

2



EL BIOGÁS

2. EL BIOGÁS

La producción de gases en procesos de descomposición (CH_4 , NH_3 , H_2S , CO_2 , etc.) a partir de la materia orgánica y el uso de metano como fuente energética se conoce desde hace cientos de años. En el siglo XVI, el científico naturista Alessandro Volta, realizó los primeros experimentos de combustión de gas producido en pantanos. En el siglo XVII, los científicos Bechamp y Popoff describen por primera vez la biología de la producción de metano. En el siglo XIX, el renombrado científico Louis Pasteur realizó los primeros experimentos de producción de biogás a partir de estiércol de vacuno y descubrió en conjunto con Hoppe-Seyler la producción microbiológica de CH_4/CO_2 a partir de acetato. La primera documentación respecto a una planta de biogás data del año 1897, donde se describe la construcción de una planta en un hospital de leprosos en Bombay, India, y se describe el uso de residuos orgánicos y rastrojos agrícolas como sustratos utilizados en la generación de biogás, el cual era utilizado para generar luz con lámparas a gas. Recién en 1907 se describe por primera vez el uso de biogás en un motor a combustión para la generación de energía eléctrica.

2.1 Conceptos básicos en la producción de biogás

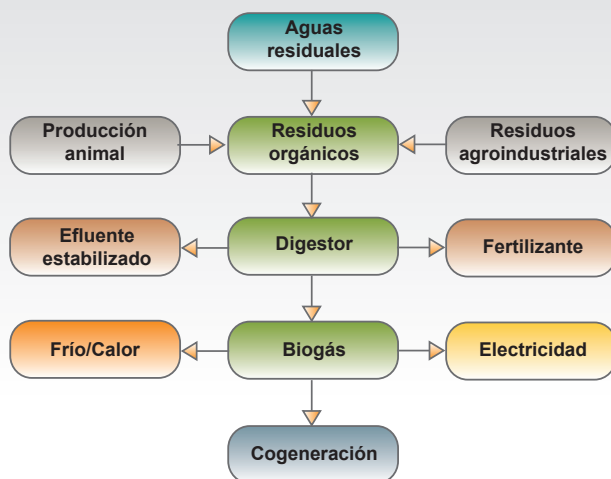
La digestión anaerobia es un proceso que puede ser utilizado como un método para recuperar energía y nutrientes contenidos en la fracción biodegradable de la materia orgánica. La biomasa utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato orgánico. El proceso está mediado por la acción de un grupo de bacterias específicas, que en ausencia de oxígeno, transforman la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano y CO_2 , conocida como biogás y en un residuo denominado digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación. El proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás se realiza normalmente en estanques herméticamente cerrados, denominados reactores, y presenta beneficios económicos y ambientales como consecuencia de la descomposición de los sustratos orgánicos, y la consecuente producción de energía.

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos y agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de productos agropecuarios. Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o conjunta, mediante lo que se denomina co-digestión. La digestión anaerobia también es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias agroalimentarias, que en Chile generalmente se clasifican como residuos industriales líquidos (riles).

La promoción e implantación de sistemas de producción de biogás colectivos (grupos de agricultores o campesinos), y de co-digestión (tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes, usualmente agropecuarios e industriales) permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales.

El siguiente esquema resume algunos insumos y productos del proceso de digestión anaerobia.

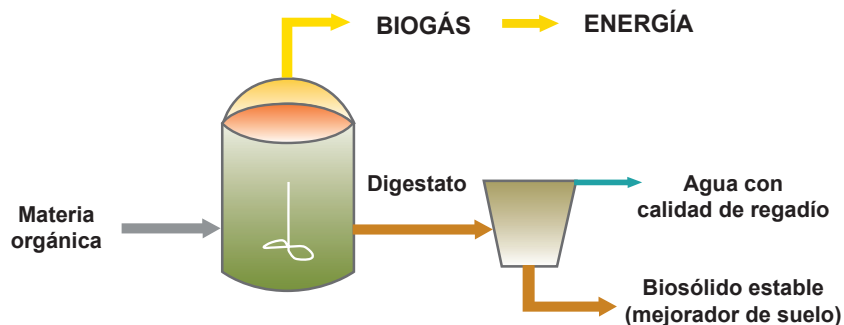
Figura 4: Insumos y productos del proceso de digestión anaerobia



Fuente: Adaptado de IDAE

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos, con las únicas premisas que: contengan material biodegradable, tengan una composición y concentración relativamente estable y no contengan sustancias con efecto bactericida o inhibitorias del proceso anaerobio. La co-digestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo si son compensadas por las características de otro.

Figura 5: Esquema básico del proceso de digestión anaerobia



Fuente: Elaboración propia

Tal como se muestra en la Figura 5, como producto de la digestión anaerobia de la materia orgánica se obtiene biogás de elevado poder energético, y un producto estabilizado, mezcla de agua y sólidos, que se conoce como lodo digerido o digestato resultante del crecimiento microbiano, que contiene materia no orgánica, materia orgánica no digerida, biomasa bacteriana y los nutrientes que se encuentran en la materia orgánica digerida. Este digestato puede tener uso en la agricultura como fertilizante orgánico (biofertilizante) o en la recuperación de suelos degradados.

2.2 Características del biogás

El biogás producido por la descomposición microbiológica está compuesto principalmente por metano y por dióxido de carbono. Dependiendo de los contenidos de grasas, carbohidratos y proteínas de los distintos sustratos, la fracción de metano contenida en el biogás varía entre 50% y 75% en volumen. En la Tabla 2 pueden observarse los principales componentes del biogás y los rangos en que varían sus diferentes concentraciones.

Tabla 2: Composición del biogás según el origen del sustrato utilizado

Componente	Residuos agrícolas y ganaderos	Lodos de EDAR	Residuos industriales	Vertederos de RSU
CH ₄	50 - 80%	50 - 80%	50 - 70%	45 - 65%
CO ₂	30 - 50%	20 - 50%	30 - 50%	34 - 55%
N ₂	0 - 1%	0 - 3%	0 - 1%	0 - 20%
O ₂	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	0 - 5%
H ₂	0 - 2%	0 - 5%	0 - 2%	0 - 1%
CO	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	Trazas
H ₂ S	100 – 7.000 ppm	0 - 1%	0 - 8%	0.5 – 100 ppm
NH ₃	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación
Orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm

Fuente: CIEMAT

Como se observa en la tabla anterior, el biogás, además de metano, contiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas, tales como agua, ácido sulfhídrico y otros compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Según el uso final que se proyecte para el biogás producido, se le deben realizar distintos tratamientos con el fin de eliminar los compuestos no deseados, aspecto que se analiza en el capítulo 3 de la presente guía.

2.3 Fases de la digestión anaerobia

La bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios es mucho más compleja que la de los procesos aerobios debido al gran número de rutas que puede utilizar una comunidad anaerobia para la biodigestión de la materia orgánica. Estas rutas no se conocen en profundidad, pero, en los últimos años, se ha avanzado mucho en las líneas de investigación de este proceso.

El proceso de digestión anaerobia de la materia orgánica involucra un amplio número de reacciones bioquímicas y de microorganismos, y se divide en cuatro fases:

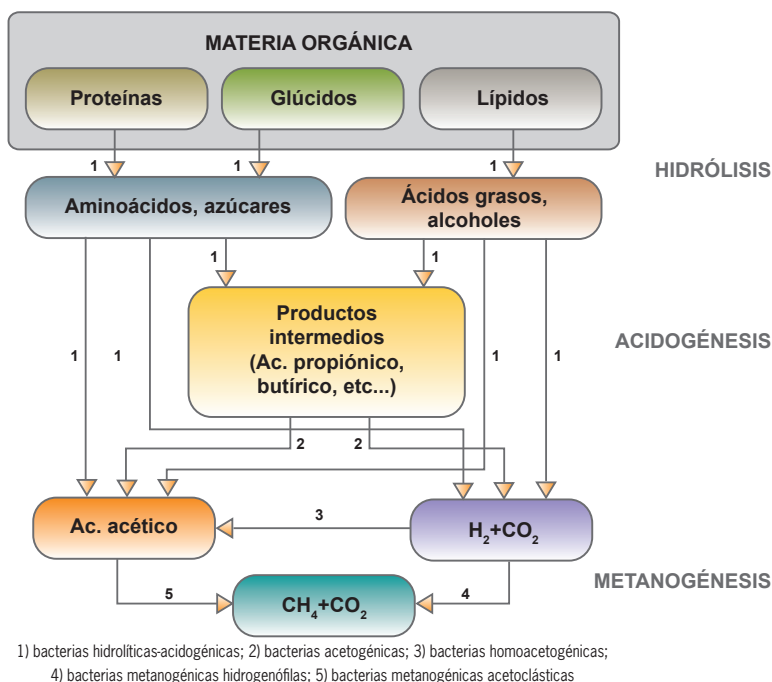
- Hidrólisis.
- Etapa fermentativa o acidogénica.
- Etapa acetogénica.
- Etapa metanogénica.

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que son fermentados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir del ácido acético, H_2 y CO_2 .

En el proceso intervienen cinco grandes poblaciones de microorganismos. Las poblaciones bacterianas involucradas en cada una de las fases cumplen roles específicos y requieren condiciones ambientales apropiadas para su crecimiento y viabilidad, condiciones que son diferentes para cada fase. Esto implica que cada fase presentará diferentes velocidades de reacción según la composición del sustrato, y que el desarrollo estable del proceso global requerirá de un equilibrio que evite la acumulación de compuestos intermedios inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que podría producir una disminución del pH. Para la estabilidad del pH es importante el equilibrio del CO_2 -bicarbonato. La mantención y estabilidad de estas condiciones al interior de los reactores utilizados para la digestión anaerobia representa, entonces, el desafío principal de toda la operación para este tipo de plantas.

En la Figura 6 se muestran esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaerobia, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

Figura 6: Fases del proceso de digestión anaerobia

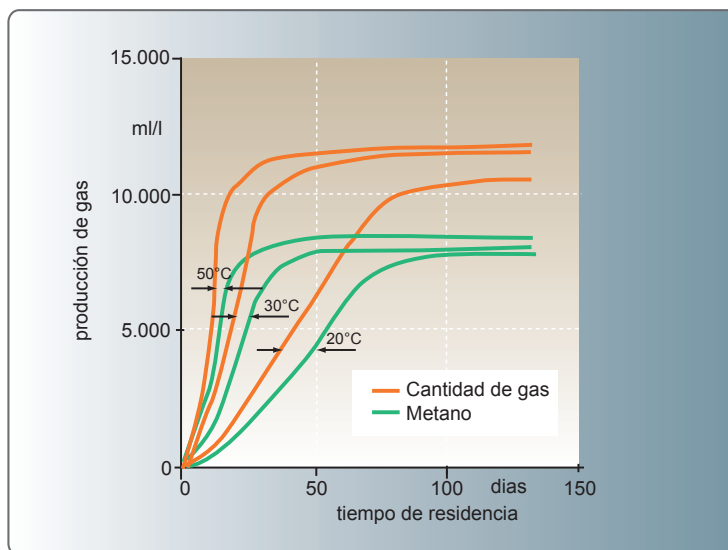


Fuente: IDAE

Los principales factores que condicionan el proceso microbiológico son:

- **Concentración de oxígeno:** Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, es decir, el oxígeno para ellas constituye un elemento tóxico. No obstante, dado que en general todos los procesos se realizan en un solo reactor y las poblaciones bacterianas encargadas de las distintas etapas cohabitan, en caso de producirse ingreso de oxígeno al reactor, éste puede ser consumido por las bacterias hidrolíticas y acidogénicas, ya que éstas son bacterias facultativas (pueden crecer en presencia o ausencia de oxígeno). Si es necesario adicionar pequeñas dosis de aire para la desulfurización biológica, dicha adición debe ser muy controlada para evitar la presencia de oxígeno en el medio líquido.
- **Temperatura:** Este factor es crucial para asegurar la eficiencia del proceso de degradación de la materia orgánica. Las bacterias metanogénicas involucradas en el proceso de descomposición presentan diferentes velocidades de degradación de la materia orgánica en función de la temperatura. Dependiendo del rango de temperatura en el que las bacterias se desarrollen, se distingue entre bacterias psicrófilas (hasta los 25°C, bajo grado de actividad bacteriana); bacterias mesófilas (32°C a 42°C, grado de actividad mediano) y bacterias termófilas (50°C a 57°C, grado de actividad alto). Como muestra la Figura 7, a mayor temperatura, mayor es la velocidad de degradación y la producción final alcanzada. En general, las plantas productoras de biogás trabajan en el rango mesofílico, dado que en el rango termofílico, si bien se tiene una mayor actividad microbiana, el proceso es más inestable y la operación es por lo mismo más compleja y costosa.

Figura 7: Temperaturas del proceso de digestión anaerobia



Fuente: Schulz y Eder

- pH:** El control de este parámetro resulta, al igual que la temperatura, muy importante ya que el proceso de digestión anaerobia de la materia orgánica debe realizarse en un rango de pH entre 6,8 y 7,5 en el caso de reactores de mezcla completa. Ello está determinado porque las bacterias acetogénicas y metanogénicas, las que regulan el proceso, son muy sensibles a altos valores de acidez, lo que a su vez genera una disminución en el pH. Un pH menor a 6,5 implica acidificación del reactor y, por tanto, una inhibición de las bacterias metanogénicas. Sin embargo, las bacterias encargadas de las etapas de hidrólisis y acidogénesis presentan alta actividad en medios más ácidos, con un pH óptimo entre 4,5 y 6,3, por lo que un reactor con ese pH logrará una solubilización de la materia orgánica, pero no una metanización. El valor de este parámetro es un indicador de la actividad predominante en el reactor.
- Nutrientes y compuestos inhibidores:** Además de la materia orgánica degradada las bacterias requieren otros nutrientes para su desarrollo. La relación de los elementos C:N:P:S debería establecerse alrededor de 600:15:5:1, a fin de proveer a los microorganismos de las condiciones adecuadas para su desarrollo. Una carencia en un nutriente puede provocar una disminución en la actividad microbiana y, por ende, en la velocidad de producción de metano. Las concentraciones de posibles compuestos inhibidores son también un factor importante para la estabilidad del proceso. Respecto de inhibidores, debe considerarse la presencia de compuestos como metales pesados, amoníaco, pesticidas, sanitizantes, antibióticos u otros compuestos.

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la etapa más lenta, la cual depende de la composición de cada residuo. Para sustratos solubles, la fase limitante acostumbra ser la metanogénesis. Para aumentar la velocidad, la estrategia consiste en adoptar diseños que permitan una elevada concentración de microorganismos acetogénicos y metanogénicos en el reactor, con lo que se pueden conseguir sistemas con tiempo de proceso del orden de días. Por su parte, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas sólidas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas y que, usualmente, se traduce en tiempos de proceso de dos a tres semanas. En este caso, para aumentar la velocidad del proceso, una estrategia es reducir el tamaño de las partículas durante el pretratamiento o facilitar su solubilización para lo cual existen diversas alternativas (aplicación de ultrasonido, de temperatura elevada, de alta presión, una combinación de estas últimas o maceración).

2.4 Parámetros básicos de operación

Con la finalidad de controlar la actividad microbiológica y las condiciones ambientales en los estanques de digestión anaerobia, existen diversos parámetros ambientales y operacionales que permiten manejar el proceso y controlar las reacciones que se producen al interior del reactor.

- Velocidad de carga orgánica – VCO (Organic load rate, OLR en inglés):** Este parámetro indica la cantidad de materia orgánica con que se alimenta el reactor, por unidad de tiempo (día) y por unidad de volumen del reactor (m^3). Considerando que el parámetro Sólidos Volátiles (SV) equivale a la materia orgánica contenida en un sustrato, la VCO puede definirse como:

$$VCO = \frac{kgSV}{m^3d}$$

Al fijar el valor de la VCO, y conociendo la cantidad y composición del sustrato disponible, puede calcularse el volumen de reactor requerido para asegurar la estabilidad del proceso. Una sobrecarga del reactor (VCO alta) puede producir un exceso de producción de ácidos en las primeras etapas del proceso, lo que puede provocar la inhibición parcial o total de la actividad metanogénica.

- **Tiempo de retención hidráulico** – TRH (*Hydraulic retention time*, HRT en inglés): Este parámetro indica la cantidad de tiempo promedio que los sustratos permanecen en el reactor cuando se tienen procesos de flujo continuo. En general, el sustrato está en condiciones de humedad que permiten asumir aditividad de los volúmenes y, por tanto, el tiempo de retención hidráulico puede definirse como:

$$TRH = \frac{V_R}{\dot{V}}$$

Donde V_R es el volumen neto del reactor y $\dot{V}$ es el volumen de sustrato alimentado por día. En general, si la degradación ocurre en un proceso por lotes, durante los primeros 20 a 30 días, se degrada la mayor cantidad de materia orgánica. A partir de ahí, la degradación decae asintóticamente hasta un valor máximo para cada tipo de sustrato. Por esta razón, en general, los reactores se diseñan para tiempos de residencia mayores a 30 días.

- **Grado de mezcla en el reactor:** La actividad biológica depende fuertemente del contacto que tengan los microorganismos con la materia orgánica contenida en el sustrato. Por esta razón, debe asegurarse una mezcla suficiente del sustrato recién ingresado con el sustrato ya parcialmente digerido que contiene la población bacteriana. La práctica común es utilizar agitadores de rotación lenta y mezclas discontinuas a intervalos de tiempo para asegurar una mezcla suficiente y evitar la separación de las poblaciones bacterianas. También puede realizarse una agitación local que provoque la mezcla lenta del sustrato en el reactor a través de la generación de corrientes de flujo (uso de agitadores de propela). En general, la mezcla no es intensiva, pero sí suficiente para asegurar una mezcla completa.

La mezcla y movimiento del sustrato tiene también como finalidad importante la prevención de la formación de capas duras flotantes en los reactores (costras). Debido a la descomposición de la materia y a la evaporación de agua, se produce localmente la formación de aglomeraciones de materia, que en casos extremos, y en ausencia de una adecuada mezcla, pueden redundar en la formación de costras, a veces muy difícil de romper, y que en algunos casos impide la salida de gas desde las capas inferiores, pudiendo incluso llevar a la detención del proceso.

La necesidad de controlar las condiciones ambientales del reactor a través de los parámetros de operación (velocidad de la mezcla, velocidad de alimentación, calefacción del reactor, etc.) está llevando a un alto grado de automatización de las plantas generadoras de biogás, en particular las de mayor tamaño, en las que el monitoreo continuo del estado del reactor y de los demás componentes, así como la respuesta de distintos componentes del sistema están previamente programados.

2.5 Aspectos generales sobre sustratos

La biomasa utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato orgánico. En general, los sustratos más utilizados para la producción de biogás corresponden a residuos orgánicos de diversa naturaleza, dado que, sea por razones de necesidad de tratamiento o disposición, o para un eventual mejor aprovechamiento de las materias primas; corresponden a biomasa de costo cero o cuyo tratamiento y utilización puede significar incluso un ahorro de costos. La experiencia en el extranjero, principalmente en Alemania, muestra que también es posible utilizar biomasa proveniente de determinados cultivos agrícolas.

La composición del sustrato utilizado determina la cantidad y composición final del biogás producido. En general, las grasas y aceites tienen un rendimiento de biogás (medido en m³/t SV) mayor, con un contenido de metano medio. Las proteínas tienen un rendimiento comparativamente más bajo, con un contenido de metano mayor. En el caso de los carbohidratos, éstos tienen una productividad media, con un menor contenido de metano. La siguiente tabla muestra los rangos de rendimiento y concentración de metano para los distintos tipos de compuestos orgánicos.

Tabla 3: Rangos de rendimiento y concentración de metano para distintos tipos de compuestos orgánicos

Grupos de sustancias	Rendimiento de biogás	Fracción de metano
	m ³ /t SV	[%]
Proteínas digeribles	600-700	70-75
Grasas digeribles	1000-1250	68-73
Carbohidratos digeribles	700-800	50-55

Fuente: Traducido de FNR

En general, debe evitarse el uso de sustratos de alto contenido de lignina, como aserrín, hojas secas, restos de poda, etc., dado que no son factibles de descomponer vía digestión anaerobia y generan una barrera que impide la degradación de los otros compuestos. Esto puede acarrear como efecto colateral la formación de costras con los efectos descritos en el punto anterior.

Debido a que, comúnmente, la composición nutricional de los distintos sustratos varía dentro de determinados rangos, no es posible entregar un valor categórico respecto de la productividad y la composición del biogás proveniente de ellos. Sin embargo, es posible entregar rangos de valores que, en líneas generales, son válidos para los distintos tipos de biomasa. Para la evaluación exhaustiva de un proyecto concreto, con un tipo definido de sustrato, es conveniente tomar muestras representativas del mismo, estudiar su composición (análisis químico) y estimar matemáticamente, a partir de los compuestos orgánicos contenidos (nutrientes), el potencial de metanización (ver Tabla 3) o realizar ensayos de degradabilidad anaerobia en laboratorio. De esta forma pueden obtenerse valores más acertados de la productividad para una planta de biogás, disminuyendo así en forma significativa la incertidumbre en la evaluación.

Existe una gran variedad de tipos de biomasa aptos para ser usados como sustratos para la producción de biogás. En la Tabla 4 se presentan algunas características generales de la biomasa para la planificación de un proyecto, con los sustratos comúnmente más utilizados.

Tabla 4: Características generales de los sustratos comunes más utilizados en proyectos de biogás

Sustrato	Sólidos Totales (ST)	Sólidos Volátiles (SV)	Rendimiento de biogás		Fracción de metano
	[%]	[% ST]	m³/t MF*	m³/t SV	[%]
Purines y estiércol					
Purines vacunos	8-11	75-82	20-30	200-500	60
Purines porcinos	~7	75-86	20-35	300-700	50-70
Estiércol vacuno	~ 25	68-76	40-50	210-300	60
Estiércol porcino	25	75-80	55-65	270-450	60
Guano de ave	~ 32	63-80	70-90	250-550	60
Cultivos agrícolas					
Silo Maíz (planta completa)	20-35	85-95	170-200	450-700	50-55
Silo Pradera	25-40	70-95	170-200	550-620	54
Silo cereales (planta completa)	30-35	92-98	170-220	550-680	~55
Remolacha azucarera	23	90-95	170-180	800-860	53-54
Remolacha hojas	12	75-85	50-100	620-850	52
Paja de trigo	80-90	90-95	280-380	250-400	51
Papa	19-21	92-96	120-150	600-750	52
Residuos de agroindustria					
Orujo cervecero	20-25	70-80	105-130	580-750	~80
Orujos de frutas	20-25	app. 98	100-130	300-650	52
Pulpa de papa	~ 25	app. 95	app. 300	500-700	50
Melaza	80-90	85-90	290-340	360-490	70-75
Glicerina	~ 100	app. 99	750-850	800-900	50
Orujo de uvas	40-50	80-90	250-270	640-690	65
Residuos animales (mataderos)					
Grasa de separadores	2-70	75-93	11-450	~300	60-72
Residuos de interiores (cerdo)	12-15	75-86	20-60	250-450	60-70
Licor ruminal (rumiantes)	11-19	80-90	20-60	200-400	55
Otros residuos					
Residuos de alimentos y alimentos vencidos	9-37	80-98	50-480	200-500	45-61
Pan añejo	60-70	95-98	450-530	700-800	53
Desechos de mercados	15-20	80-90	45-110	400-600	60-65
RSU (fracción orgánica)	~ 40	app. 50	220-260	550-650	60

* Masa Fresca

Fuente: Traducido de FNR

En caso de realizarse ensayos para una determinación más precisa del potencial de biogás de un determinado sustrato o mezcla de sustratos, es recomendable determinar tanto las características aquí presentadas, como los contenidos de C, H, O y N, así como de fósforo (P) y amonio (NH_4^+). Para ello, como ya se mencionó, la determinación del potencial de metanización para cada residuo es esencial.

2.6 Co-digestión anaerobia

El término co-digestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen con el objetivo de:

- Aprovechar la complementariedad de las composiciones de los distintos sustratos para permitir perfiles de proceso más eficaces.
- Compartir instalaciones de tratamiento.
- Unificar metodologías de gestión.
- Amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- Reducir costos de inversión y explotación.

La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. La co-digestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado ser una metodología exitosa, tanto en régimen termofílico como mesofílico.

Se han conseguido buenos resultados en mezclas de residuos ganaderos con varios tipos de residuos de la industria de la carne y de mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano. También se han conseguido buenos resultados con la co-digestión de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) y la fracción orgánica de residuos municipales, la mezcla de éstos últimos con aguas residuales urbanas, y la co-digestión de lodos de PTAS y residuos de frutas y verduras.

Los residuos urbanos e industriales suelen tener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, por lo cual presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos. Sin embargo, pueden presentar problemas en su digestión, como deficiencia de nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoquen problemas mecánicos. Los residuos ganaderos pueden ser una buena base para su co-digestión ya que, generalmente, presentan un contenido en agua elevado, una alta capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios.

2.7 Beneficios de la producción de biogás

2.7.1 Beneficios de protección medioambiental

La producción y uso de biogás a partir de residuos de estiércoles y purines tratados anaerobiamente conlleva a un doble efecto climático: evitar la emisión descontrolada de metano proveniente de la producción animal y evitar el aumento de concentración de CO_2 en la atmósfera producido por el uso de combustibles fósiles.

Del mismo modo, al realizar un almacenamiento hermético de los estiércoles y purines, se reduce la emisión de óxido nitroso, se mejora la absorción de nitrógeno realizada por los cultivos al aplicar el digestato como abono y se reduce también la emisión de amoníaco a la atmósfera.

La digestión anaerobia es también capaz de descomponer los contaminantes orgánicos presentes en los estiércoles y purines, los cuales provienen del uso de pesticidas en la agricultura. Algunos de estos compuestos son: fenol, cresol, xylol, toluol, triclorometano, tetraclorometano, clorfenol, diclorfenol, pentaclorfenol, bifenil policlorados (PCB) y policloruro de aluminio (PAC), entre otros.

Así como los contaminantes orgánicos, variados patógenos se degradan durante el proceso anaerobio. No sólo la anaerobiosis sino también la temperatura del proceso, la acidificación del medio y el contenido de exoenzimas activas favorecen la degradación de estos patógenos. Hongos, como por ejemplo *plasmiodiophora brassicae*, como también larvas y gusanos se degradan en pocos días a temperatura mesofílica (35°C) o en pocas horas a temperatura termofílica (55°C). Bacterias como *salmonella* o *Escherichia coli*, se degradan en pocos días a temperatura mesofílica.

Los compuestos orgánicos que producen malos olores durante su descomposición se degradan y eliminan del ciclo de nutrientes durante el proceso de digestión anaerobia con la consecuente disminución de malos olores en el almacenamiento y en la aplicación del digestato como fertilizante orgánico.

2.7.2 Beneficios de la fertilización orgánica con digestato

En la agricultura los principales nutrientes fertilizantes son el nitrógeno, fósforo y potasio, y la cantidad que se requiere de cada uno de ellos dependerá del tipo de suelo, de las condiciones climatológicas y del cultivo.

El digestato contiene cantidades importantes de los nutrientes mencionados. El humus del digestato, además de proporcionar alimento a los vegetales, beneficia el suelo aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando su calidad para el cultivo. También disminuye el fenómeno de erosión.

La ventaja más importante de la fertilización orgánica es su participación en el ciclo natural de los nutrientes. Una característica de este tipo de fertilización es su amplio espectro de nutrientes que aporta al medio, siendo muy similar al requerimiento de las plantas.

El uso del estiércol animal o purín sin tratamiento como fertilizante orgánico ha sido una práctica agrícola frecuente en sistemas de pastoreo, pero evitado por los agricultores para sistemas de cultivo. Su uso se ha asociado a contaminación del aire y de napas freáticas. Además, su consistencia heterogénea no permite cálculos claros de fertilización y el sistema de manejo para su aplicación es mucho más complicado que el uso de la fertilización mineral.

Sin embargo, al aplicar la tecnología de digestión anaerobia como tratamiento a los estiércoles, hasta un 70% de su fracción orgánica puede ser convertida a metano y CO_2 . Esta reducción disminuye la relación carbono/nitrógeno mejorando su calidad como fertilizante. Además, se reduce la viscosidad, lo cual facilita su manejo y aplicación como fertilizante orgánico. Esta menor viscosidad evita también

que el digestato permanezca sobre las hojas del cultivo, disminuyendo su asimilación, y la velocidad de infiltración aumenta, disminuyendo las pérdidas de nutrientes durante la aplicación.

A mayor tiempo de retención hidráulica de los estiércoles o purines sometidos a digestión anaerobia, mayor será la concentración de amonio (NH_4) en el residuo y mayor será su similitud con la fertilización mineral (Tabla 5). El amonio es fácilmente absorbido por la planta, y la probabilidad de ser transformado a nitrato (NO_3) en el suelo se reduce y evita la contaminación de las napas freáticas.

Tabla 5: Aumento de la concentración de amonio a través de la digestión anaerobia

Retención hidráulica (días)	$\text{NH}_4 / \text{NH}_3\text{-N}$ (kg/m^3)	Materia seca (%)	Relación C/N	pH
0	2,9	7,9	8	7,3
35	3,3	5,1	5	7,9
70	3,4	4,4	4	8,0
105	3,7	4,3	4	8,0

Fuente: Kaiser y Povez

Al tratar los estiércoles y purines con tecnología de digestión anaerobia, las semillas de malezas, como toda sustancia orgánica, son degradadas en un gran porcentaje. Consecuentemente, al utilizar el digestato como fertilizante orgánico se podrá reducir la aplicación de herbicidas al haber intervenido el ciclo reproductivo de las malezas.

Otro beneficio importante de la digestión anaerobia es la reducción de sustancias fitotóxicas presentes en los estiércoles o purines a causa de la degradación de los ácidos orgánicos presentes. Estas sustancias pueden producir necrosis y esclerosis al aplicar el estiércol o purín sin tratamiento sobre cultivos en crecimiento.

2.7.3 Beneficios económicos

El biogás producido tiene un valor comercial como combustible, el cual se puede utilizar para la generación de energía eléctrica y/o térmica o su venta directa como gas valorado respecto de su contenido energético para sustituir combustibles fósiles.

Mediante equipos de cogeneración, se puede utilizar el biogás para generar tanto electricidad como calor, mediante la recuperación de parte de la energía térmica contenida en los gases de combustión y en el fluido de refrigeración del motor de cogeneración.

Por su parte, como se señaló en el punto previo, el digestato tiene características de alto valor fertilizante y de mejorador de suelos en su aplicación como abono o biosólido, por lo que su uso en reemplazo de fertilizantes minerales puede acarrear un significativo ahorro en los costos de fertilización para la actividad agrícola. Este ahorro se puede aumentar con la co-digestión de desechos orgánicos o rastrojos, ya que aumenta la concentración de nutrientes en el digestato.

2.7.4 Beneficios sociales

Los proyectos de biogás, al ser sistemas descentralizados de producción de energía eléctrica y calórica, acarrearán beneficios sociales tanto para los productores, como para la zona donde se encuentren los proyectos. Aquellos proyectos vinculados a la actividad agrícola generan trabajo en el predio mismo y la energía producida genera un abanico de potenciales nuevos procesos productivos en la zona, como por ejemplo, dar valor agregado a algún producto regional, siendo esta posibilidad una nueva fuente de trabajo.

Otro beneficio social de la tecnología de digestión anaerobia es la posibilidad que tiene el agricultor de transformar su sistema productivo a uno de producción limpia, con lo cual se genera un bienestar común para toda la zona implicada.

Del mismo modo, se beneficia socialmente al productor, ya que se le puede distinguir, diferenciar y reconocer como un productor con conciencia medioambiental, lo cual le generará un prestigio indiscutiblemente valorable. Este hecho cobra cada día mayor importancia en la agricultura moderna.

2.7.5 Aumento de la sustentabilidad de los sistemas productivos

La sustentabilidad es una visión de manejo que todo sistema agrícola debe empezar a interiorizar en su función para permanecer en el tiempo. Un sistema productivo puede ser considerado sustentable desde el momento en que genera tanto beneficios ecológicos como sociales y económicos. Mientras más beneficios generen en forma estable y equilibrada en el tiempo, mayor será su grado de sustentabilidad.

La utilización de la tecnología de digestión anaerobia realizada a los estiércoles, purines y a los residuos orgánicos, en general, es una herramienta que aporta la posibilidad de aumentar en forma considerable el grado de sustentabilidad de los sistemas agrícolas, así como de las demás actividades económicas en las cuales se pueden aprovechar la biomasa residual para la producción de biogás.

