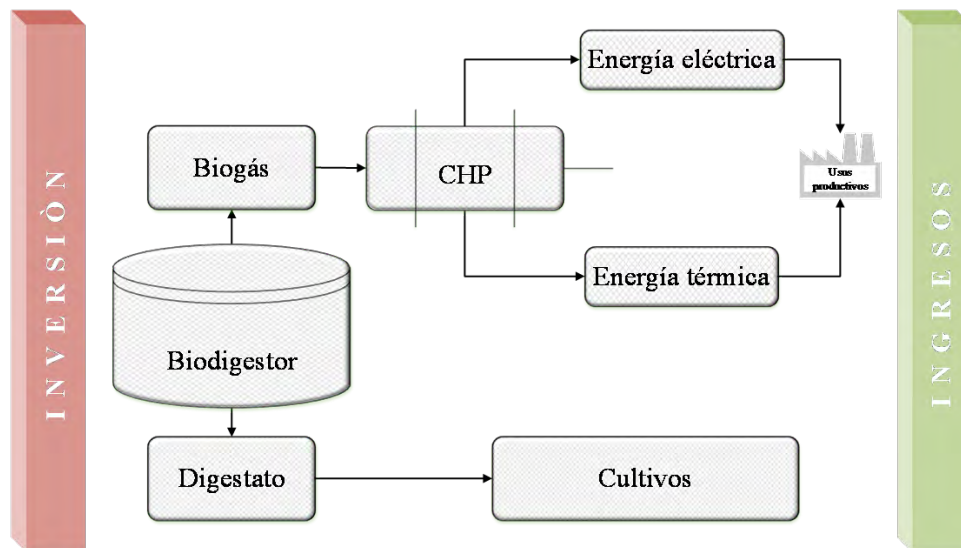


Figura 1. Esquema de un sistema tradicional de producción de biogás.
 CHP: Equipo de cogeneración de calor y electricidad.

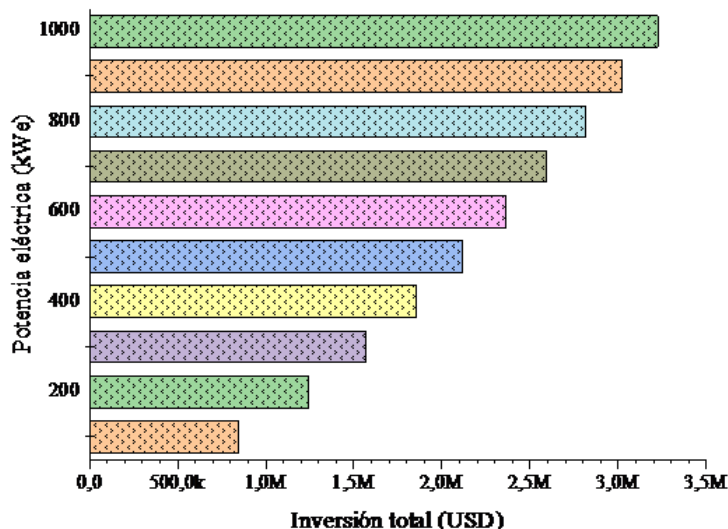


Figura 2. Costos de inversión total para diferentes unidades de producción de biogás.

Los diferentes componentes de una planta de biogás tienen que ser considerados al momento de realizar un análisis económico para ver la rentabilidad de sistemas de DA.

Este análisis del presente estudio de caso consideró la instalación de los siguientes componentes:

- Biodigestor incluyendo sistema de calefacción, CHP y accesorios de mantenimiento, tanque de homogenización, bombeo, gasómetro, desulfurador, tanque de biol, y antorcha/quemador de biogás.

El análisis realizado sobre los costos de estos componentes en relación con la inversión inicial muestra que el biodigestor y el generador de electricidad con biogás son los componentes que más efecto tienen sobre la inversión inicial de una planta de biogás, teniendo un porcentaje entre 30 – 35 % aproximadamente sobre el valor de la inversión (**Figura 3a**). Cabe resaltar que el biodigestor analizado es de concreto y tiene sistemas de agitación y de calefacción al interior para mantener la temperatura constante alrededor de 35 ± 2 °C.

Los resultados de este análisis contribuyen a generar estrategias relacionadas con los costos que podrían ser disminuidos y minimizados en caso de que se estudie la construcción de sistemas de biogás de escala productiva y familiar. Por ejemplo, se puede plantear como estrategia

disminuir el costo del biodigestor cambiando el material de este por geomembrana mucho más barata, con la particularidad de que biodigestores que utilizan geomembrana generalmente tienen costos asociados al movimiento de tierras.

Una cuestión importante que debe tenerse en cuenta, en sistemas de biogás de uso productivo y a pequeña escala, es que los generadores eléctricos a ser utilizados no necesariamente tendrían que ser sistemas CHP, pudiendo ser generadores de menor potencia y que solamente produzcan energía eléctrica, por lo que la inversión inicial para sistemas productivos y familiares podría disminuir considerablemente.

Los ingresos de una planta de DA están relacionados con los productos y subproductos (el biogás y el biol). El biogás, uno de los principales productos puede ser aprovechado para generación de energía eléctrica o para la utilización en reemplazo del GLP, principalmente en biodigestores familiares. En la actualidad otros usos están siendo considerados para el aprovechamiento de biogás, tales como la purificación del biogás para obtención de biometano, existiendo iniciativas en Brasil promovidas por diferentes instituciones [55], que están trabajando en la regulación para conseguir la rentabilidad en la utilización de biometano. Este biometano obtenido sería utilizado en vehículos o inyectado a la red de gas natural.

La utilización del biol como fertilizante también está siendo una práctica común para los agricultores

de forma que puedan sustituir los fertilizantes químicos, altamente tóxicos y contaminantes, por fertilizantes orgánicos, que aportan micro y macronutrientes, además de materia orgánica estabilizada. Sin embargo, como se puede apreciar en la **Figura 3b** los ingresos en relación con la venta del biol como fertilizante representan un poco más del 20 % de los ingresos en una planta de biogás. Es importante resaltar que generalmente,

es la fracción sólida del fertilizante la que puede ser comercializada y la fracción líquida puede ser reutilizada en el biodigestor en reemplazo del agua, disminuyendo de esta forma, los impactos ambientales asociados a la utilización de este recurso, cada vez más escaso. Es de esperarse que a mediano plazo los ingresos relacionados a beneficios ambientales por dejar de emitir gases de efecto invernadero sean más valorados.

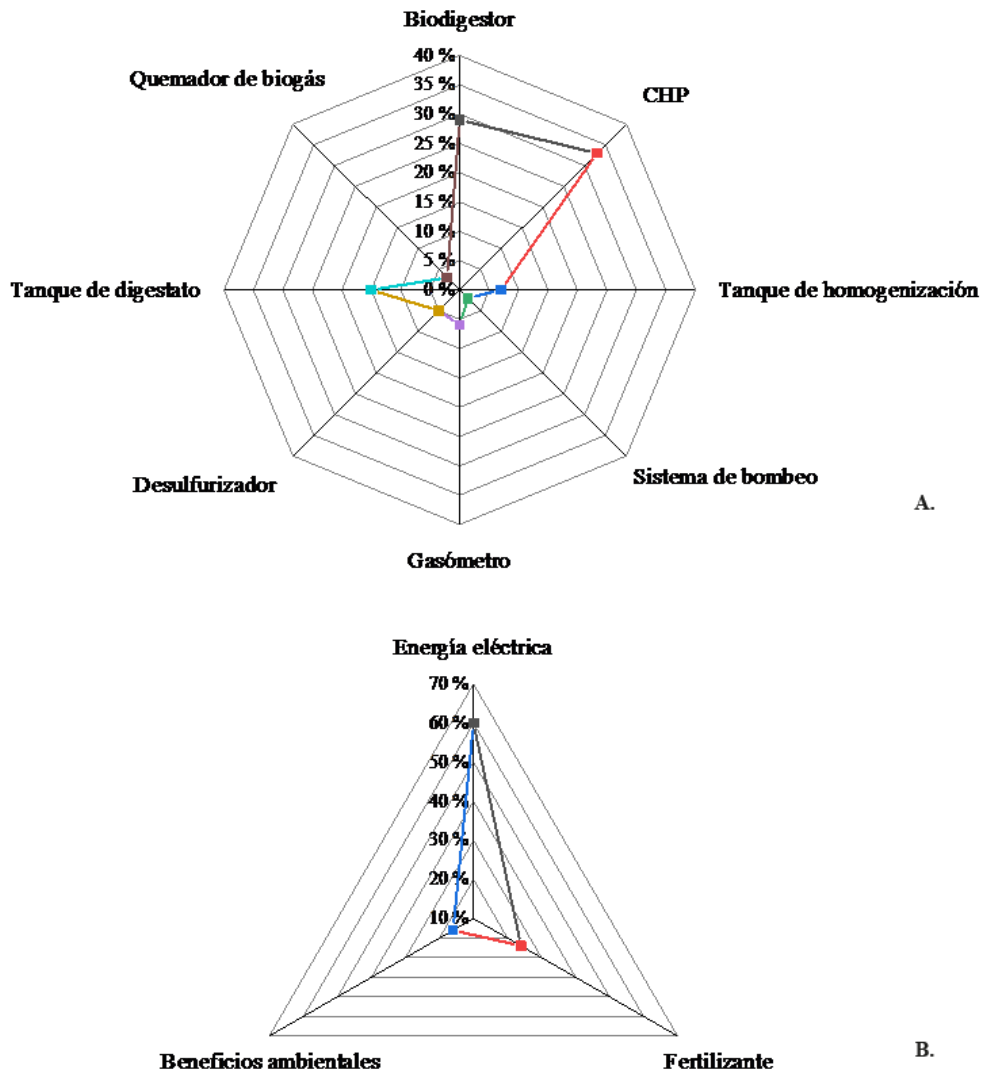


Figura 3. a. Distribución porcentual de los costos de inversión de una planta de biogás. **b.** Distribución porcentual de los principales ingresos en una planta de biogás.

Con relación al análisis de inversión para plantas de biogás de escala industrial es posible ver que la rentabilidad se da principalmente para sistemas de mayor escala superiores a 800 kW instalado (Figura 4). Es bueno mencionar que los proyectos a gran escala pueden tener divergencias notables con la rentabilidad ambiental y social. Diferente a lo que se presenta en las plantas de biogás a escala productiva y familiar, debido a que a escala industrial son considerados, principalmente, los beneficios económicos por la venta de energía, fertilizante y la venta de emisiones certificadas carbono del proyecto al precio de mercado. Sin embargo, estos proyectos pueden tener beneficios ambientales indirectos que no necesariamente son considerados y, que análisis más profundos como el análisis de ciclo de vida, podría mostrar en relación a la reducción de impactos ambientales en sistemas bióticos, abióticos, reducción del uso de recursos fósiles, disminución del uso de fertilizantes en plantaciones agrícolas y consecuente mejora del suelo, y disminución del efecto invernadero antropogénico.

Finalmente, debido a que buena parte de los sistemas de DA son actividades complementarias al negocio principal de agroindustrias que necesitan tratamiento de residuos, ya sean estos de origen agrícola, pecuaria o agroindustrial, los consumidores pueden verse más atraídos por una u otra empresa que muestre ventajas competitivas relacionadas a la buena gestión de los residuos y/o disminución de los impactos ambientales de la actividad principal. Por ejemplo, cuando los consumidores prefieran productos con una menor huella de ecológica, o productos que tengan un ACV optimizado. Por otro lado, desde el lado de los gobiernos sería necesario que se establezcan

políticas públicas que otorguen beneficios tributarios a las empresas del agronegocio, las pymes y otros negocios que realicen la adecuada gestión de residuos orgánicos.

Análisis multicriterio para biogás doméstico/familiar en asentamientos rurales en Brasil

Soberanía energética rural y biodigestores familiares. Muchos estudios consideran al GLP como una fuente de combustible limpio en comparación con los combustibles sólidos de biomasa [56]. Sin embargo, se debe reconocer que no es un producto sostenible y en tiempos de crisis económica, o por las distancias a puntos de acceso en zonas rurales, su adquisición es más difícil. En este sentido, nace la creciente necesidad de la soberanía energética, que diversifique fuentes de energía y brinden regularidad, calidad e inocuidad, siendo abordada desde un contexto de ruralidad "soberanía energética rural".

El concepto de soberanía energética ha sido ampliamente discutido en décadas pasadas, siendo su discusión centrada principalmente en grandes grupos de poblaciones o países. Sin embargo, existe una creciente discusión en relación con la soberanía energética rural la cual, puesta en la práctica, puede otorgar a las comunidades el derecho de decidir sobre los sistemas energéticos a utilizar, así como las fuentes, escalas y formas de propiedad que caracterizan el acceso a los servicios energéticos [57]. La soberanía energética se describe como un componente crítico necesario que garantice resiliencia a través de sistemas energéticos resistentes a condiciones económicas adversas, especialmente para las poblaciones más vulnerables [58].

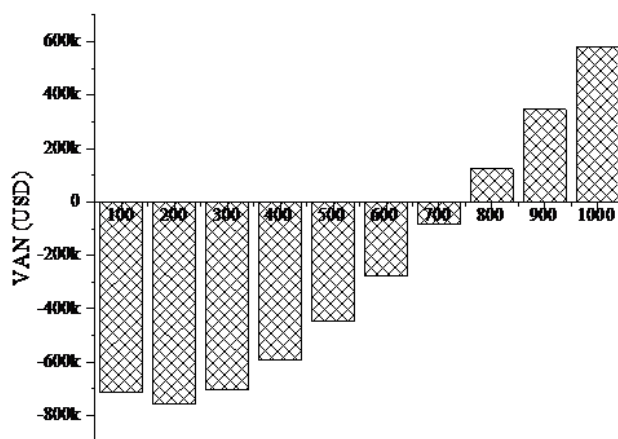


Figura 4. Análisis económico basado en el VAN para plantas de biogás de diferentes potencias instaladas en Kw.

Análisis multicriterio y perspectivas para aplicación en biodigestores familiares.

Los análisis tradicionales para evaluar la rentabilidad de proyectos de DA tienen en cuenta apenas análisis técnicos y económicos, y sólo a veces incluye análisis ambientales. Si se toma exclusivamente en cuenta criterios técnicos y económicos para analizar iniciativas de biogás, pequeños proyectos no contarían con un retorno financiero al final de la vida útil del proyecto. Sin embargo, para conseguir hacer sostenibles estos proyectos e iniciativas con DA, además de criterios técnicos y económicos, se debe de contar con criterios que involucren análisis complementarios enmarcados en el componente ambiental y principalmente en el componente social. Es así como, dentro de un análisis de toma de decisiones en proyectos de DA deben utilizarse criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales, para evaluar el desempeño de todas las alternativas. Hay que dar ponderaciones (peso) a los diferentes criterios utilizados de acuerdo con su relevancia, la cual puede ser definida por el tomador de decisiones, siendo estas ponderaciones representaciones numéricas basadas en la información y la experiencia. El análisis multicriterio proporciona una puntuación numérica o clasificación asignada a una alternativa particular para cada criterio. Por lo general, una alternativa no cumple todos los criterios importantes; por lo tanto, las alternativas que son más beneficiosas generalmente son más caras [59], esto debido a que factores asociados a componentes ambientales y sociales pueden haberse incluido, lo que da lugar no solamente a rentabilidad financiera de estas alternativas, si no, a una rentabilidad social y ambiental al incluir dentro del esquema de negocio estos componentes.

El análisis multicriterio puede ayudar a responder algunas de las preguntas sobre el beneficio que puede traer la implementación de tecnologías de pequeña escala, por ejemplo, en asentamientos rurales de la reforma agraria, siendo una herramienta que puede ayudar en la promoción de diferentes tecnologías de biogás basadas en diversos criterios socioeconómicos y ambientales, capaces de abordar estos temas [60]. El análisis multicriterio, además, permite la priorización de alternativas en una situación de criterios contradictorios, buscando satisfacer las restricciones con objetivos conflictivos, es decir, una solución de compromiso.

Actualmente varios estudios han evidenciado el análisis multicriterio aplicado para energía, biocombustibles y biogás [59–64]. Sin embargo,

los análisis multicriterio desarrollados hasta el momento no evidencian toda la potencialidad que puede aportar la implementación de tecnologías de DA en asentamientos rurales de la reforma agraria, siendo necesario conocer con detalle los beneficios sociales, económicos y ambientales en estos contextos. En este sentido, se hace necesario que el análisis multicriterio se torne como una herramienta para contribuir con el desarrollo de iniciativas de DA principalmente en biodigestores domésticos rurales, lo cuales tienen un beneficio social directo y aplicados en asentamientos rurales, pueden consolidar esta tecnología de forma armoniosa y amigable con el medio ambiente, creando un modelo de sostenibilidad que pueden ser fácilmente incorporados en programas nacionales de biogás, proyectos territoriales, y de agricultura ecológica con pequeños agricultores.

Conclusiones

En Latinoamérica los procesos de DA se caracterizan por tener un régimen descentralizado a base de residuos agropecuarios, baja TCO y una limitada productividad de biogás. La gestión operativa de estos procesos está supeditada en su mayoría, en la experiencia del operador, lo que resulta en prácticas de gestión no estandarizadas, bajo nivel de automatización e inestabilidad de los procesos. Por lo tanto, los esfuerzos deben enfocarse en la capacitación de los operarios y en la estandarización de los procesos para garantizar el éxito operativo de estos proyectos.

Para la decisión final de implementación de un proyecto de biogás, comúnmente son considerados indicadores económicos tradicionales como VAN y TIR, siendo importante analizar el comportamiento de algunos de los indicadores en relación con los diversos escenarios del proyecto, tal es el caso del precio de la energía eléctrica que podría fluctuar dependiendo de los recursos disponibles en la matriz energética de los países, siendo una opción la utilización directa o autoconsumo en condominios en lugar de vender la electricidad a través de subastas estatales, pudiendo tener un ahorro de hasta 5 veces cuando se utiliza directamente en comparación de cuando la electricidad es vendida en subastas.

En la actualidad existe una tendencia a utilizar las plantas de DA, no solamente para la producción de electricidad, sino para la purificación de efluentes y producción de biometano.

El biometano, producto de la purificación del biogás, podría ser utilizado como fuente energética para inyección en las redes de gas natural o utilización como combustible vehicular. En este sentido, existen iniciativas de países como Brasil en fomentar su uso a través de programas de estímulo económico.

Cada análisis económico y ambiental tiene que ser realizado de forma individual, no pudiendo interpolar los resultados y menos ser extrapolados para otros escenarios, esto debido a la particularidad de cada proyecto.

Existen múltiples particularidades y detalles en un análisis económico, que involucran componentes técnicos (características de la biomasa) y ambientales (temperatura de la zona) que afectan la disponibilidad de la tecnología de DA.

La información que ofrecen los ACV (inventarios, impactos potenciales, la capacidad de recuperación de energía y los factores de impacto ambiental) ayudan significativamente a enriquecer la base de datos sobre el tratamiento de residuos orgánicos.

Los estudios de ACV ayudan a comparar la sostenibilidad ambiental de diferentes tecnologías de gestión adecuada de residuos. Los resultados de los ACVs ayudarán a los legisladores a tomar decisiones con respecto a los problemas ambientales.

Finalmente, un análisis social tiene que ser incluido dentro del análisis de sostenibilidad de forma que, a través de un análisis multicriterio pueda tenerse en consideración. Es así como no solamente componentes técnicos y económicos sean tomados en consideración, sino también componentes ambientales y sociales, para de esta forma, conseguir una verdadera sostenibilidad de proyectos de DA.

Conflictos de intereses

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de la información presentada.

Referencias

[1] Rundlöf M, Smith H G, Birkhofer K. Effects of Organic Farming on Biodiversity. *eLS*. 2016;1–7. doi.org/10.1002/9780470015902.A0026342

[2] Alonso-Gómez LA, Avila-Parrado P, Rodríguez-Rojas MP, Espinosa-Solares T. Potencial

bioquímico de metano de las cáscaras de cacao en codigestión con estiércol bovino. *RedBioLAC*. 2020;4:113-118.

- [3] Matheri AN, Mbohwa C, Belaid M, Seodigeng T, Ngila JC. Design Model Selection and Dimensioning of Anaerobic Digester for the OFMSW. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science Vol. 2*; 2016 oct 19-21; San Francisco, USA. *Lect. Notes Eng. Comput. Sci*; 2016.
- [4] Seadi TAI, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, *et al*. *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg Niels, Bohrs Vej 9-10, DK-6700; 2008.
- [5] Kulkarni I, Zang JW, Leandro WM, Parikh P, Adler I, Da Fonseca-Zang WA, *et al*. Closed-Loop Biodigesters on Small-Scale Farms in Low- and Middle-Income Countries: A Review. *Water*. 2021;13(19):2744. doi.org/10.3390/W13192744
- [6] Samanez CP. *Engenharia Econômica*. São Paulo, Brasil: Pearson Prentice Hall; 2009.
- [7] Gomes HP. *Avaliação Econômica: Eficiência Energética*. Brasil: Universidade Federal da Paraíba (UFPB); 2014.
- [8] Albrecht FG, König DH, Baucks N, Dietrich RU. A Standardized Methodology for the Techno-Economic Evaluation of Alternative Fuels – A Case Study. *Fuel*. 2017;194:511–526. doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.12.003
- [9] Alonso-Gómez LA, Solarte-Toro JC, Bello-Pérez, LA, Cardona-Alzate CA. Performance Evaluation and Economic Analysis of the Bioethanol and Flour Production Using Rejected Unripe Plantain Fruits (*Musa Paradisiaca L.*) as Raw Material. *Food Bioprod. Process*. 2020;121:29–42. doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.005
- [10] Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport. Weidner E, Jakubcionis M, Vallei M, Sigfusson B, Jäger-Waldau A, Lacal Arántegui R, *et al*. *Energy Technology Reference Indicator (ETRI) projections for 2010-2050*. Luxemburgo: Publications Office of the European Union; 2014. doi.org/10.2790/057687
- [11] Karellas S, Boukis I, Kontopoulos G. Development of an Investment Decision Tool for Biogas Production from Agricultural Waste. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2010;14(4):1273–1282. doi.org/10.1016/j.rser.2009.12.002
- [12] Solarte-Toro JC, Rueda-Duran CA, Ortiz-Sanchez M, Cardona Alzate CA. A

- Comprehensive Review on the Economic Assessment of Biorefineries: The First Step towards Sustainable Biomass Conversion. *Bioresour. Technol. Reports*. 2021;15:100776. doi.org/10.1016/J.BITEB.2021.100776
- [13] Garcia-Nunez JA, Rodriguez DT, Fontanilla CA, Ramirez NE, Silva Lora EE, Frear CS, *et al.* Evaluation of Alternatives for the Evolution of Palm Oil Mills into Biorefineries. *Biomass and Bioenergy*. 2016;95:310–329. doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2016.05.020
- [14] Alzate S, Restrepo-Cuestas B, Jaramillo-Duque Á. Municipal Solid Waste as a Source of Electric Power Generation in Colombia: A Techno-Economic Evaluation under Different Scenarios. *Resources*. 2019;8(1):51 doi.org/10.3390/resources8010051
- [15] UNFCCC. ACUERDO DE PARÍS. Paris, Francia: Naciones Unidas; 2015.
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report - AR4, 1st ed.; IPCC. 996p., 2007.
- [17] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. The Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report - AR4, Errata.; IPCC. pp.1-6, 2012.
- [18] Valencia GE, Obregón LG, Cardenas YE. Multi-Objective Analysis of a CHP System Using Natural Gas and Biogas on the Prime Mover. *Chem. Eng. Trans*. 2018;65:313–318. doi.org/10.3303/CET1865053
- [19] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília-DF: ANEEL; 2015.
- [20] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa Nº 482/2012. Brasil; 2012.
- [21] Nielsen HB, Angelidaki I. Congestion of Manure and Industrial Organic Waste at Centralized Biogas Plants: Process Imbalances and Limitations. *Water Sci. Technol*. 2008;58(7):1521–1528. doi.org/10.2166/wst.2008.507
- [22] Polifacio M, Murphy JD. Anaerobic Digestion in Ireland: Decision Support System. *Dep. Civil, Struct. Environ. Eng. Cork Inst. Technol. Irel*. 2007.
- [23] Weiland P. Production and Energetic Use of Biogas from Energy Crops and Wastes in Germany. *Appl. Biochem. Biotechnol. - Part A Enzym. Eng. Biotechnol*. 2003;109(1–3):263–274. doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:263
- [24] Pieper DH, Vilchez-Vargas R, Jáuregui R, Boon N, Roume H, Raport L, *et al.* The Full-Scale Anaerobic Digestion Microbiome Is Represented by Specific Marker Populations. *Water Res*. 2016;104:101–110. doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.008
- [25] Otuzalti MM, Perendeci NA. Modeling of Real Scale Waste Activated Sludge Anaerobic Digestion Process by Anaerobic Digestion Model 1 (ADM1). *Int. J. Green Energy*. 2018;15(7):454–464. doi.org/10.1080/15435075.2018.1479265
- [26] Wang M, Chen S, Han Y, Chen L, Wang D. Responses of Soil Aggregates and Bacterial Communities to Soil-Pb Immobilization Induced by Biofertilizer. *Chemosphere*. 2019;220:828–836. doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.12.214
- [27] Cecchi F, Cavinato C. Smart Approaches to Food Waste Final Disposal. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019;16(16):2860. doi.org/10.3390/ijerph16162860
- [28] Michailos S, Walker M, Moody A, Poggio D, Pourkashanian M. Biomethane Production Using an Integrated Anaerobic Digestion, Gasification and CO₂ Biomethanation Process in a Real Waste Water Treatment Plant: A Techno-Economic Assessment. *Energy Convers. Manag*. 2020;209:112663. doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112663
- [29] Chao R, Sosa R, Pérez AA, Cruz E. A Study on Pig Wastewater Treatment with Low Cost Biodigesters. *Livest. Res. Rural Dev*. 2008;20:149.
- [30] Lansing S, Viquez J, Martínez H, Botero R, Martin J. Quantifying Electricity Generation and Waste Transformations in a Low-Cost, Plug-Flow Anaerobic Digestion System. *Ecol. Eng*. 2008;34(4):332–348. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.002
- [31] Garfí M, Ferrer-Martí L, Perez I, Flotats X, Ferrer I. Codigestion of Cow and Guinea Pig Manure in Low-Cost Tubular Digesters at High Altitude. *Ecol. Eng*. 2011;37(12):2066–2070. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018

- [32] Martí-Herrero J, Ceron M, Garcia R, Pracejus L, Alvarez R, Cipriano X. The Influence of Users' Behavior on Biogas Production from Low Cost Tubular Digesters: A Technical and Socio-Cultural Field Analysis. *Energy Sustain. Dev.* 2015;27:73–83. doi.org/10.1016/j.esd.2015.05.003
- [33] Ferrer I, Gamiz M, Almeida M, Ruiz A. Pilot Project of Biogas Production from Pig Manure and Urine Mixture at Ambient Temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Manag.* 2009;29(1):168–173. doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.014
- [34] Martí-Herrero J, Alvarez R, Cespedes R, Rojas MR, Conde V, Aliaga L, *et al.* Cow, Sheep and Llama Manure at Psychrophilic Anaerobic Co-Digestion with Low Cost Tubular Digesters in Cold Climate and High Altitude. *Bioresour. Technol.* 2015;181:238–246. doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.063
- [35] Li L, Peng X, Wang X, Wu D. Anaerobic Digestion of Food Waste: A Review Focusing on Process Stability. *Bioresour. Technol.* 2018;248(174):20–28. doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.012
- [36] Carballa M, Regueiro L, Lema JM. Microbial Management of Anaerobic Digestion: Exploiting the Microbiome-Functionality Nexus. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2015;33:103–111. doi.org/10.1016/j.copbio.2015.01.008
- [37] Wu D, Li L, Zhao X, Peng Y, Yang P, Peng X. Anaerobic Digestion: A Review on Process Monitoring. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019;103:1–12. doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.039
- [38] Galván-Arzola U, Miramontes-Martínez LR, Escamilla-Alvarado C, Botello-Álvarez JE, Alcalá-Rodríguez MM, Valencia-Vázquez R, *et al.* Anaerobic Digestion of Agro-Industrial Waste: Anaerobic Lagoons in Latin America. *Rev. Mex. Ing. Química.* 2022;21(2):2680. doi.org/10.24275/rmiq/IA2680
- [39] Gutierrez EC, Xia A, Murphy JD. Can Slurry Biogas Systems Be Cost Effective without Subsidy in Mexico? *Renew. Energy.* 2016;95:22–30. doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.096
- [40] SENER. Reporte de Ingeniería Tecnológica: Biocombustibles Gaseosos. México: Instituto Mexicano del Petróleo; 2018.
- [41] Falconer RE, Haltas I, Varga L, Forbes PJ, Abdel-Aal M, Panayotov N. Anaerobic Digestion of Food Waste: Eliciting Sustainable Water-Energy-Food Nexus Practices with Agent Based Modelling and Visual Analytics. *J. Clean. Prod.* 2020;255:120060. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120060
- [42] Pérez-Camacho MN, Curry R, Cromie T. Life Cycle Environmental Impacts of Substituting Food Wastes for Traditional Anaerobic Digestion Feedstocks. *Waste Manag.* 2018;73:140–155. doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.023
- [43] Moncada B. J, Aristizábal M. V, Cardona A. CA. Design Strategies for Sustainable Biorefineries. *Biochem. Eng. J.* 2016;116:122–134. doi.org/10.1016/J.BEJ.2016.06.009
- [44] Reza B, Sadiq R, Hewage K. Sustainability Assessment of Flooring Systems in the City of Tehran: An AHP-Based Life Cycle Analysis. *Constr. Build. Mater.* 2011;25(4):2053–2066. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.041
- [45] Jin Y, Chen T, Chen X, Yu Z. Life-Cycle Assessment of Energy Consumption and Environmental Impact of an Integrated Food Waste-Based Biogas Plant. *Appl. Energy.* 2015;151:227–236. doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.04.058
- [46] GreenDelta.OpenLCA. Disponible en: https://www.openlca.org/software/ Acceso el 30 de julio 2021.
- [47] Aziz NIHA, Hanafiah MM. Life Cycle Analysis of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Palm Oil Mill Effluent. *Renew. Energy.* 2020;145:847–857. doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.06.084
- [48] Bartocci P, Zampilli M, Liberti F, Pistolesi V, Massoli S, Bidini G, *et al.* LCA Analysis of Food Waste Co-Digestion. *Sci. Total Environ.* 2020;709:136187. doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136187
- [49] Barrera EL, Rosa E, Spanjers H, Romero O, De Meester S, Dewulf, J. A Comparative Assessment of Anaerobic Digestion Power Plants as Alternative to Lagoons for Vinasse Treatment: Life Cycle Assessment and Exergy Analysis. *J. Clean. Prod.* 2016;113:459–471. doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.095
- [50] Munasinghe M, Jayasinghe P, Deraniyagala Y, Matlaba VJ, Santos JFD, Maneschy MC, *et al.* Value-Supply Chain Analysis (VSCA) of Crude Palm Oil Production in Brazil, Focusing on Economic, Environmental and Social Sustainability. *Sustain. Prod. Consum.*, 2019;17:161–175. doi.org/10.1016/j.spc.2018.10.001

- [51] Cadena E, Rocca F, Gutierrez JA, Carvalho A. Social Life Cycle Assessment Methodology for Evaluating Production Process Design: Biorefinery Case Study. *J. Clean. Prod.* 2019;238:117718. doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117718
- [52] Cardona-Alzate CA, Moncada B. J, Aristizábal-Marulanda V. Social Analysis of Biorrefineries. In: *BIOREFINERIES: design and analysis*. Boca Raton, United States: CRC PRESS; 2018. doi.org/10.1201/9781315114088
- [53] Citroth A, Eisfeldt F. PSILCA-A Product Social Impact Life Cycle Assessment Database. Database Version 1.0. Green Delta; 2016.
- [54] Velásquez Piñas JA, Venturini OJ, Silva Lora EE, del Olmo OA, Calle Roalcaba OD. An Economic Holistic Feasibility Assessment of Centralized and Decentralized Biogas Plants with Mono-Digestion and Co-Digestion Systems. *Renew. Energy.* 2019;139:40–51. doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.053
- [55] De Oliveira LGS, Negro SO. Contextual Structures and Interaction Dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019;107:462–481. doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.030
- [56] Cerqueira PLW, Aisse MM. Custos de Processamento de Lodo Em Estações de Tratamento de Esgoto Com Reatores Anaeróbios de Manto de Lodo e Pós-Tratamento Aeróbio: Subsídios Para Estudos de Concepção. *Eng. Sanit. e Ambient.* 2021;26(2):251–262. doi.org/10.1590/S1413-415220190244
- [57] Schelly C, Bessette D, Brosemer K, Gagnon V, Arola KL, Fiss A, *et al.* Energy Policy for Energy Sovereignty: Can Policy Tools Enhance Energy Sovereignty? *Sol. Energy.* 2020;205:109–112. doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.056
- [58] Brosemer K, Schelly C, Gagnon V, Arola KL, Pearce JM, Bessette D, *et al.* The Energy Crises Revealed by COVID : Intersections of Indigeneity, Inequity, and Health. *Energy Res. Soc. Sci.* 2020;68:101661. doi.org/10.1016/j.erss.2020.101661
- [59] Nwokoagbara E, Olaleye AK, Wang M. Biodiesel from Microalgae: The Use of Multi-Criteria Decision Analysis for Strain Selection. *Fuel.* 2015;159:241–249. doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.074
- [60] Rao B, Mane A, Rao AB, Sardeshpande V. Multi-Criteria Analysis of Alternative Biogas Technologies. *Energy Procedia.* 2014;54:292–301. doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.272
- [61] Pohekar SD, Ramachandran M. Application of Multi-Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning - A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2004;8(4):365–381. doi.org/10.1016/j.rser.2003.12.007
- [62] Feiz R, Ammenberg J. Assessment of Feedstocks for Biogas Production, Part I—A Multi-Criteria Approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017;122:373–387. doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.019
- [63] Madlener R, Henggeler C, Dias LC. Assessing the Performance of Biogas Plants with Multi-Criteria and Data Envelopment Analysis. *Eur. J. Oper. Res.* 2009;197(3):1084–1094. doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.051
- [64] Nzila C, Dewulf J, Spanjers H, Tuigong D, Kiriamiti H, Van Langenhove H. Multi Criteria Sustainability Assessment of Biogas Production in Kenya. *Appl. Energy.* 2012;93:496–506. doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.020