

7. Biocombustibles

7.1. Metanogénesis

Además del rumen y el intestino, existen en la naturaleza otros lugares anóxicos donde ocurre la digestión de los restos orgánicos, como pantanos, charcos y microambientes dentro de las partículas de los suelos de bosques o praderas. Las etapas de este proceso son

- hidrólisis de los polímeros complejos,
- acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H_2 y CO_2 ,
- acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato, H_2 , CO_2 ,

• metanogénesis a partir de H_2 y CO_2 o de acetato, y pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariotas.

Los organismos clave en la conversión de los compuestos orgánicos complejos a metano son los fermentadores secundarios, especialmente las bacterias oxidantes de ácidos grasos o alcoholes que producen H_2 , porque utilizan estos compuestos como fuente de energía en cultivos mixtos con un consumidor de hidrógeno a través de una relación sintrófica.

La energía libre asociada a las conversiones de los ácidos grasos es positiva, pero si la concentración de H_2 se mantiene muy baja debido al consumo constante por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato, pasa a tener signo negativo lo que determina su factibilidad. En la mayoría de los ecosistemas anaeróbicos, la acetogénesis limita el proceso global porque la velocidad de crecimiento de los microorganismos intervinientes es por lo general muy lenta (1).

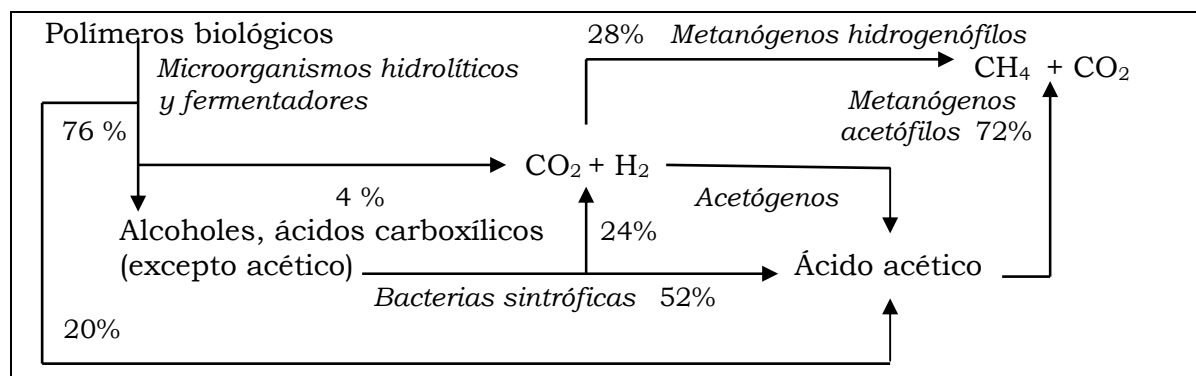


Figura 7.1 Fermentaciones en un digestor anaeróbico (2)

Los reductores de CO_2 más importantes son los metanógenos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H_2 como donante de electrones. Pocos son los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis, todos los cuales

liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, por lo tanto es un proceso que depende de la producción de los mismos por otros organismos a partir de la materia orgánica compleja (3).

La conversión de acetato a metano aparece como un proceso ecológico muy importante en los digestores de residuos y los medios anóxicos de agua dulce, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias (4).

La magnitud de la producción de metano por las arqueobacterias es superior a la obtenida anualmente de los pozos de gas natural. Las principales fuentes son los eructos de los rumiantes y el gas liberado en las zonas pantanosas. También se lleva a cabo la metanogénesis en el intestino de los vertebrados y de los insectos que comen madera como las termitas. Se han encontrado metanógenos viviendo como endosimbiontes de amebas y flagelados de vida libre acuática o albergados en el tubo digestivo de invertebrados (5).

Cuadro 7.1. Precursores del metano en la digestión anaeróbica (3)

Sustratos	Reacciones
dióxido de carbono,	$4 \text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
monóxido de	$4 \text{HCOO}^- + 4 \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
carbono, formato	$4 \text{CO} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{CO}_2$
	$4 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$
metanol,	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$
metilaminas	$4 \text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 4 \text{NH}_4\text{Cl}$
acetato	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$

La metanogénesis se observa con más frecuencia en los ambientes terrestres y las aguas continentales que en el mar, debido a las proporciones más bien altas de sulfato presentes en aguas y sedimentos marinos donde las bacterias reductoras de sulfato compiten con las poblaciones metanogénicas por el acetato y el H_2 disponibles pero no por las metilaminas, como la trimetilamina excretada por los animales marinos, que se convierten en los principales precursores de metano (1).

Se clasifica a las metanobacterias en siete grupos principales de arqueobacterias que comprenden un total de 17 géneros con diversas morfología y distinta respuesta a la coloración de Gram.

Cuando los metanógenos crecen de forma autotrófica, el CO_2 es la principal fuente de carbono, sin embargo el crecimiento de casi todos ellos es estimulado por el acetato y en algunas especies por ciertos aminoácidos. En los cultivos de laboratorio algunos metanógenos del rumen necesitan de una mezcla de ácidos grasos.

Todos los metanógenos utilizan amonio como fuente de nitrógeno y algunas especies fijan N_2 (*Methanosarcina*, *Methanococcus*). El níquel es un componente de una coenzima metanogénica y está además presente en las enzimas hidrogenasa y CO-deshidrogenasa. Estos organismos también

requieren hierro y cobalto para su crecimiento. Tienen algunas coenzimas exclusivas que son portadoras de C_1 o intervienen en las reacciones de óxido-reducción como donadores de electrones.

La reducción del CO_2 por lo general depende del H_2 , pero el formiato, el CO e incluso el Fe^0 sirven como donantes de electrones. El Fe^0 es oxidado a Fe^{++} y los electrones liberados se combinan con los protones para formar H_2 , que es el donante inmediato en la metanogénesis. También los alcoholes pueden aportar electrones en unos pocos casos.

En condiciones normales la variación de energía libre durante la reducción de CO_2 a metano con H_2 es -131 kJ/mol, pero debido a la influencia de la concentración de los reactantes en los ambientes naturales baja a cerca de -30 kJ/mol. La concentración de H_2 en las zonas metanogénicas no es mayor a 10 mM (3).

La etapa terminal de la metanogénesis es la de conservación de la energía. La reducción está asociada con la salida de protones a través de la membrana, creando una fuerza motriz de protones. La síntesis de ATP ocurre por el sistema ATPasa integrado a la membrana que utiliza el gradiente de protones (5). Las metanobacterias autotróficas convierten el CO_2 en material celular a través de la vía del acetyl-CoA utilizada también por las bacterias homoacetogénicas y las reductoras de sulfato, pero a diferencia de estas últimas los metanógenos integran las vías biosintética y bioenergética porque comparten intermediarios comunes. Las reacciones de la vía del acetyl-CoA también están estrechamente relacionadas con la producción de metano a partir de compuestos de metilo o acetato.

El crecimiento de metanobacterias sobre compuestos de metilo también está ligado a la bomba de protones para la síntesis de ATP, pero en ausencia de H_2 la generación de los electrones necesarios requiere que alguno de los sustratos se oxide. Esto se produce por una bomba de sodio ligada a la membrana citoplasmática, que establece un gradiente de sodio a través de la misma y conduce a la oxidación de grupos metilo a CO_2 (1).

7.2. Biogás

La combinación del reciclado de residuos animales con el cultivo de abonos verdes puede proporcionar el nitrógeno necesario para el suelo agrícola. El reciclado puede hacerse mediante digestión anaeróbica, pues el contenido relativo de nitrógeno es mayor en el estiércol digerido que en el fresco. El lodo remanente en el digestor es una alternativa para mejorar los suelos (6). La digestión anaeróbica además de contrarrestar la polución ambiental permite obtener biogás como una fuente alternativa de energía.

7.2.1. Características

El biogás es una mezcla combustible de metano y dióxido de carbono, con una pequeña proporción otros gases, que varía según la fuente. Según el contenido de metano, el valor calorífico es de 17 a 34 MJ/m³.

Entre los otros componentes del biogás se encuentran pequeñas cantidades de hidrógeno que es un intermediario en el metabolismo anaeróbico y también trazas de monóxido de carbono producido por algunas bacterias. La presencia de nitrógeno puede indicar una entrada

accidental de aire y esto constituye un grave peligro debido al riesgo de explosiones, pero el oxígeno es consumido por los microorganismos facultativos (7).

Tanto el azufre orgánico como el inorgánico pueden ser reducidos a H₂S, un gas altamente reactivo con los metales tales como hierro y cobre, originando la corrosión. Por otra parte el amonio proveniente de proteínas permanece en solución y se volatilizan sólo trazas. El vapor de agua suele condensarse cuando las cañerías están frías, por lo que se coloca una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería.

Cuadro 7.2. Composición del biogás derivado de residuos agrícolas (7).

Gases	Contenido	Propiedades
Metano	50 – 80 %	combustible
CO ₂	30 – 50 %	ácido, asfixiante
Vapor de agua	saturación	corrosivo
Hidrógeno	0 – 2 %	combustible
H ₂ S	100 – 7000 ppm	corrosivo, olor desagradable, tóxico
Amoníaco	trazas	corrosivo
CO	0 – 1 %	tóxico
Nitrógeno	0 – 1 %	inerte
Oxígeno	0 – 1 %	corrosivo
Orgánicos	trazas	corrosivos, olor desagradable

7.2.2. Residuos

Los materiales que se pueden usar para la generación de biogás son los desperdicios de origen animal o humano, residuos de cosechas o agroindustriales, plantas acuáticas y aún el mantillo forestal (8).

Las distintas etapas de la bioconversión de los materiales orgánicos tienen distinta velocidad, tal el caso de la degradación de la celulosa que ocurre en semanas, la de las hemicelulosas y proteínas en días y la de las moléculas pequeñas, como azúcares, ácidos grasos y alcoholes, en horas, pero la lignina no es degradada en la mayoría de los sistemas de digestión anaeróbica (9).

El proceso en un digestor no requiere cultivos puros de microorganismos pues las bacterias necesarias están ampliamente distribuidas en la naturaleza y se encuentran en los excrementos animales y humanos.

Una manera de expresar la cantidad de sustrato digerible para la producción de biogás, es mediante los valores de sólidos totales (ST) considerado como el material remanente después de evaporar el residuo a 103 – 105°C, o de sólidos volátiles (SV) que es el material orgánico descompuesto a 550 ± 50°C (10).

Para determinar la digestibilidad de los residuos se los incubaba con líquido ruminal diluido en buffer fosfato-bicarbonato a 39°C durante 48 hs para la degradación de los polisacáridos y luego otras 48 hs con pepsina-HCl a igual temperatura para hidrolizar parcialmente las proteínas de los microorganismos y del sustrato. Se la suele expresar como % de sólidos volátiles desaparecidos (9).

Una relación C/N igual a 16/1 se considera óptima (corresponde a 3% N respecto al material orgánico) y aunque puede obtenerse biogás a valores mayores no se debe superar la relación 30/1 (ver cuadro 3.7) (8). Por otra parte la digestión anaeróbica de madera no es factible sin algún tipo de pretratamiento. La relación nitrógeno/fósforo óptima es de 5/1 y además es necesario la presencia de hierro, cobalto, níquel y molibdeno en concentraciones muy bajas (Fe 2nM, Co 10 nM, Ni 100 nM, Mo 10 nM) (7). En realidad sólo el estiércol está relativamente balanceado.

Cuadro 7.3. Características de excrementos animales (8, 10)

Estiércol	Kg/100kg peso vivo/día	Sólidos totales %	Sólidos volátiles %	Nitrógeno %	Fósforo %
Bovinos	4,6 – 8,34	15,2	9,33 – 14,1	0,70 – 1,19	0,20
Caballos	5,6	...	14,3	0,86	0,13
Cerdos	5,1 – 5,7	13,5	7,02 – 11,2	0,76 – 0,83	0,47
Gallinas	6,2 - 6,6	25,3	16,8 – 18,5	1,2 – 1,5	1,20
Ovinos	3,6 – 5,0	29,7	21,5 – 25,3	1,0 – 1,2	0,30
Vacas lecheras	7,5 - 9,4	9,47	7,66 – 7,98	0,38	0,10

Para una digestión óptima tienen que estar presentes todos los elementos esenciales en forma fácil de asimilar por las bacterias y la concentración de sólidos totales en la suspensión de carga ser de 10% (7 a 15%) (10).

La concentración de nitrógeno amoniacal debe ser inferior a 1,5 g/L, si es mayor resulta tóxico como suele ocurrir con las deyecciones de gallinas. Si bien es un amortiguador, su aumento puede llegar a impedir el proceso de digestión. También son tóxicas las sales de zinc, cobre y níquel, aunque este último es necesario en ínfimas cantidades. Las sales de los elementos alcalinos y alcalino-térreos pueden ser estimulantes o inhibitorias según la concentración (8). La toxicidad de los sulfatos se manifiesta a concentraciones mayores que 1 g/L y la inhibición total ocurre por sobre 4,5 g/L (7).

Cuadro 7.4. Características del estiércol vacuno (11)

Parámetros	Estiércol vacuno
Sólidos totales	12,9 – 19,8 % estiércol
Sólidos volátiles	76,7 – 91,8 % sólidos totales
pH	5,2 – 6,8
Nitrógeno	2,6 – 2,9 % sólidos totales
Fósforo soluble	0,17 – 0,32 % sólidos totales
Potasio	0,5 – 5 % sólidos totales

Los antibióticos empleados en las explotaciones pecuarias llegan a los excrementos pero, como ocurre también con los antihelmínticos, no suelen afectar mayormente la digestión debido a la dilución. Los metanógenos son sensibles a los antibióticos que afectan la síntesis de proteínas o lípidos y a los interfieren con la función de la membrana citoplasmática (8).

Cuadro 7.5. Efecto de la concentración de algunos cationes (8)

Cación	Concentración g/L		
	estimulante	inhibitoria	muy inhibitoria
Sodio	0,1 – 0,2	3,5 – 5,5	8,0
Potasio	0,2 – 0,4	2,5 – 4,5	12,0
Calcio	0,1 – 0,2	2,5 – 4,5	8,0
Magnesio	0,075 – 0,15	1,0 – 1,5	3,0

Los desinfectantes clorados son muy tóxicos aún a bajas concentraciones (menor que 1 mg/L) pero son rápidamente absorbidos por los sólidos e inactivados. La mayoría de los detergentes sintéticos son degradados fácilmente pero si la concentración es mayor que 20 mg/L pueden afectar la digestión. Los compuestos de amonio cuaternario son persistentes y tóxicos aún a bajas concentraciones (1 mg/L). Los solventes clorados y derivados, son tóxicos a concentraciones de 1 mg/L (7).

7.2.3. Carga del digestor

Bajo condiciones ambientales óptimas para la digestión, la cantidad de gas producido es proporcional a la cantidad de residuos agregados. Los materiales que pueden ser degradados fácilmente se estabilizarán más rápido que los resistentes, necesitando un tiempo de digestión más corto y un digestor de menor tamaño.

Las partículas pequeñas son mejor fermentadas que los trozos gruesos, por lo que se debe picar o desleír bien los materiales para que la suspensión fluya uniformemente evitando el taponamiento de las cañerías de carga y descarga, y reduciendo la formación de espuma (10). Los materiales insolubles lignocelulósicos requieren un tiempo de digestión de dos o más semanas, mientras que se puede lograr en un día la degradación de hasta el 95% de un residuo soluble (9).

La carga inicial requiere una gran cantidad de materia prima que conviene reunirla mientras se está construyendo el digestor. Dado que sufre una transformación antes de ser introducida se debe controlar el pH, así como asegurar el agregado de estiércol vacuno fresco u otro material que contenga los microorganismos necesarios. El éxito depende de la radicación y mantenimiento de los organismos acidificantes y metanogénicos en forma equilibrada. Si el digestor acumula ácidos volátiles como resultado de una sobrecarga, la situación puede corregirse por la resiembra de organismos, la suspensión temporaria de la alimentación o el agregado de cal (14).

La velocidad de la degradación de un material orgánico refleja la interacción entre la cantidad de biomasa microbiana activa por unidad de volumen y el sustrato disponible para los microorganismos. Los digestores cargados a razón de 0,2-0,5 kg SV/m³ por día, generalmente sin agitación, corresponden a las pequeñas instalaciones cuyo tamaño medio es de 10 m³. Cuando la carga es mayor que 0,5 kg SV/m³ por día se debe hacer al menos un mezclado intermitente.

La carga diaria se puede calcular considerando la cantidad de material necesario para tener una suspensión con 0,5 kg (o la cantidad conveniente) de sólidos volátiles por m³ de digestor (10).

7.2.4. Factores ambientales

Las metanobacterias sólo pueden multiplicarse cuando está avanzada la fermentación de los sustratos primarios por acción de las bacterias anaerobias facultativas (*Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* o *Bacillus* spp.) y se haya consumido todo el oxígeno disuelto, de manera que el potencial de reducción tenga un valor menor que -200 mV. Además el pH no debe bajar demasiado, debido a los ácidos producidos por los *Clostridium*, para no inhibir el crecimiento de los metanógenos (12).

Por lo general la concentración de ácidos grasos volátiles no supera los 2 a 3 g/L, expresados como ácido acético. Si se sobrepasa este nivel la digestión cesará en dos o tres días, debido a que los metanógenos no pueden utilizar los ácidos a la misma velocidad con que se producen. El pH óptimo para la digestión está entre 7,0 y 7,2, aunque el rango satisfactorio va de 6,6 a 7,6. La digestión comienza a inhibirse a pH 6,5 (8). Una vez que se ha estabilizado un digestor el lodo está bien amortiguado, es decir la concentración de protones no varía aún cuando se añadan cantidades relativamente grandes de ácido o álcali. Si esta capacidad de amortiguación

se destruye y el pH disminuye, cesa la metanogénesis (10).

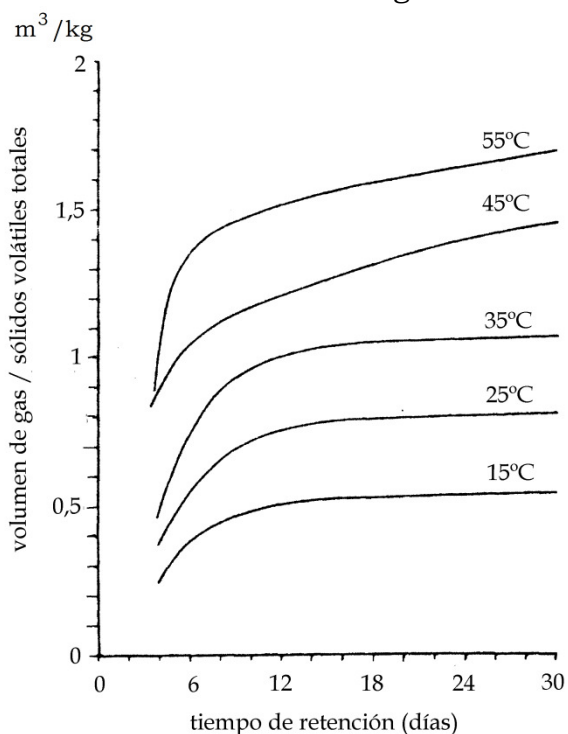


Figura 7.2. Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás (10)

El CO₂ es soluble en agua y reacciona con los iones hidroxilo para formar bicarbonato. La concentración de HCO₃⁻ es afectada por la temperatura, el pH y la presencia de otros materiales en la fase líquida. Las condiciones que favorecen la producción de bicarbonato aumentan a su vez el porcentaje de metano en la fase gaseosa (8).

La gama de temperatura para la digestión anaeróbica tiene dos zonas óptimas una mesófila (30 - 40°C) y otra termófila (45 - 60°C). Casi todos los digestores funcionan dentro de los límites de temperaturas mesófilas y la digestión óptima se obtiene a unos 35°C. La velocidad de digestión y por consiguiente la producción de gas es mayor al

aumentar la temperatura, en el caso de un tiempo de fermentación de 12 días la producción de gas por unidad de sólidos volátiles es 20% mayor a 45°C que a 35°C, sin embargo las bacterias son sumamente sensibles a una disminución repentina de sólo unos pocos grados.

En los climas cálidos, donde no existen temperaturas de congelación, los digestores pueden funcionar en invierno sin añadir calor pero hay que aumentar en cambio el tiempo de digestión. Cuando las condiciones

climáticas lo exigen se debe calentar el digestor, pero esta tarea requiere emplear parte del gas producido, disminuyendo la cantidad aprovechable para uso doméstico y añadiendo un costo de instalación y operación. La regulación de la temperatura se logra haciendo circular agua caliente por los termointercambiadores, a través del digestor (10).

La temperatura del suelo varía según las características del mismo, la zona geográfica y la estación. Los valores medios mensuales a 100 cm de profundidad en Cerrillos (Salta) varían entre 15,8°C y 25,4°C mientras que en San Pablo (Jujuy) a 120 cm la temperatura media registrada es 11,8°C con escasa oscilación anual en un suelo arcilloso en profundidad y 1150 mm de precipitaciones anuales (13).

Las causas principales de una excesiva producción de ácidos volátiles son la elevada velocidad de carga, la baja temperatura y la formación de espuma que constituye una zona favorable para los acetógenos. La sedimentación de los materiales fibrosos y la espuma se puede evitar mezclando el contenido (8).

7.3. Digestores

Hay una amplia variedad de diseños pero los digestores de una sola etapa con cúpula fija o campana flotante son los más usados en el ambiente rural. El digestor más simple es una bolsa de plástico grueso a la que se le coloca las tuberías correspondientes y se la ubica en un ambiente de temperatura relativamente constante (15).

El digestor de cúpula fija tiene la cubierta inmóvil y cuenta con la presión hidrostática autogenerada para distribuir el biogás. Como se colecta el biogás en el mismo digestor, parte de la suspensión digerida es desplazada hacia un tanque de almacenamiento cuyo nivel sube con la producción del gas y baja con el uso. La ventaja de este modelo consiste la ausencia de partes móviles corroíbles (16).

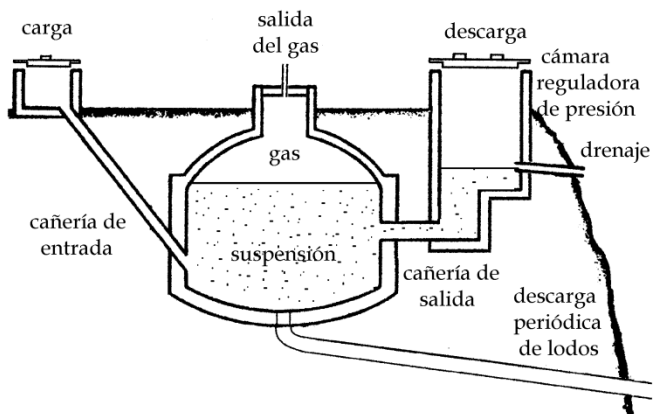


Figura 7.3. Digestor de cúpula fija, (16)

En el digestor con una campana flotante colectora de gas, ésta puede estar directamente sumergida en la suspensión digerida para lograr el sellado, o bien en un aceite retenido entre las dos paredes concéntricas del tanque. La descarga del líquido se hace por rebalse a través de un caño y la de sólidos por una abertura de inspección. La presión del gas depende del

peso de la campana, por lo que suele colocarse piedras sobre la misma (7). Además puede haber corrosión por la exposición constante de las partes metálicas no protegidas, a los contaminantes del biogás como H_2S y otros compuestos volátiles (12).

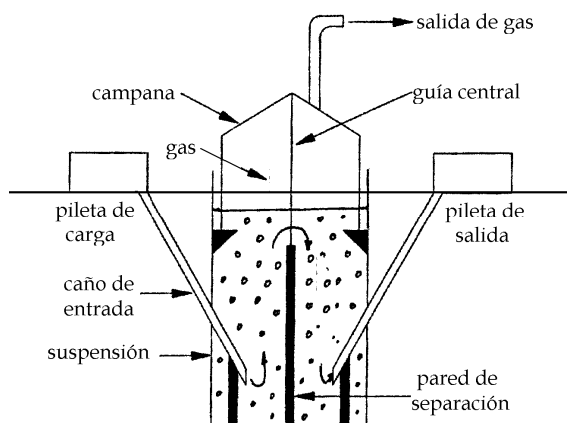


Figura 7.4. Digestor de campana flotante (17)

La digestión ruminal está estratificada en dos fases una líquida, y otra con alto contenido en sólidos donde es mayor la actividad microbiana y la concentración de intermediarios metabólicos. Similarmente los digestores de dos fases tienen un mejor rendimiento en metano. La incorporación un tabique central transforma al digestor de campana flotante en uno de dos etapas, con mejor rendimiento de biogás y salubridad del efluente.

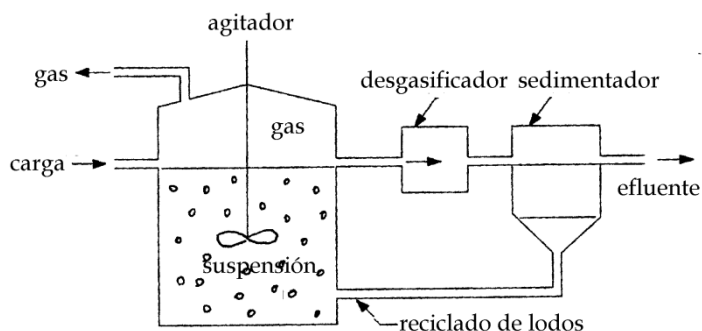


Figura 7.5. Digestor de contacto anaeróbico (17)

El digestor de contacto anaeróbico, donde la agitación permite el manejo de grandes cantidades de residuos por unidad de volumen, conduce a

una mayor eficiencia en la biodegradación generando biogás a mayor velocidad pero requiere emplear parte del gas para mover el agitador (7).

Los digestores con alimentación discontinua se construyen cuando es difícil de obtener los residuos diariamente. A las dos semanas de carga comienza la producción del gas y continúa por unos tres meses. Cuando cesa, se abre el digestor y se limpia. En estos casos se suele construir al menos dos digestores, de modo que haya uno siempre en operación (10).

Antes de proyectar la realización de cualquier modelo, se debe tener en cuenta la cantidad y el tipo de desperdicios disponibles, las dimensiones de los trozos o partículas, el requerimiento de calefacción, la necesidad de agitación, la disponibilidad de materiales de construcción (8). La ubicación de la zona de operación del digestor debe ser tal que no contamine la napa de agua, debido a la permeabilidad del suelo se deberá tener en cuenta la distancia entre el digestor, la ubicación de los residuos y la fuente de agua (10).

Los digestores enterrados aprovechan las propiedades aislantes del suelo que los rodea, pero deben ser impermeabilizados. En caso de los construídos sobre el suelo deben estar rodeados de anillos de hojas, aserrín o paja, los que generan calor durante el compostaje. Una vez transformados, los materiales de estos anillos deben ser cambiados por residuos frescos (8).

El tamaño del digestor está determinado por el contenido de sólidos de la suspensión de carga, el tiempo de digestión de los residuos y el tipo de material digerido. Por otra parte, el volumen de gas producido difiere según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga periódica/volumen del digestor, la temperatura, el tiempo de digestión y el diseño del digestor (7).

Se puede estimar la demanda máxima de biogás suponiendo las necesidades durante cada hora del día para planificar el tamaño de la cúpula o la campana flotante, pero sin sobrepasar el volumen del gas producido diariamente.

El volumen de un digestor está dado por el volumen de la suspensión de los desperdicios agregados diariamente multiplicado por el tiempo de digestión conveniente (según el tipo y el tamaño de los residuos y la temperatura de operación), más el volumen del gas producido por día (10).

El mezclado influye tanto como el tamaño de las partículas, pues expone nuevas superficies a la acción bacteriana y previene la disminución de ésta por agotamiento puntual de los nutrientes o acumulación de metabolitos. Cuando el tiempo de digestión es largo (50-60 días) generalmente no es necesario agitar el contenido de los digestores domésticos aunque suele ser conveniente (16).

Hay varios métodos para mezclar el contenido del digestor:

- mediante la carga diaria, introduciendo la suspensión como un chorro tangencial,
- por manipulación de los dispositivos de entrada y salida de manera que las operaciones de alimentación y descarga favorezcan el mezclado,
- por instalación de dispositivos de mezclado que puedan ser operados manualmente (8).

La provisión de agua para los digestores es otro punto a tener en cuenta. Se necesita alrededor de 60 litros de agua diarios cada 10 kg de estiércol vacuno seco. Pero la fracción líquida podría ser reciclada en aquellos casos en que el agua es escasa. Por otra parte la reducción de la relación agua/estiércol ocasiona una disminución en la producción de gas (18).

Es necesario colocar un manómetro de agua, pues si la presión es negativa por haberse retirado más efluente que la carga agregada, no se deben abrir los puntos de consumo de gas para evitar la llegada de aire al interior de la cañería y el digestor. Además se debe intercalar un arrestallamas que es una caja de placas de metal corrugado con agujeros. Si se produce alguna llama en la tubería el gas se enfria por debajo del punto de ignición, pero puede seguir pasando.

La primera cantidad de gas formada debe ser venteadada pues está mezclada con aire y el metano mezclado con 5-15% de aire es explosivo. Luego sólo habrá biogás almacenado en el digester. Por otra parte, cuando se detiene un digester para retirar los lodos se debe ventilar bien el interior dado que el biogás es asfixiante (16).

El cierre de agua de la campana móvil se puede romper si la alimentación del digester es excesiva o la salida del gas es demasiado lenta, por el contrario se crea vacío cuando la extracción es muy rápida. La presión del gas está comúnmente entre 15 y 30 cm de columna de agua. Para evitar la sobrepresión se inserta en el digester una válvula de seguridad que consta de arandelas de peso calibrado e iguala a la presión proyectada para el digester (7).

La eliminación del sulfuro de hidrógeno se hace principalmente para prevenir la corrosión por los residuos de la combustión. En el ambiente rural se suele usar el proceso catalítico seco con $Fe(OH)_3$, y el catalizador se puede regenerar varias veces. El CO_2 puede ser removido en parte con agua fría (8).

Otra cuestión de interés es la salubridad del efluente y los lodos. La digestión mesofílica mata microorganismos patógenos tales como *Salmonella* y ciertos enterovirus durante un tiempo de digestión de 20-30 días, sin embargo, algunos parvovirus sobreviven aún en el rango termofílico. También se reduce en gran medida la infectividad de los huevos de *Taenia saginata*, *Ancylostoma* sp. y *Ascaris suum*, pero desaparecen en el rango termofílico (7).

Cuadro 7.6. Desaparición de microorganismos patógenos en los digestores (8)

Organismos	Temperatura °C	Tiempo de residencia, días	Desaparición %
<i>Salmonella</i> spp	22 – 37	6 – 20	82 – 96
<i>Mycobacterium bovis</i>	30	...	100
Poliovirus	35	2	98,5
Quiste de protozoos	30	10	100
<i>Ascaris</i> sp	29	15	90

En resumen, los pasos a seguir al proyectar un digester son los siguientes:

1. Determinar la mezcla de residuos disponibles a cargar para obtener una relación C/N dentro del rango óptimo.
2. Calcular la concentración de sólidos volátiles en la mezcla según la información disponible.
3. Establecer la dilución a realizar para obtener una concentración adecuada de sólidos volátiles en la carga.
4. Elegir el tipo de digester.
5. Calcular la temperatura de operación sin calentamiento, pero si es necesario fijar la temperatura de acuerdo al sistema calentador disponible.
6. Decidir cuál será el tiempo de fermentación apropiado para un mejor rendimiento en biogás.
7. De acuerdo a la información disponible establecer la producción probable de biogás y dimensionar el digester.

El estiércol digerido es recuperado como un lodo con 10 a 12% de sólidos y un sobrenadante con 2 a 3% de sólidos. El efluente líquido se retira con baldes o por drenaje en un terreno desnivelado y puede ser usado directamente como fertilizante en suelos no hortícolas así como el lodo, que si se seca es un abono sólido.

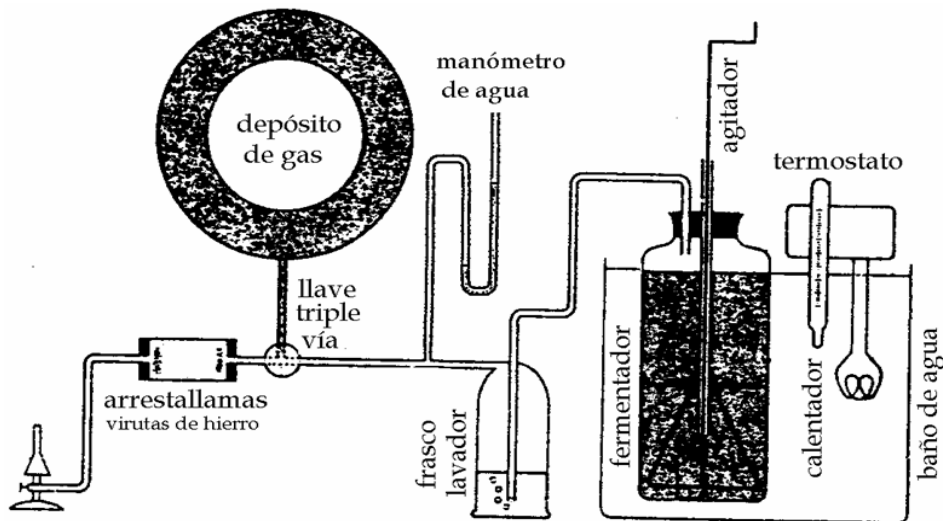
Las actividades diarias de mantenimiento consisten en:

- tomar las temperaturas ambiente y del agua,
- reunir y homogeneizar el material de la carga,
- reciclar el efluente, apreciar el olor y la presencia de insectos.

Semanalmente:

- controlar y corregir el pH,
- controlar la seguridad en el uso del biogás,
- identificar las pérdidas,
- registrar la presión del gas,
- examinar los puntos de consumo,
- drenar el agua de la cañería,
- verificar el nivel de líquido en el manómetro (14).

Digestión anaeróbica



Colocar en un frasco de 1 L, unos 200 g de estiércol fresco de vaca, 25 g de paja cortada en trozos pequeños y agua hasta unos 5 cm de la boca. Poner un tapón atravesado por un agitador y un tubo para la salida de los gases.

Instalar el fermentador en un baño de agua a 35°C. Unir la salida a un frasco lavador y éste al manómetro de agua y a una llave de triple vía, la que está conectada con un globo inflable como depósito de gas y un mechero. Entre el mechero y la llave de triple vía se coloca un tubo de vidrio lleno con virutas de hierro para evitar el retroceso de la llama. Controlar que los cierres sean herméticos.

Agitar diariamente la mezcla en descomposición. Luego de uno o dos días vaciar el depósito para eliminar la mezcla explosiva de biogás y aire. Dejar hasta que se llene nuevamente y comprobar cómo arde el gas a la salida del mechero. Controlar diariamente el nivel de agua del baño, la temperatura y la presión del gas (12).

7.5. Residuos domésticos y frutihortícolas

La fracción orgánica de los residuos sólidos domésticos puede ser digerida en condiciones anaeróbicas una vez separada en las plantas de tratamiento, al igual de los desechos frutihortícolas de los mercados. Alrededor del 90% de las plantas a escala real para la digestión de la basura orgánica emplean una sola etapa y la mitad de éstas operan en condiciones húmedas.

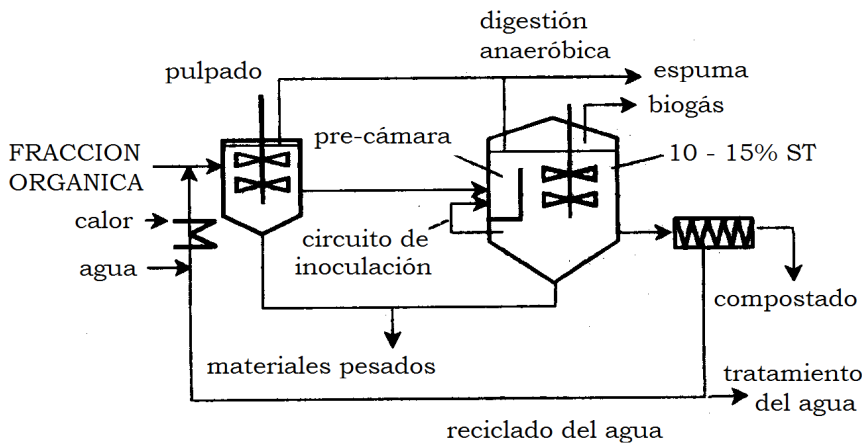


Figura 7.6. Esquema de la digestión 'húmeda' de la fracción orgánica de la basura urbana en una sola etapa; ST: sólidos totales (25).

Cuadro 7.7. Operaciones y productos implicados en una planta de digestión anaeróbica de sólidos orgánicos (25)

	Operaciones	Productos reusables
Pre-tratamiento	Separación magnética	Metales ferrosos
	Reducción de tamaño	-
	Pulpado con separación por gravedad	Materiales inertes pesados como los de construcción
	Tambor de tamizado	Fracción gruesa, plásticos
	Pasterización	-
Digestión	Hidrólisis	-
	Metanogénesis	Biogás
	Valorización del biogás	Electricidad Calor
Post-tratamiento	Ecurrido mecánico	-
	Estabilización aeróbica	'Compost'
	Tratamiento del agua	Agua
	Separación en húmedo	Arena Lodo

La eficacia del tratamiento en una etapa para la mayoría de los residuos orgánicos depende del buen diseño del reactor y la operación bajo condiciones controladas. En tiempo frío parte del biogás producido se emplea en calentar el agua. Los residuos sólidos orgánicos son molidos hasta la consistencia de pasta, tamizados y suspendidos en agua para alcanzar una concentración de 10 a 15 % de sólidos totales. Durante el pre-tratamiento hay una pérdida de

15 a 25% de los sólidos volátiles. En el digester hay una tendencia a la separación de tres capas. Los compuestos pesados se acumulan en el fondo del digester y pueden dañar al sistema de agitación así como a las bombas, mientras que la espuma flota impidiendo un mezclado efectivo, por lo cual hay que extraer periódicamente ambas capas.

Cuadro 7.8. Ventajas y desventajas del tratamiento en una sola etapa húmeda (25)

Crterios	Ventajas	Desventajas
Técnicos	Inspirados en procesos conocidos	Formación de cortocircuitos Fases sumergida y flotante Abrasión con arena Pre-tratamiento complicado
Biológicos	Dilución de inhibidores con agua	Muy sensible al shock por carga de inhibidores que se distribuyen inmediatamente por el digester Pérdida de sólidos volátiles junto con materiales inertes y plásticos
Económicos y ambientales	El equipo para manejar los lodos es más barato	Alto consumo de agua Alto consumo de biogás para calentar grandes volúmenes

En el sistema llamado ‘seco’ el contenido de sólidos totales en el reactor alcanza a 20 – 40 %, por lo que la manipulación, el mezclado y el pre-tratamiento tienen diferencias fundamentales con los del sistema húmedo. El transporte de los residuos es llevado a cabo con cintas transportadoras o bombas especialmente diseñadas para materiales muy viscosos y, en general, el equipamiento es más resistente y caro. El único pre-tratamiento necesario es la eliminación de impurezas mayores de 40 mm por tamizado o trituración. Los materiales inertes que pasan el tamiz no pueden ser eliminados como el caso anterior y este sistema es conveniente para residuos con 25% p/p de tales impurezas.

Debido a la alta viscosidad, los residuos fermentados se mueven como flujo-pistón por el digester, contrariamente al sistema húmedo que usa reactores completamente mezclados, donde el mezclado se logra por inyección de biogás a presión, recirculación de lodos o por la rotación lenta de discos o paletas (25).

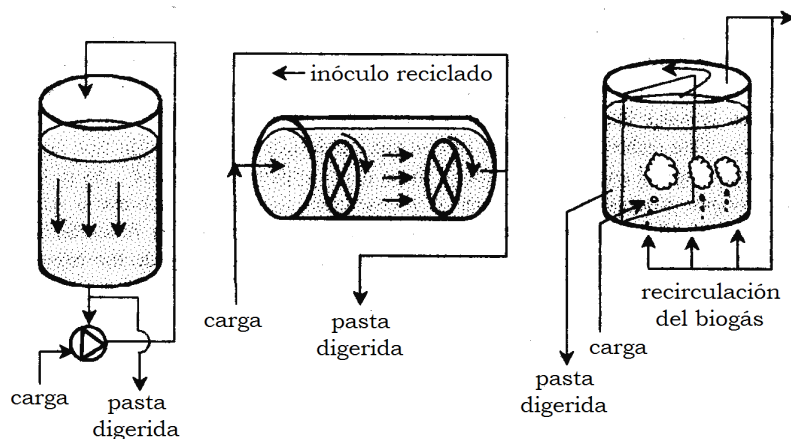


Figura 7.7. Distintos tipos de digestores usados en el sistema ‘seco’: con recirculación de lodos, horizontal con mezclado mecánico y con inyección de biogás (25)

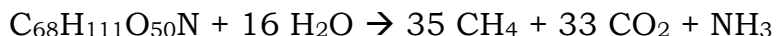
Cuadro 7.9. Ventajas y desventajas del sistema ‘seco’ en una etapa (25)

Criterios	Ventajas	Desventajas
Técnicos	Sin partes móviles dentro del reactor Resistentes (no es necesario sacar plásticos y materiales ineertes) No hay cortocircuitos	Los residuos húmedos (<20% ST) no pueden ser tratados solos
Biológicos	Menos pérdida de SV en el pre-tratamiento Mayort carga orgánica Dispersión limitada de los picos fugaces en la concentración de inhibidores	Poca posibilidad de diluir los inhibidores con agua
Económicos y ambientales	Pre-tratamiento más barato y reactores más chicos Higienización completa Poco gasto de agua Menores requerimientos de calor	Equipamiento más resistente y caro para el manejo de los residuos

También se produce biogas en los rellenos sanitarios cuya composición precisa depende de la edad del relleno y su exposición al agua. La porción biodegradable de la basura urbana es descompuesta primero por la actividad microbiana que aprovecha el aire atrapado dentro del relleno. La cubierta de suelo agregada diariamente provee los microorganismos necesarios para esta fase.

Una vez agotado el oxígeno comienzan los procesos de reducción biológica de nitratos y sulfatos, mientras los microorganismos fermentadores y sintróficos generan ácido acético, CO₂ e H₂ que serán aprovechados por los metanógenos. Luego, ya agotados los materiales fácilmente degradados, sigue una fase llamada de maduración donde la producción de biogas es más lenta. La metanogénesis ocurre solamente cuando el contenido de agua de la basura excede el 50%.

Los residuos biodegradables que se transforman rápidamente tienen una composición aproximada C₆₈H₁₁₁O₅₀N, por lo tanto:



% en peso	27,6	71,6	0,8
% en volumen	50,8	47,8	1,4

El rendimiento de gas en el relleno es, en este caso, 0,88 m³/kg de material biodegradable y comúnmente hay 1 kg de fracción orgánica cada 4,9 kg de basura por lo que se forma 0,18 m³ biogas/kg basura.

El tiempo para que la mitad de la fracción degradable se transforme en biogas es aproximadamente de 1 año para los restos de alimentos, 5 para los residuos del jardín y 15 para los cartones. La proporción anual de producción de metano (k) se expresa como la inversa del número de años durante los cuales se libera biogas, si se espera que sea de 20 años k = 1/20 = 0,05.

La cantidad total de gas producido en un año determinado puede ser estimada por la ecuación:

$$\text{Gas}_t = R_0 V (e^{-kc} - e^{-kt})$$

donde: R_0 (m^3/kg) es el rendimiento de gas generado por kg de basura,
 V ($\text{kg}/\text{año}$) es la velocidad del relleno,
 t es el número de años desde que se inició el relleno sanitario,
 c es el número de años desde que se cerró el relleno y
 k ($1/\text{años}$) es la proporción anual de producción de metano.

Si fuera el caso de un relleno sanitario que recibe 100.000 toneladas por año, correspondientes a la basura originada por una población de 130.000 habitantes, se encuentra en el quinto año de operación y se espera cerrarlo al cabo de 10 años, es posible que produzca en ese año:

$$\begin{aligned}\text{Gas}_{(5)} &= 0,18 \text{ m}^3/\text{kg} \times 10^8 \text{ kg} \times (e^{-0,05 \times 0} - e^{-0,05 \times 5}) \\ &= 0,18 \times 10^8 (1 - e^{-0,25}) \text{ m}^3 = 3,7 \times 10^6 \text{ m}^3\end{aligned}$$

siempre y cuando las condiciones ambientales favorezcan la metanogénesis y no haya una gran cantidad de inhibidores entre la basura doméstica (26).

7.5. Etanol

El alcohol etílico es un aditivo conveniente, en una proporción del 10-15%, para mejorar el índice de octano del combustible. Este índice es una medida de la resistencia a la autoinflamación y se determina con relación a una mezcla de iso-octano muy resistente (índice 100) y heptano muy autoinflamable (índice 0) (19). También se emplea como combustible en motores adaptados al uso de etanol hidratado (95%) (20).

El etanol puede ser producido directamente por la conversión microbiana de la biomasa si se dispone de abundante cantidad de residuos con azúcares, almidón o celulosa a muy bajo costo. Las etapas son:

- Recolección y entrega de la materia prima en la planta productora de alcohol, la que dispone de suficiente espacio de almacenamiento para compensar las irregularidades de la provisión.
- Pretratamiento y transformación del material crudo en un sustrato fermentable. Las melazas residuales de la industria azucarera requieren poco más que una simple dilución, pero los materiales amiláceos o celulósicos deben ser sometidos a una hidrólisis ácida o enzimática (proceso llamado sacarificación).
- Fermentación de los mono- y disacáridos, seguida de la recuperación y purificación del alcohol por destilación.
- Tratamiento de los residuos de la fermentación o los efluentes, para recuperar subproductos que pueden ser usados como forraje, abono o para la obtención de energía (15).

7.5.1. Sustratos azucarados

Hay varios procesos industriales que producen residuos ricos en mono y disacáridos, aunque a veces resulta antieconómica la transformación a

etanol. El factor más importante es la disponibilidad de la materia prima para operar a pleno durante la mayor parte del año, sea el material crudo, los subproductos o los residuos que pueden ser almacenados sin sufrir deterioro como las melazas y los granos. Los residuos de frutas y otros materiales perecederos solo están disponibles en una época del año.

Cuadro 7.10. Residuos industriales con azúcares fermentables (15).

Producto primario	Residuos	Azúcares presentes	ton residuos/ton producto primario
Queso	Lactosuero	Lactosa 4,5 – 5%	12
Pulpa de papel	Licor sulfítico	Hexosas, pentosas 2%	18
Azúcar	Melazas	Sacarosa, glucosa, fructosa 55%	0,3

La caña de azúcar es el cultivo conveniente para la producción de alcohol porque tiene un alto rendimiento por hectárea. Cuando se cosecha la caña, las hojas se cortan y abandonan en el campo y los colmos se transportan al ingenio o destilería donde se lavan para la remoción de barro y piedras. Luego se trituran y muelen obteniéndose el jugo de caña que se puede emplear directamente, pero comúnmente se usan las melazas residuales generadas durante la producción del azúcar refinado (21). Estas melazas contienen aproximadamente 55% p/p de azúcares libres, principalmente sacarosa 35 a 45% y 15 a 20 % de azúcar invertido (glucosa + fructosa).

Las melazas se diluyen y acidifican, y se agregan sales de amonio o urea y nutrientes menores si son necesarios. A veces hay que separar el hierro, presente en cantidades suficientemente altas como para inhibir el crecimiento de las levaduras (20). Cuando se emplean melazas el rendimiento es 245 L de alcohol por tonelada (22).

Cuadro 7.11. Componentes principales de la caña de azúcar (21).

Componentes	% del colmo en peso
Sacarosa	12 – 16
Azúcares reductores (glucosa y fructosa)	0,2 – 1,5
Azúcares totales (en % de glucosa)	13 – 17
Fibra	9 – 13
Humedad	70 - 79

Cuadro 7.12. Rendimiento de las materias primas en la producción de etanol (22).

Cultivo	Rendimiento ton/ha*año	Etanol L/ton	Etanol L/ha*año
Sorgo dulce	45 – 80	60 - 80	1.750 – 5.300
Remolacha azucarera	15 – 50	90	1.350 – 5.500
Remolacha forrajera	100 – 200	90	4.400 – 9.350
Caña de azúcar	50 – 90	70 - 90	3.500 – 8.000

7.5.2. Sustratos amiláceos

Los granos se muelen en molino a martillo o de otro tipo para descascararlos y exponer el almidón que se pulveriza hasta el grado de tamiz malla 40. La harina se suspende en agua con agitación. Si se procede a la molienda húmeda del maíz suelen obtenerse varios subproductos como germen, gluten y aceite. El almidón contiene 10 a 20% de amilosa soluble en agua caliente y 80 a 90% de amilopectina insoluble en agua.

La pasta amilácea se neutraliza y agrega la α -amilasa de bacterias termofílicas u otros microorganismos. Se calienta hasta una temperatura óptima (cerca de 93°C con la enzima de bacterias) durante 15 minutos a unas pocas horas para que se produzca la ruptura de las paredes celulares y las uniones entre los polímeros (licuefacción). La mezcla de mono, di y oligosacáridos es luego acidificada y tratada con glucoamilasa a 60°C para lograr la hidrólisis completa. Se agrega sales de amonio o urea, compuestos de fósforo y potasio y el agua aporta los micronutrientes necesarios para el crecimiento de la levadura (20).

Cuadro 7.13. Rendimiento de las materias primas en la producción de etanol (22).

Cultivo	Rendimiento ton/ha*año	Etanol L/ton	Etanol L/ha*año
Maíz	1,7 – 5,4	360	600 – 1.944
Sorgo	1,0 – 3,7	350	350 – 1.295
Mandioca	10 – 65	170	1.700 – 11.050
Batata	8 – 50	167	1.336 – 8.350

7.5.3. Sustratos lignocelulósicos

Los pretratamientos pueden modificar a los materiales lignocelulósicos por:

- desfibración,
- solubilización y remoción de las hemicelulosas,
- reducción del grado de polimerización de la molécula de celulosa y/o
- alteración de la lignina (23).

Los materiales de diferente origen varían en el comportamiento frente a la hidrólisis enzimática debido a que las porciones cristalinas de la celulosa son más difíciles de degradar que las amorfas. El pretratamiento mecánico en un molino a bolas aumenta la superficie del sustrato y la explosión con vapor, adicionado o no de SO₂ o NaOH, mejora el acceso de la enzima a la celulosa (24). Las hemicelulosas al hidrolizarse producen pentosas que solo son fermentadas por algunos microorganismos.

7.5.4. Proceso

La fermentación es llevada a cabo por las levaduras en soluciones de 10 a 20% p/p de azúcar con pH entre 4 y 5, y a una temperatura entre 20 a 38°C durante 2 a 3 días para producir etanol en una concentración entre 8 y 10%. El filtrado del cultivo es destilado recogiéndose una solución con 50 a 60% de alcohol y redestilado para obtener el azeótropo con 95% (95,5°GL). Finalmente el azeótropo es codestilado con un hidrocarburo para obtener etanol anhidro. La masa de levaduras se puede recuperar para forraje (15).

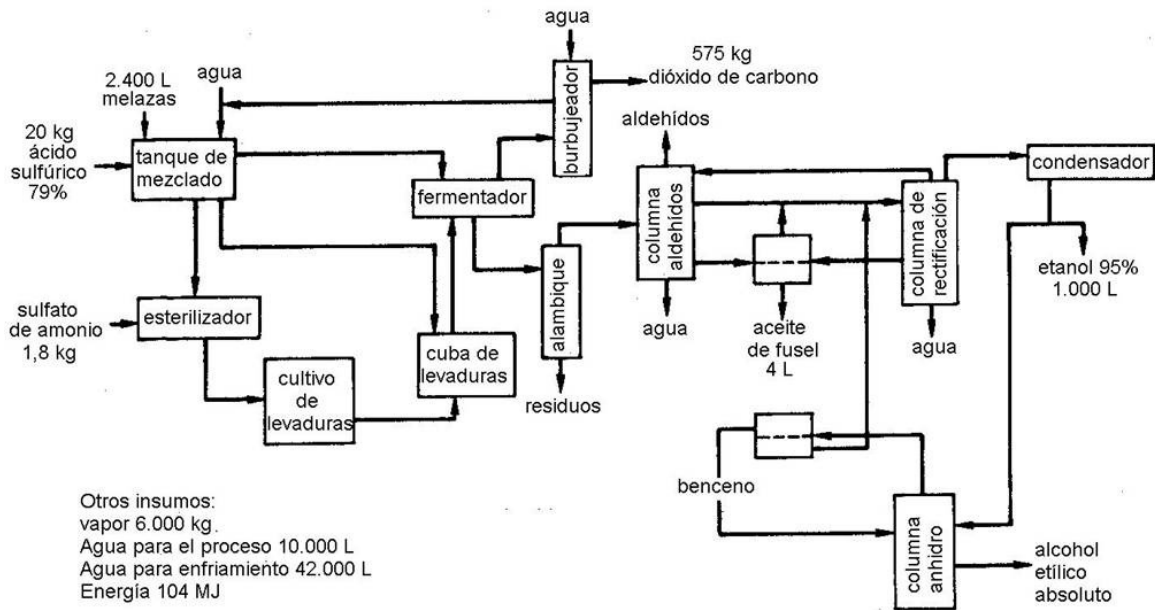


Figura 7.8. Esquema de la fermentación de melazas (20)

Como las materias primas constituyen hasta el 70% del costo final del etanol, se trata de obtener un alto rendimiento transformando la casi totalidad de los azúcares en alcohol a partir de materiales de bajo costo. El costo de los fermentadores representan la mayor fracción de los costos de capital y la productividad esta limitada por la inhibición debida al producto y la dificultad de retener altas concentraciones de microorganismos (23).

El reciclado de la levadura en las operaciones discontinuas tiene sus ventajas pero un modelo continuo requiere un equipo más pequeño con menores costos de operación y menos gasto de energía. Por ejemplo las levaduras pueden ser inmovilizadas en perlas de alginato de calcio u otro soporte y usadas en un sistema de lecho fluido para fermentar los carbohidratos (24).

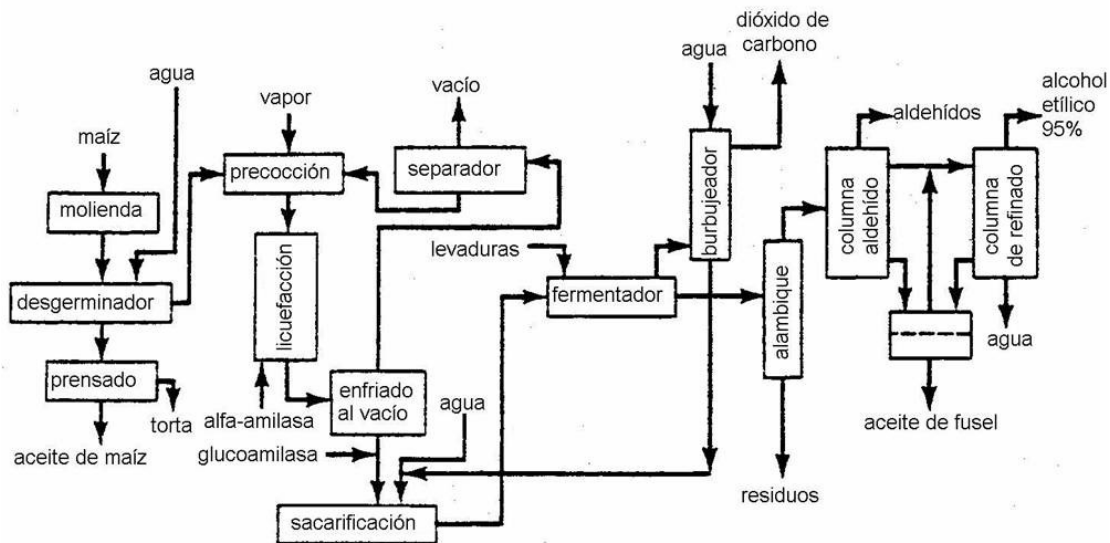


Figura 7.9. Esquema de la obtención de etanol a partir de maíz (20).

Los microorganismos comúnmente usados son levaduras, tales como *Saccharomyces cerevisiae* para las melazas y almidones hidrolizados, y *Pichia stipitis* para materiales celulósicos hidrolizados, pero también suele emplearse la bacteria *Zymomonas mobilis* para fermentar las hexosas (20).

Los ingenios y destilerías cuentan con unidades generadoras de electricidad y vapor abastecidas por el bagazo de caña que sobra tras la extracción del jugo. Si bien el procesamiento de la caña de azúcar dura medio año, se puede extender el período de funcionamiento de las destilerías empleando sorgo u otro cultivo (22).

Cuadro 7.14. Balance energético en la producción de etanol (22)

Cultivo	Rendimiento de la cosecha ton/ha*año	Alcohol producido L/ha*año	Energía MJ/ha*año				balance
			Gastada		Producida		
			agrícola	industrial	alcohol	residuo	
Caña de azúcar	54	3.564	17.313	45.246	78.437	73.220	+89.307
Mandioca	14,5	2.523	10.765	37.166	55.525	-	+ 7.594
Sorgo dulce	62,5	5.165	33.560	69.036	113.671	79.956	+91.031

Referencias

- Schink B. Microbiological and Molecular Biology Reviews 61: 262, 1997.
- Gustavsson M. Biogas Technology - Solutions in Search of Its Problem. Göteborg University, 2000. pp. 83. <http://www.he.gu.se>
- Madigan TM *et al.* Brock-Biology of Microorganisms. 10° ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- Atlas RM, Bartha R. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. 4° ed. Addison Wesley, Madrid, 2002.
- Schlegel HG. General microbiology. University Press, Cambridge, 1993.
- Smil V. Investigación y Ciencia 252: 64, 1997.
- Wheatley A, editor. Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology. Elsevier Science Publishers Ltd, Barking, Essex, 1990.
- Rohlich G.A. *et al.* Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes. National Academy of Sciences, Washington, 1977.
- Smith PH, *et al.*, editores. Methane from biomass: a systems approach. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, Essex, 1988.
- Taiganides EP. Zootecnia 35: 2, 1980.
- Elliott LF *et al.*, editores. Soils for Management of Organic Wastes and Waste Waters. American Society of Agronomy, Madison, 1977.
- Jagnow G, Dawid W. Biotecnología. Acribia, Zaragoza, 1991, cap. 5.
- Picchi CG. Comunicación personal, 2004.
- da Silva NA. Energia. Fontes Alternativas. 3 (14): 31, 1981.
- Rohlich G.A. *et al.* Food, Fuel and Fertilizer from Organic Wastes. National Academy Press, 1981.
- Van Buren A. A Chinese Biogas Manual. Intermediate Technology Publications, London, 1979.
- FAO/RAP. Rural Energy: Medium. RAP Bulletin, 1995, pp. 1-4.
- Prasad CR *et al.* Economic and Political Weekly, special number august 1974, p. 1347.
- Gaudemaris G de *et al.* Mundo Científico 58: 548, 1986.
- Klass DL. Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, SanDiego, 1998, cap. 11.
- Moreira JR, Goldemberg J. Investigación y Ciencia 61: 96, 1981.
- Gaden EL *et al.* Alcohol Fuels. Optios for Developing Countries. National Academy Press, Washington, 1983.
- Cunningham RE, López GD. Etanol de Lignocelulósicos. Tecnología y perspectivas. Programa CYTED. Universidad de Santiago de Compostela, 1994, cap.2
- Wyman CE, ed. Handbook on Bioethanol. Taylor & Francis, Washington, 1996, p. 253.
- Álvarez Mata J, ed. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Wastes. IAWQ Sponsored Book, Universidad de Barcelona, cap. 4
- Environment Australia. Methane Capture and Use: Waste Management Workbook. Commonwealth of Australia, 1998 (<http://www.greenhouse.gov.au/pubs/methane/>)