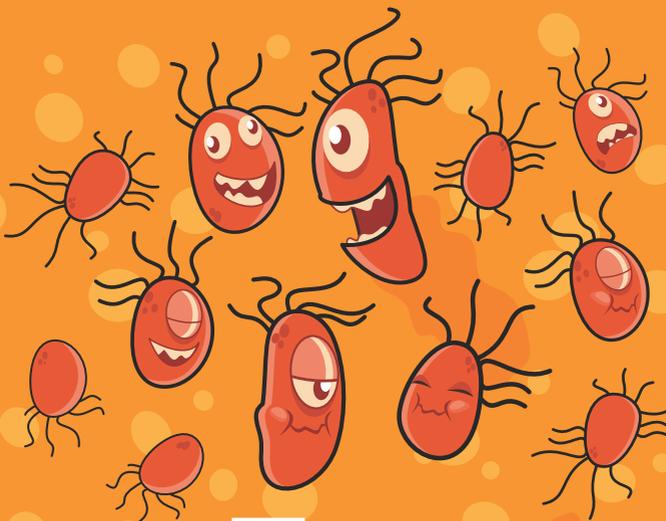
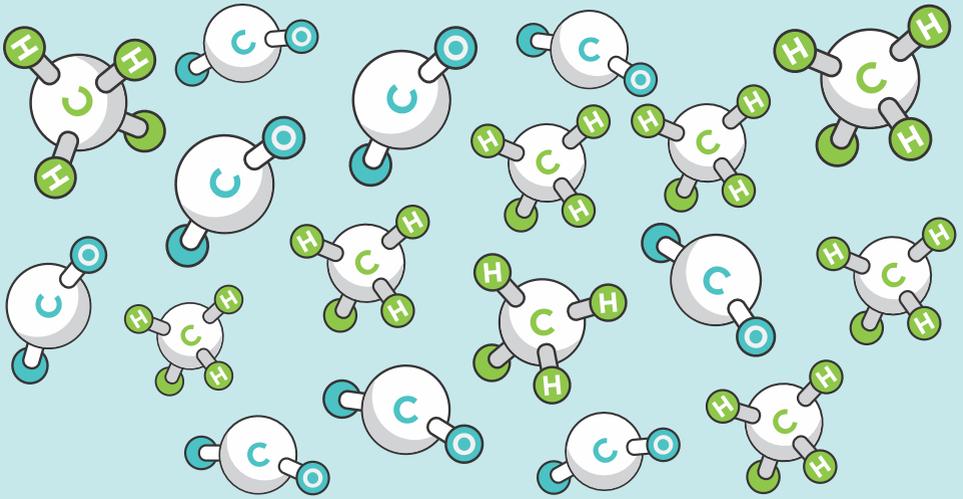


Manual de Uso del Biodigestor



PRÓLOGO

Santa Fe es una provincia con una impronta productiva que la distingue dentro del país, con una perfecta combinación de Campo e Industrias; y es por ello que tiene a las Bioenergías en su ADN. En otras palabras, las energías renovables derivadas de la biomasa son el núcleo que hace de esta provincia una de las regiones con mayor potencial para aprovechar este tipo de energías limpias y sostenibles.

Para cumplir con su designio, las energías renovables tienen que potenciarse con las particularidades de cada sociedad, tienen que echar raíces en la vida de la gente, por eso **Santa Fe es Bioenergética**.

Nuestra provincia tiene un modelo propio en **Energías Renovables**, "con" y "para" los santafesinos, dentro de un esquema de economía circular en el que los desechos se valoricen, transformándolos en activos energéticos para que los productores sean más competitivos y dueños de su propia energía.

Por eso, el Gobierno Provincial apuesta a generar políticas públicas innovadoras y accesibles como el **Programa Educación Energética**, con el objetivo de que cada santafesino y cada santafesina mejore su calidad de vida a través del conocimiento y la explotación de la potencia que tenemos, que aún está escondida.

Verónica Geese

Secretaria de Estado de la Energía



ÍNDICE

CAPÍTULO 1	7
1.1 ¿Qué es la digestión anaerobia o biodigestión?	8
1.2 ¿Qué es el bioabono o biofertilizante?	10
1.3 ¿Qué es el biogás?	10
1.4 ¿Cuáles son los beneficios de la utilización de los biodigestores?	10
1.5 Sustratos para la alimentación del Biodigestor	11
1.5.1 <i>¿Cómo se alimentan los microorganismos anaeróbicos?</i>	11
1.5.2 <i>La generación de biogás de los sustratos</i>	13
1.6 ¿Qué es el biodigestor?	13
CAPÍTULO 2	15
2.1 Características de nuestro biodigestor	16
<i>Algunos valores de diseño</i>	18
2.2 Alimentación de nuestro biodigestor	18
2.3 Guía de valores de diseño para nuestro biodigestor	20
CAPÍTULO 3	23
3.1 Acciones diarias para operar nuestro biodigestor	24
3.2 Acciones periódicas para operar y controlar nuestro biodigestor	25
3.3 Algunas recomendaciones	27
3.4 Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas	28
<i>Guía rápida de operación</i>	30
<i>Ejemplo de planilla de operación</i>	31
CAPÍTULO 4	33
<i>Inoculación</i>	38
<i>Alimentación de puesta en marcha</i>	39
4.1. Tabla de valores para puesta en marcha	40
<i>Glosario y fórmulas</i>	42

CAPÍTULO 1

La Biodigestión y el Biodigestor

1.1 ¿Qué es la digestión anaerobia o biodigestión?

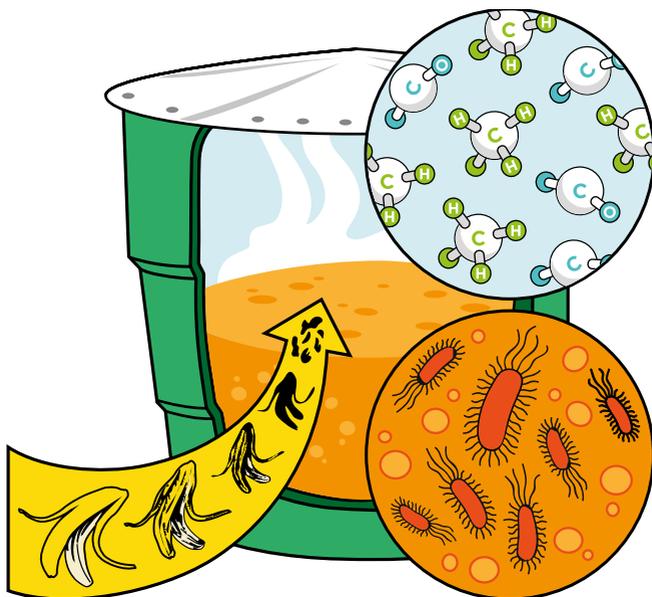
Es una fermentación en la cual una comunidad de microorganismos, que trabajan de forma sinérgica, se alimenta de materia orgánica y, en ausencia de oxígeno, es decir en condiciones anaeróbicas, generan biogás y bioabono como productos de su metabolismo.

Estos microorganismos se encuentran naturalmente en estiércol animal y en lodos de tratamiento de efluentes, entre otros.

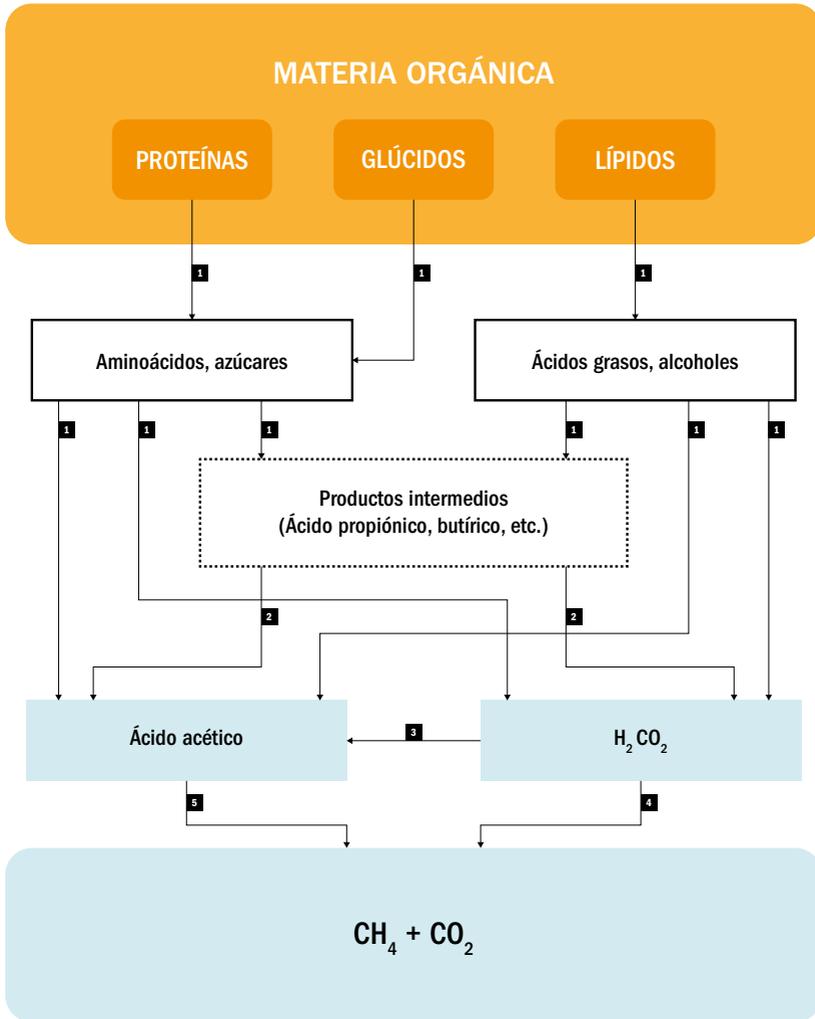
El biodigestor es el equipo en que sucede todo este proceso. Debemos tener en cuenta que los microorganismos dentro de él son seres vivos, por lo que son sensibles a los cambios bruscos en las condiciones, como temperatura y alimentación, por esto se los debe tratar con ciertos cuidados, procurando que los cambios sean progresivos. Un desequilibrio grave en alguna etapa

del proceso puede afectar a las etapas posteriores, ser muy laborioso de revertir, y demandar mucho tiempo para ello, e incluso imposible.

Este proceso no sucede en un solo paso, sino en etapas sucesivas, en las que los productos del metabolismo de los primeros microorganismos son aprovechados como alimento por los segundos y así sucesivamente. Para que las distintas etapas se completen, los microorganismos necesitan un determinado tiempo y, dado que con las bajas temperaturas su metabolismo se reduce, el tiempo requerido para el mismo proceso es mayor. Es por ello que, para un dado biodigestor, debemos reducir la cantidad de sustrato alimentado frente a temperaturas más bajas, como las invernales.



ETAPAS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA



- 1 Bacterias hidrolíticas-acidogénicas.
- 2 Bacterias acetogénicas.
- 3 Bacterias homoacetogénicas.

- 4 Bacterias metanogénicas hidrogenófilas.
- 5 Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

1.2 ¿Qué es el bioabono o biofertilizante?

Es el residuo ya digerido, en forma líquida, que sale del biodigestor. Conserva los nutrientes fundamentales de la materia

orgánica alimentada, como Potasio, Nitrógeno y Fósforo entre otros, y por esto funciona muy bien como fertilizante.

1.3 ¿Qué es el biogás?

Es un combustible, una mezcla de gases compuesta, en su mayor parte, por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en proporciones que varían según el residuo con el cual se alimenta al biodigestor y habitualmente rondan en un 50% de CH_4 .

Esta mezcla de gases es obtenida en el proceso de digestión anaerobia que libera la energía química contenida en la materia orgánica.

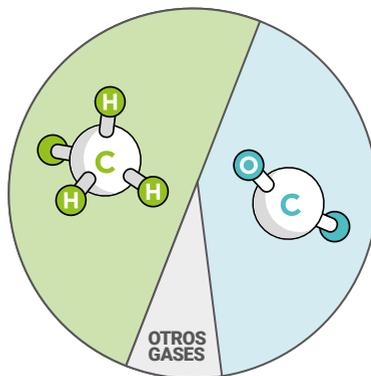
para generar la misma cantidad de calor. Aproximadamente, 1 metro cúbico (es decir, 1.000 litros) de biogás equivale a $\frac{1}{2}$ kilo de Gas Envasado.

Se encuentra dentro del campo de las Energías Renovables, ya que se produce a partir de materia orgánica, es decir, materia de origen animal o vegetal, que es una fuente renovable de energía.

10

Con las adaptaciones pertinentes, se puede utilizar en reemplazo de cualquier combustible gaseoso o líquido en cocinas, calefones, estufas, pantallas calefactoras, generadores, heladeras a gas y otros.

Tiene un poder calorífico menor al del Gas Envasado y al del Gas Natural, es decir que necesitaremos más cantidad de biogás que de los otros combustibles



1.4 ¿Cuáles son los beneficios de la utilización de los biodigestores?

- **Generación de biofertilizante**, que presenta grandes ventajas respecto de los fertilizantes sintéticos comerciales, ya que aporta además de nutrientes, materia orgánica (microorganismos entre

ella) con la que aquéllos no cuentan, y que resulta fundamental para la recuperación de la estructura del suelo, para mantener su fertilidad y evitar el proceso de desertificación.

• **Energía limpia**, ya que, como el resto de las Energías renovables, el biogás tiene menor emisión de Gases de Efecto Invernadero que una fuente fósil convencional.

• **Energía calórica de bajo costo**, ya que se obtiene un combustible a partir de residuos, que resulta mucho más barato que los combustibles disponibles en zonas a donde la red de gas natural domiciliaria no llega.

• **Tratamiento de efluentes** que el propio proceso de biodigestión constituye; con ciertas ventajas respecto de los tra-

tamientos aeróbicos tradicionales como ser: menores requerimientos de espacio, de energía y de transporte (en el caso de tratamientos tradicionales centralizados o traslado del efluente a disposición final).

• **Energía distribuida**, ya que el biogás no necesita de grandes plantas centralizadas, por lo que en cualquier punto aislado geográficamente, como una vivienda rural, un establecimiento pecuario o un pueblo pequeño, se puede generar y ser aprovechado in situ o inyectándolo a redes (eléctricas, por ejemplo, mediante la transformación correspondiente).

1.5 Sustratos para la alimentación del Biodigestor

1.5.1 ¿CÓMO SE ALIMENTAN LOS MICROORGANISMOS ANAERÓBICOS?

• **Sustratos Recomendables:**

Toda materia orgánica de origen animal o vegetal sirve como alimento o sustrato para la biodigestión. A modo orientativo, en el gráfico de la página siguiente, se listan los más comunes.

• **¿Qué residuos se deben evitar?**

Se deberá evitar la alimentación de residuos que no sean orgánicos, y aquellos orgánicos que se encuentren contaminados o que puedan obstruir el digestor.

• **Tamaño de los residuos:**

Es importante que los sólidos del residuo no sean grandes para que la digestión no se dificulte y se haga más lenta, y para que no se generen obstrucciones. Como referencia, es recomendable que no sean mayores a media manzana o una cáscara

de banana entera. Por eso si se cuenta con sólidos grandes, sería óptimo cortarlos o molerlos un poco.

• **Agregado de agua:**

Para vivir y trabajar correctamente, los microorganismos de la biodigestión necesitan una gran proporción de agua. Como los residuos orgánicos contienen agua (en distintas proporciones dependiendo de su origen), se debe agregar aún más agua al momento de alimentar, para lograr que el interior del biodigestor tenga la proporción adecuada de agua y sólidos, y que su aspecto y consistencia resulten los de un “caldo”. Los tipos de residuos y las proporciones de agregado de agua se detallan en los cuadros de las páginas 13 y 19 respectivamente.



✗ Sustratos Prohibidos



Huesos



Bolsas



Latas



Papeles



Cartón



Plástico



Tierra



Vidrio



Metal



Cerámicas



Residuos que contengan químicos¹



Residuos que contengan antibióticos²

✓ Sustratos Recomendables



Restos de café



Restos de yerba mate



Restos de comidas



Lácteos



Restos de carnes (sin huesos)



Alimentos en mal estado



Azúcares y dulces



Pan, pastas, harinas y granos



Cáscaras y restos de frutas y verduras



Estiércol y orina de animales

■ Residuos de cocina.

■ Residuos de granja.

¹ Insecticidas, lavandina, líquidos de limpieza, aguas de lavado, etc.

² Como el contenido en estiércol de animales tratados recientemente.

1.5.2 LA GENERACIÓN DE BIOGÁS DE LOS SUSTRATOS

Distintos sustratos tendrán distintos microorganismos capaces de degradarlos (todos ellos anaeróbicos). Además, la cantidad de biogás generado por los mismos también dependerá de las características del alimento que les haya provisto, es por eso que cada sus-

trato tiene un “potencial de generación de biogás”, que es la cantidad de biogás generado (en litros u otra unidad de volumen) por cada unidad de alimento (medida en kilos u otra medida de masa), es decir: “lt biogás/kg sustrato”.

Tipo de residuo				
	F.O.R.S.U.	Purín de cerdo	Estiércol vacuno	Desechos de huerta
Potencial de Generación (lt. biogás/kg.sólido fresco)	100	60	30	50

Entonces, por ejemplo:

- Si alimentamos a nuestro digestor con 2 kilos de *FORSU*³ por día, obtendremos 200 litros de biogás diarios. Por lo tanto, si lo hacemos con 20 kilos, serían 2.000 litros (o 2 m³) de biogás los obtenidos, que equivalen a 1 kg de Gas Envasado.

F.O.R.S.U.
20kg



=



- Si alimentáramos con 20kg de desechos de huerta, obtendríamos, en cambio, 1.000 litros (o 1 m³) de biogás.

Desechos de huerta
20kg



=



13



1.6 ¿Qué es el biodigestor?

Es el recipiente o tanque, cerrado herméticamente, donde se lleva a cabo el proceso de la biodigestión.

El equipo cuenta con dos partes fundamentales: la cámara de digestión o digestor propiamente dicho, donde los microorganismos degradan la materia orgánica

generando el biogás, y el gasómetro, donde se acumula el biogás generado.

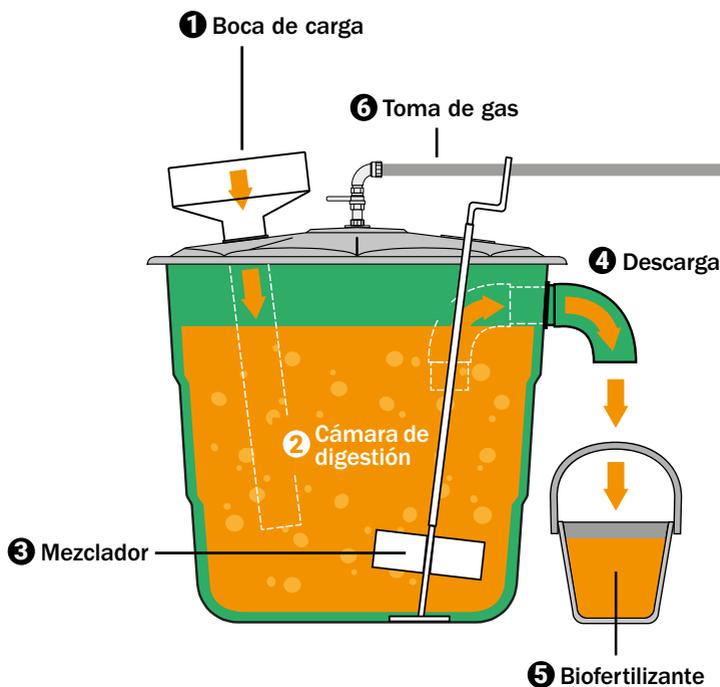
Existen de diversos modelos y tamaños; y los materiales para su construcción pueden ser mampostería y hormigón, metal, plástico u otros.

³ FORSU: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos; los residuos de comedor entran en esta categoría.

CAPÍTULO 2

Nuestro Biodigestor

2.1 Características de nuestro biodigestor

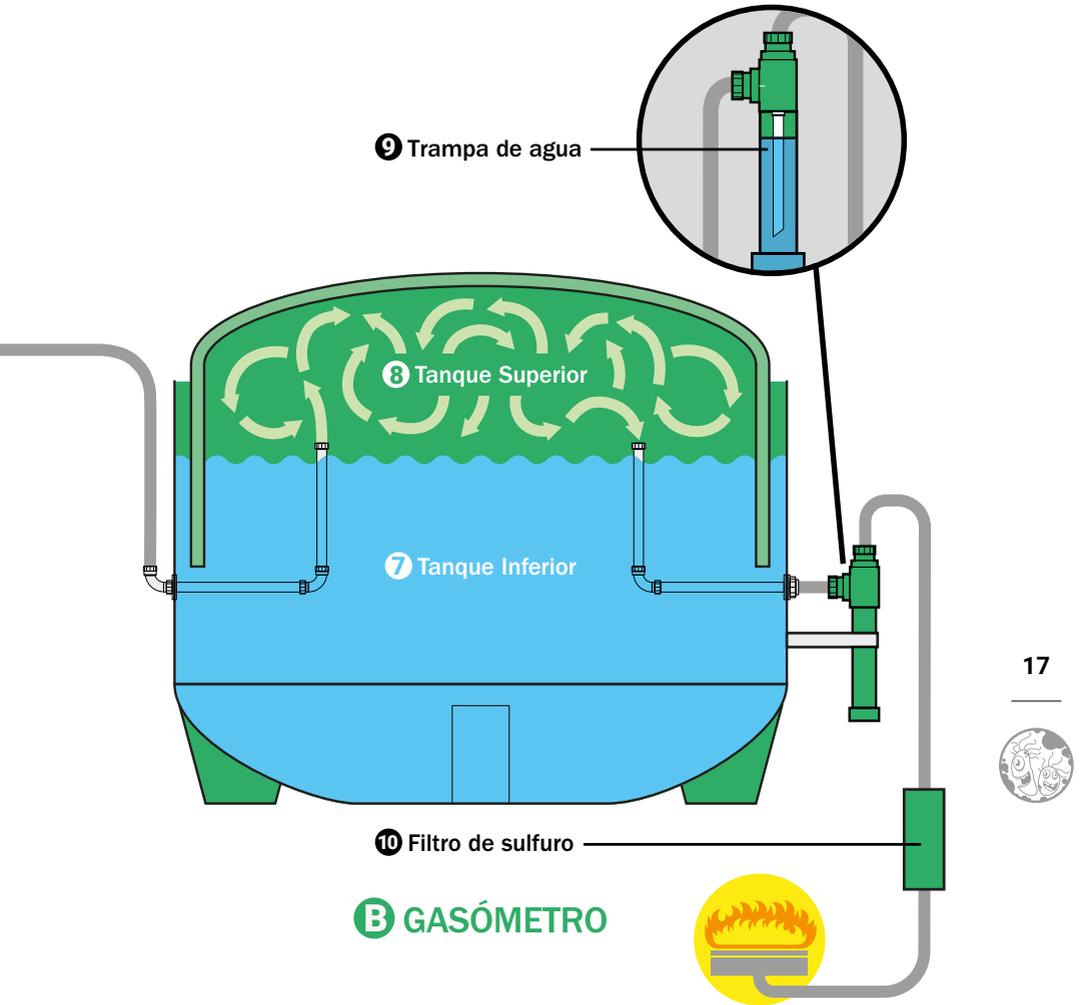


16

A BIODIGESTOR

El **BIODIGESTOR** (A) se alimenta por la **boca de carga** (1), que se conecta con la **cámara de digestión** (2), donde se produce la biodigestión. Ésta cuenta con un **mezclador** (3), el cual debe usarse diariamente para garantizar un mínimo mezclado del contenido; y la **descarga** (4), por donde se retira el

biofertilizante (5), colectándose en un balde para ser regado donde se desee. El biogás generado sale por la **toma de gas** (6) para ingresar al gasómetro. El **GASÓMETRO** (B) consta de un **tanque inferior** (7) lleno de agua que sirve como sello hidráulico para que no escape el biogás y como válvula de seguri-



dad contra altas presiones; y un **tanque superior** (8) invertido que sirve como acumulador de gas, el cual flota sobre el líquido y se eleva a medida que ingresa gas en él (es por ello que es importante que el nivel de agua se mantenga constante). Desde allí, el biogás se conduce hacia el consumo atravesando la **tram-**

pa de agua (9) (que colecta el vapor de agua contenido en el biogás y que, al condensarse generaría obstrucciones) y un **filtro de Sulfuro de Hidrógeno** (10), para purificar el biogás y aumentar la vida útil de los quemadores.

Algunos valores de diseño

Como puede concluirse de lo que hemos dicho, la producción diaria de biogás que tengamos, depende de muchos factores: no sólo de los ambientales y de cómo se maneje el biodigestor, sino fundamentalmente del sustrato con que se lo alimenta. Nuestro digestor está diseñado suponiendo que la alimentación son los restos de comedor, y para esa situación exponemos los valores para una temperatura ambiente ideal de entre 25 y 30 °C.

Si el alimento es distinto o las cantidades disponibles son menores, las condiciones de trabajo de los microorganismos y la cantidad de biogás generado serán también distintas.

Además, recordemos que, si la temperatura ambiente es menor, los microorganismos tardarán más tiempo para degradar la materia orgánica. Para todas estas situaciones, brindamos una guía en el punto siguiente.

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Alimentación diaria:
15 kg de FORSU + 15 lts. de agua. | <ul style="list-style-type: none"> • Equivalencia en gas emvasado
0,75 kg GE/día. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Generación diaria de biogás (aprox):
1,5 m³ biogás/día. | <ul style="list-style-type: none"> • Generación de biofertilizante:
30 lts/día (aprox.). |

2.2 Alimentación de nuestro biodigestor

18

Diariamente, el digestor se deberá alimentar por la cámara de carga con las cantidades definidas.

En el caso de que se disponga de FORSU y en las cantidades de diseño, se alimentarán, en verano, 15Kg de FORSU equivalentes a 5 baldes de 10 litros, a los cuales se les agregará 15 litros de agua, es decir 1 balde y ½ de los anteriores. De contar con otro tipo de residuo, las cantidades máximas necesarias se listan en la tabla a continuación:

Las cantidades de residuo y agua listadas son las máximas recomendadas para cada caso. **Si disponemos de una cantidad menor de residuos**, se deben respetar las proporciones indicadas, es

decir que, si por ejemplo, sólo disponemos diariamente de 1 balde de restos de comedor, agregaremos sólo 3 litros de agua, es decir, 1/5 de la cantidad de tabla (en estos casos, no es necesario reducir la alimentación en invierno, como se indicará en la tabla siguiente, dado que el digestor está trabajando por debajo de su capacidad máxima).

Por otro lado, si se quiere **alimentar con más de un tipo de residuo**, para simplicidad de cálculos y explicaciones, recomendamos un máximo de 2 residuos mayoritarios⁴ distintos, al menos por los primeros meses de operación del digestor y hasta conocer su comportamiento. Para esta situación, tenemos dos alternativas:

⁴ Es decir, con proporciones mayores a 20% sobre el total de la mezcla. Ejemplo: estiércol de vaca y FORSU en proporciones de 50% y 40% respectivamente, y agregados de desechos de huerta en un 10%.

Tipo de residuo



**Cantidad
Máxima kg/Día**

15 9 30 18 20 12 5 21

**Equivalente en
baldes 10lts**



5 3 3 2 2 1 11 7

**Agregado
de Agua lts/día**

15 9 - - 15 10 - -

**Equivalente en
baldes 10lts**



1,5 1 - - 1,5 1 - -

● **Verano** y temperaturas cálidas (Septiembre a Marzo).⁸

● **Invierno** y temperaturas frías (Abril a Agosto).

1. Lo más práctico para la operación diaria y cálculos es una alimentación alternada, respetando las proporciones y cantidades listadas, siendo alimentado un tipo de residuo por día.

Por ejemplo: Si se dispone de estiércol de vaca y FORSU: se alimenta el día lunes con 5 baldes de FORSU + 1 y ½ balde de agua; luego el martes 2 baldes de estiércol de vaca + 1 y ½ balde de agua; miércoles 5 baldes de FORSU + 1 y ½ balde de agua; y así sucesivamente.

2. Otra alternativa es una mezcla de alimentación igual todos los días, pero en ese caso, se deberá ser muy cuidadosos de calcular las cantidades correctas (tanto de agua como de sustratos).

Hay muchas proporciones posibles, pero para simplificar la explicación exponemos y recomendamos el caso de 50% de cada sustrato.

En el mismo ejemplo anterior, las cantidades serían iguales de lunes a viernes: 2 y ½ baldes de FORSU + 1 baldes de estiércol de vaca + 1 ½ baldes de agua.

Cualquier modificación que se desee realizar fuera de las alternativas sugeridas, se recomienda consultar los resultados con el personal de la Secretaría de Estado de la Energía (contacto: bioenergia@santafe.gob.ar) y/o con el consultor designado para la puesta en marcha, según sea el momento de la consulta.



⁶ Valores suponiendo una concentración de sólidos de los purines de entre 6 y 8%ST.

⁷ Idem anterior, para estiércol puro, sin agregado de agua de lavado, con concentración igual a 18%ST.

⁸ Temperaturas ambiente diarias promedio: temperaturas cálidas: mayores a 25 °C; temperaturas frías por debajo de 25°C. Los meses son indicativos: si se registraran temperaturas fuera del rango esperado para la época por un período mayor a 3 días, se deben ajustar las cantidades de alimentación, especialmente, si las temperaturas son bajas.

2.3 Guía de valores de diseño para nuestro biodigestor

En la siguiente tabla condensamos los valores de operación esperables para las cantidades máximas de sustrato que se recomiendan. En el caso de alimentar con

cantidades menores (por no disponer de más o por tratarse de épocas de bajas temperaturas) la cantidad de agua y la de biogás generado serán proporcionales.

Tipo de residuo					
Cantidad Máxima baldes 10 lts/Día	5	3	2	11	2,5 + 1**
Agregado de Agua baldes 10 lts/Día	1,5	-	1,5	-	1,5
Producción de Biogás (m ³ /día)	1,5	1	1	-	1,25
Variación Altura de Gasómetro* (cm/día)	65	45	25	70	55

20

*) En ausencia de consumo o venteos se debe recordar que estos valores son estimados y dependen de cada caso.

**) FORSU + Estiércol Vacuno. Mezcla al 50% de p/p.

Se brinda sólo un ejemplo de valores para mezcla de sustratos, dado que cubrir todas las posibles combinaciones de proporciones y tipos excede los límites de este manual. En este tipo

de casos, se harán los cálculos con el consultor encargado de la Puesta en Marcha del equipo, quien dará las indicaciones pertinentes.



CAPÍTULO 3

Operación del Biodigestor

3.1 Acciones diarias para operar nuestro biodigestor



Alimentación: Diariamente, se alimentará por la boca de carga con las cantidades correspondientes, según lo que se explicó en punto 2.2. Para el caso de diseño, serían: 15 Kg de FORSU (5 baldes de 10 lts) y 15 litros de agua (1 ½ balde)



Mezclado: Se recomienda mezclar lentamente el contenido del biodigestor entre 2 y 5 veces por día, durante al menos 2 minutos cada vez, accionando manualmente la manivela. Es fundamental remover antes y después de alimentar.



Descarga y disposición del biofertilizante: En cada alimentación, saldrá por rebalse a través de la boca de descarga, un volumen del líquido contenido en el biodigestor igual al que ha ingresado.



El líquido que emerge (digestato) se debe recolectar con un recipiente para ser dispuesto como fertilizante en algún lugar deseado luego de dejarlo en contacto con el aire por al menos medio día para que se oxigene.

A modo orientativo, 30 litros diarios de biofertilizante sirven para fertilizar 1.800 m², es decir un terreno cuadrado de 40 x 40 m o una franja de 100 m x 18 m de ancho⁹.



Revisión de la altura del gasómetro: A medida que el acumulador de gas se llena, aumenta su altura; esto a su vez indica que se está produciendo la biodigestión. Será importante registrar dicha altura tanto al inicio como al final de las actividades del día.

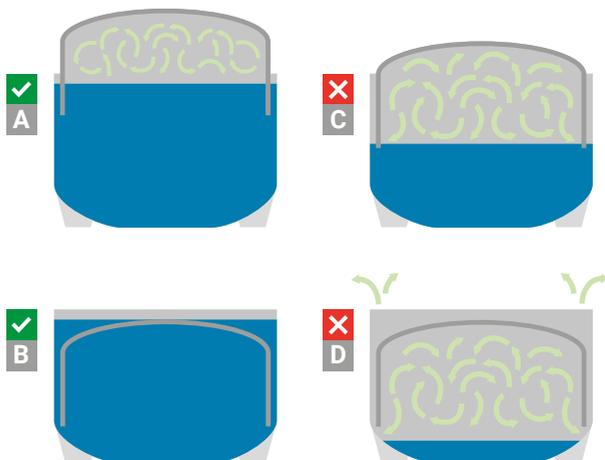
Para dejar asentadas las acciones diarias, sugerimos el uso de la planilla que se provee en la página 31 (y que tiene su versión digital en santafe.gov.ar/biodigestor, en donde ahondamos en algunos otros aspectos y cálculos).

⁹ A partir del dato para una fertilización media de 40.000 lt/(ha.año).

3.2 Acciones periódicas para operar y controlar nuestro biodigestor



Revisión de la altura del nivel de líquido del gasómetro: Como ya se explicó, el nivel de agua en el tanque inferior del gasómetro debe mantenerse constante (A y B); si éste desciende, se debe agregar agua por el codo para recarga de agua hasta alcanzar el nivel fijado, para asegurar el buen funcionamiento del gasómetro. Este control debe hacerse cada semana, **todos los viernes** o último día hábil de la semana idealmente.



NOTA: Si el nivel del líquido se encuentra por debajo de lo necesario (C), se pierde la referencia de la cantidad de biogás que realmente se encuentra acumulado en el gasómetro. Además, en la situación límite de que este nivel estuviera muy bajo (D), el líquido dejaría de actuar como sello para la salida del biogás, y éste se perdería a la atmósfera.



Análisis de los datos registrados y evaluación de la operación del biodigestor: Una vez por semana o, como máximo, cada 15 días, es importante revisar los datos registrados en la Planilla de operación y analizarlos a conciencia, para poder descubrir modificaciones relevantes en los valores de los parámetros y así detectar de forma temprana algún inconveniente que hubiera con el funcionamiento del biodigestor, es



decir en el proceso de biodigestión: una variación fuera de lo común¹⁰ (de más del 40% de los valores habituales, por ejemplo) en alguno de los parámetros medidos, debe alertarnos e impulsarnos a buscar soluciones. Como ya sabemos, una detección temprana puede evitar que el problema se agudice. Como se observa en la tabla de “Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas” (Punto 3.4), muchos de ellos se reflejan en el volumen de biogás generado diariamente y también tienen su causa en el tipo y cantidad de la alimentación.



Medición del pH del contenido de la cámara de digestión:

Una vez a la semana se recomienda verificar, con ayuda de las “cintas de pH”, que el valor del mismo esté entre 7 y 8, según la escala de colores de aquéllas¹¹.

Se deberá tomar una muestra del contenido del biodigestor, por la boca de descarga o por la válvula de desagote, luego de haber removido el contenido accionando el mezclador por al menos 2 minutos. La muestra se coloca en un vaso o recipiente pequeño; en él se sumerge por unos 10 segundos la parte coloreada de una de las cintas, se saca, se sacude el excedente de líquido y se compara la tonalidad de cada uno de los cuadrados de colores con los colores de muestra para cada valor de pH provistos en la caja.

26

NOTA: Si bien existen muchos métodos de medición de parámetros y control de la operación del biodigestor, que demandan mayor infraestructura (ya sea de instrumental de medición, como de equipos de laboratorio) y que permiten un seguimiento más riguroso y una detección de problemas y sus causas mucho más ajustados, tengamos en cuenta que en nuestras instalaciones, sólo tendremos acceso a unos pocos y básicos medios de medición de parámetros: pH y cantidad de biogás producido. Es por ello que es muy importante nuestra observación: una vez que conozcamos al biodigestor y sepamos qué esperar de él

en las distintas situaciones; este saber y un seguimiento cuidadoso, serán nuestras mejores herramientas.

El valor del pH es muy importante, pero también debemos saber que, cuando éste desciende, es un indicio de que el proceso se encuentra seriamente desequilibrado (ya sea en tiempo transcurrido o en gravedad del impacto). Es por ello que no es recomendable basar el control de la operación sólo en la medición del pH, porque cuando observemos la modificación del mismo puede ser tarde y dificultoso de revertir.

¹⁰ Sin razones aparentes. Es decir: si por ejemplo, hemos reducido la alimentación de un sustrato a la mitad, es esperable que luego de algunos días, la producción de biogás sea aproximadamente también la mitad de la registrada anteriormente con la alimentación inicial.

¹¹ El valor exacto de la cota inferior es 6,8; pero dado que las cintas sólo permiten una aproximación al valor con una sensibilidad en la medición de 1 punto y que un descenso por debajo de 6,5 podría ser peligroso, tomamos los valores mencionados.

3.3 Algunas recomendaciones

ALIMENTACIÓN

Como ya se ha dicho, la alimentación del digestor debe ser lo más uniforme y constante posible (sólo siendo interrumpida durante los fines de semana, si no hay posibilidades de evitarlo). Si durante el receso escolar es inevitable que se suspenda la alimentación, al retomar las actividades, se deberán seguir las indicaciones del capítulo 4.

En caso de hacer cambios en la misma, éstos deben ser graduales y siguiendo las indicaciones del manual (ya sea las de Puesta en Marcha, como las de la tabla de “Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas”).

FUNCIONAMIENTO

Controlar la posición de las válvulas de conducción de gas, las cuales deben estar dando paso al gas hacia el gasómetro, es decir, paralelas al caño.

Controlar que las bocas de carga y des-

carga de la cámara de digestión no se encuentren obstruidas.

Evitar apoyar elementos que puedan dañar el equipo o elementos pesados sobre el gasómetro, que le den más presión al biogás en el consumo.

AL RETOMAR ACTIVIDADES

Al inicio del año lectivo, se recomienda realizar algunas acciones de control y mantenimiento de las instalaciones, especialmente en los equipos que están bajo el sol durante más de 3 horas por día y que no hayan sido alimentados durante el receso escolar. Revisar las juntas, válvulas, conexiones y tapa en busca de pérdidas de gas, sobre todo en caso de que no se esté acumulando biogás. Se recomienda utilizar agua y detergente para esta verificación.

Si el equipo no ha sido alimentado durante el receso, se deberá comenzar a alimentarlo gradualmente, siguiendo los pasos de la PUESTA EN MARCHA.



3.4 Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas

INDICIOS

PROBLEMA

- Disminución en la producción de biogás (altura de gasómetro). *Sobrealimentación.*
- Acidificación del contenido de la cámara de digestión. Medición de **pH inferior a 6**.
- Dificultades para mover el mezclador.

28

Disminución en la producción de biogás (sin cambio importante en el valor de pH). *Antibióticos en alimentación - muerte de la población de microorganismos.*

Disminución de la actividad microbiana por bajas temperaturas¹⁴.

Disminución en la producción de biogás (altura de gasómetro). *Biogás ocluido en el seno del líquido.*

Llama de hornalla o quemador no enciende o se apaga fácilmente. *Disminución de proporción de CH₄ en biogás.*

¹² Estiércol puro, sin agregado de agua de lavado, como el de feedlot o de tambo a la salida de la pista de ordeño, es decir, antes de mezclarse con el agua de lavado. En caso de que el inóculo sea otro, realizar los cálculos correspondientes, con ayuda de las fórmulas 1 y 2 del "Glosario y fórmulas".

¹³ Cantidades calculadas para ejemplo de estiércol como inóculo.

¹⁴ No es un "desperfecto" a resolver en sí mismo, sólo debemos estar atentos y tomar las acciones que se explican para evitar llegar a la situación de sobrealimentación, dado que los microorganismos en estas condiciones, metabolizan más lentamente el alimento provisto. Nuestro biodigestor cuenta con una aislación térmica considerable, sin embargo esto no evita que el contenido del mismo experimente temperaturas bajas cuando la externa sea menor a 10°C. En esta situación es esperable que la actividad de los microorganismos descienda.

ACCIÓN PARA REMEDIARLO

Suspender la alimentación por al menos 1 semana, mientras se controla la producción de biogás y el pH, y se verifica que ambos aumenten. En caso de observar demasiado espeso el interior del biodigestor agregar agua y mezclar el biodigestor con el fin de diluir el material que se está biodegradando.

Si al fin de la semana, el pH ha recuperado el valor de 7, retomar la alimentación con $\frac{1}{4}$ del valor diario de diseño (ej: $\frac{1}{4}$ de 5 baldes de FORSU y $\frac{1}{4}$ de 1 balde de agua, es decir, redondeando: 1 balde de FORSU + $\frac{1}{4}$ de balde de agua) y continuar según el esquema de Puesta en Marcha (ver página 37) a partir del punto 6.

Si continúa esta situación, hacer recambio de $\frac{1}{4}$ del contenido del biodigestor con inóculo nuevo, es decir, cargar con 4 baldes de 10 litros de estiércol vacuno¹² y 90 litros de agua¹³. Luego de esto, mantener sin alimentación el biodigestor durante 1 semana, controlando pH y producción de biogás. Si al final de la misma, el pH se mantiene o llega a valores admisibles (por encima de 7), continuar según el esquema de Puesta en Marcha (ver página 37) a partir del punto 6.

Vaciar el biodigestor e iniciar la Puesta en Marcha desde el inicio.

Disminuir la alimentación a la mitad del valor de diseño, mientras se controla el pH. En caso de notarse una disminución del mismo, suspender la misma por una semana y luego retomar con una cantidad aún menor, por ejemplo, $\frac{1}{4}$ de la cantidad de diseño.

Mezclar el contenido más y mejor: accionar el mezclador por más tiempo y más veces por día.

Alimentar con 1 taza de azúcar o 2 tazas de sorgo molido o maíz molido¹⁵ durante 1 semana, luego retomar la alimentación de diseño gradualmente, esto es: durante 3 semanas ir disminuyendo día a día la cantidad de azúcar o sorgo al tiempo que se aumenta la del sustrato final (Ejemplo: día 1: 1 taza de azúcar (3 tazas); días 2, 3 y 4: 2 $\frac{1}{2}$ taza de azúcar + $\frac{1}{2}$ balde de FORSU ($\frac{1}{8}$ de 5 baldes (aprox); días 5,6 y 7: $\frac{1}{2}$ taza de azúcar + 1 balde de FORSU ($\frac{1}{4}$ de 5 baldes, aprox) y así hasta llegar a 5 baldes de FORSU sin agregado de azúcar y retomar la operación habitual. *Esta una situación que no debería presentarse si no se ha alterado abruptamente la alimentación.*

¹⁵ Es muy importante que el material sea molido: la velocidad de respuesta del sistema será mayor, dado que el alimento se encuentra más disponible para los microorganismos y, por tanto, la degradación será más rápida.



Guía rápida de operación

Todos los días, al momento de alimentar al biodigestor.



1. Ubicar balde bajo la descarga.



2. Mover mezclador durante 2 minutos.



3. Alimentar por boca de carga.



4. Mover mezclador durante 2 minutos.



5. Retirar el digerido, guardar en lugar aireado.

Ejemplo de planilla de operación

Pasar los valores registrados a la planilla de operación digital antes de utilizar esta.

Día de la semana	Cantidad de baldes (10 lts)		Altura de Gasómetro (cm)				Mezclado		Consumo Biogás
	Sustrato	Agua	Al Inicio del día	Al Inicio del uso	Al Fin del uso	Al Fin del día	Respon-sable	Horario/Tiempo (min)	Tiempo Utilizado
Ejemplo	4	1	70	80	30	40	Virginia	8:00/2' - 12:00/2'	45'
Lunes									
Martes									
Miércoles									
Jueves									
Viernes									
Sábado									
Domingo									
Lunes									
Martes									
Miércoles									
Jueves									
Viernes									
Sábado									
Domingo									



CAPÍTULO 4

La puesta en marcha



La puesta en marcha del biodigestor consiste en todas las acciones que deberemos llevar adelante **partiendo del equipo vacío hasta llegar a que el mismo funcione con los valores de diseño**, es decir con las cantidades de sustrato alimentadas y producción de biogás diarias que figuran en la tabla del punto 2.3. Básicamente, consiste en 2 pasos: la inoculación y la aclimatación (del inóculo a las condiciones de operación). Hay diversas formas de realizar la puesta en marcha; aquí describiremos una de ellas, que consideramos más sencilla dado que requiere pocas acciones de control y operación¹⁶.

La **inoculación** es el agregado al biodigestor de un material que contenga comunidades de microorganismos anaeróbicos, los que crecerán y se reproducirán, dando inicio al proceso de biodigestión que debe tener lugar dentro del equipo. Los materiales que se usan más comúnmente son el contenido de otro biodigestor (y si éste trabaja con el mismo sustrato con que lo hará el nuestro, es ideal), estiércol de vaca, líquido de una zanja o estiércol de cerdo (listados en orden decreciente de conveniencia por la facilidad del proceso de puesta en marcha). La elección del mismo dependerá de la facilidad que tengamos para conseguirlos en primer lugar, y del sustrato con el cual alimentaremos a nuestro digestor en la operación normal posterior, en segundo término.

En los casos en que se toman materiales que no provienen de un biodigestor, sino de un receptáculo abierto, como una fosa de tambo o una zanja, es recomendable extraer el material desde la mayor profundidad posible, para garantizar condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno) y la mayor cantidad de poblacio-

nes de microorganismos anaerobios. La cantidad de este material que se carga al biodigestor para la inoculación depende de su contenido de humedad. Si se trata de bosta fresca de vaca (sin mezcla con agua), es decir, por ejemplo proveniente de un *feedlot*, se agregará un volumen de estiércol igual a un cuarto del volumen total; para nuestro digestor, corresponde al contenido de un tambor de 200 litros al 85% de su capacidad aproximadamente. En caso de que sean inóculos líquidos, como el contenido de una zanja o el de una fosa de tambo o de criadero de porcinos, la cantidad será mayor y surgirá de un cálculo que hará el consultor a cargo de la puesta en marcha, en base a datos del material, pudiendo ser hasta la mitad del volumen total de la cámara de digestión (500 litros). Es recomendable que el personal de la Escuela registre este valor que será de utilidad en caso de que deba hacer una nueva inoculación con el mismo material en algún inicio del año lectivo. Se debe medir el pH del inóculo para tener esta referencia, pero es esperable que en todos los casos, esté cercano a 7.

En este mismo paso, cargaremos el biodigestor con una mezcla de alimentación inicial para los microorganismos, hasta completar la mitad de la cámara, es decir 500 litros. Esta alimentación se debe preparar mezclando el sustrato con agua en cantidades tales que la mezcla tenga una concentración del 6% ST¹⁷.

La metodología de inoculación descrita aquí involucra una etapa "batch" o discontinua, es decir que se carga el biodigestor con ciertos materiales al inicio de dicha etapa, se cierra el sistema y no se agregan o retiran materiales a la cámara de digestión hasta el fin de la misma (en este caso, durante unos 25 o 30 días).



¹⁶ La intención es que la forma descrita en este manual sea la que el personal de la escuela siga en caso de necesidad de hacer una puesta en marcha futura, por alguna salida de régimen del sistema; sin embargo, es posible que el consultor designado para la puesta en marcha inicial del equipo, siga otra mecánica.

¹⁷ Ver "Glosario y Fórmulas". La cantidad de sustrato y agua necesarios para ello depende del tipo de sustrato y se puede calcular con las ecuaciones 1 y 2 que se exponen en "Glosario y Fórmulas", al final de este manual. Durante la puesta en marcha, el consultor podrá asesorar al personal para realizar este cálculo.

Es decir que, a lo largo de ese período, en el interior de nuestro equipo sólo habrá el inóculo y la alimentación que cargamos en el primer día, tal como se describió previamente. Durante este tiempo, enton-

ces, los microorganismos en el interior del biodigestor, se alimentarán del sustrato cargado al inicio, se “acostumbrarán” a él y generarán una cierta cantidad de biogás, producto de su metabolismo.



NOTA: tanto los sustratos como inóculos indicados, así como sus cantidades son sólo ejemplos. Las cantidades relativas se deberán calcular para cada caso con ayuda de las fórmulas 1 y 2 ya mencionadas. Se recomienda, sin embargo, mantener fijas las cantidades de 500 litros para cada parte (inóculo y alimentación).

La **aclimatación** consiste en aumentar las cantidades de sustrato alimentado, hasta llegar a las cantidades de operación, de forma gradual para dar tiempo a los microorganismos a que se adapten al nuevo alimento, crezca la población de ellos dentro del biodigestor, e incluso cambie su composición (se reproduzcan las especies más propicias para el sustrato y las condiciones de nuestro equipo). En todos los casos, la proporción de sustrato y agua que se alimenta es constante, es decir que si las proporciones de diseño son 5 baldes de FORSU + 1 balde de agua, y se comienza con el 40% de la alimentación de diseño, ésta será: 2 baldes de FORSU + 6 litros de agua (3 botellas de 2 litros, por ejemplo); y a partir de allí, se aumentarán las cantidades cada 1 semana, siempre que los

parámetros a medir sean los adecuados (ver más adelante).

La **Puesta en Marcha (PM)** incluye, luego de este aumento progresivo en las cantidades alimentadas, la operación del biodigestor durante un tiempo considerable (al menos 3 semanas) con las cantidades finales o “de operación”, para corroborar que en esas condiciones, el sistema permanece estable.

La etapa de Puesta en Marcha puede prolongarse entre 30 y 60¹⁸ días para un digestor del tamaño como el nuestro, dependiendo del inóculo, el sustrato elegido y la temperatura ambiente del momento.

A lo largo de ese proceso, se deberán controlar ciertos parámetros, como la

¹⁸ Sin contar las 3 semanas a operación estable que se mencionan en el párrafo anterior.



producción de biogás y el *pH* del contenido de la cámara de digestión, para asegurarnos de que el mismo está funcionando adecuadamente, es decir que la cantidad de alimento que le brindamos es la adecuada a cada momento y que el crecimiento en la población de los microorganismos es el esperado. Dado que el sistema aún no ha llegado al equilibrio, las diversas reacciones no se llevan a cabo en las proporciones definitivas ni de forma completa en algunos casos, por lo que al inicio de la puesta en marcha, el biogás producido por los microorganismos tiene proporciones distintas de CO_2 y de CH_4 : cuenta con más concentración de CO_2 en la mezcla, es decir que no será capaz de encender una llama¹⁹. Como regla práctica, se recomienda descartar el contenido de los primeros 2 gasómetros llenos.

A continuación se describen las acciones a realizar durante la puesta en marcha, en la que se toman como ejemplo para el inóculo, estiércol vacuno, y como sustrato, FORSU. En los casos en que alguno o ambos sean distintos, las acciones descritas en los recuadros anaranjados se modificarán (en cantidades o características).

1. Preparar 500 litros de mezcla de alimentación con las cantidades necesarias para que tenga una concentración del 6% ST.

2. Medir *pH*, en caso de ser $\text{pH} < 6$ o $\text{pH} > 9$, corregirlo con el agregado de un ácido (puede ser vinagre) o una base (preferentemente, soda cáustica - Hidróxido de Sodio) en caso de ser necesario, para acercarlo a 7. En esta operación hay que ser pacientes y cuidadosos, para no excederse, agregando cada vez cantidades pequeñas del ácido o la base, dando el

tiempo suficiente para la homogeneización y mezclando largamente.

3. Agregar el inóculo (y completar el volumen del biodigestor con agua o con el mismo inóculo, dependiendo del caso)²⁰.

4. Mezclar bien y verificar que el valor del *pH* este cercano a 7.

5. Dejar transcurrir entre 25 y 30 días verificando la generación de biogás y midiendo una vez a la semana el *pH*. En el transcurso de esos días, ventear a la atmósfera el contenido de los 2 primeros gasómetros que se llenen para eliminar todos los gases inútiles. Se puede intentar quemar el contenido de los gasómetros restantes, que ya contará con concentraciones más elevadas de metano.

6. Una vez cumplido con el tiempo de residencia de degradación de la materia orgánica se procede a realizar la alimentación continua del biodigestor de la siguiente manera:

- Semana 1: 40% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 2: 60% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 3: 80% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 4: 100% de la cantidad correspondiente de diseño.

A medida que se va aumentando la carga del biodigestor, a lo largo de las 4 semanas, verificar valores de *pH* para que los mismos se encuentren²¹ en 7.

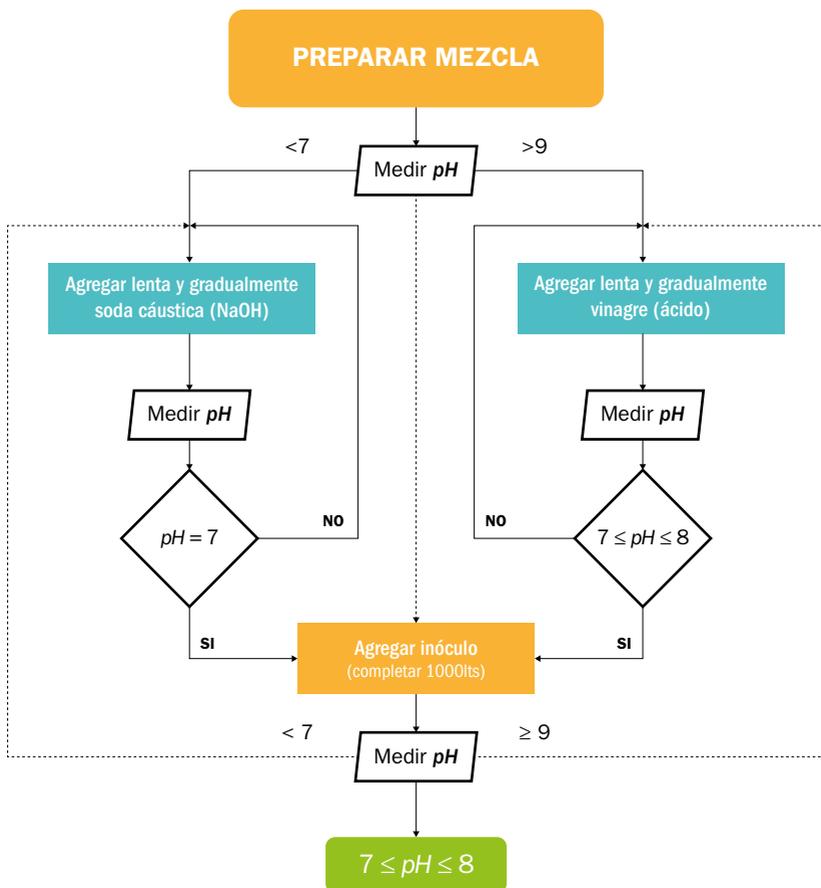
Una vez finalizadas estas etapas, se inicia la **“operación normal”**.

¹⁹ Recordemos que el componente combustible del biogás es el metano (CH_4).

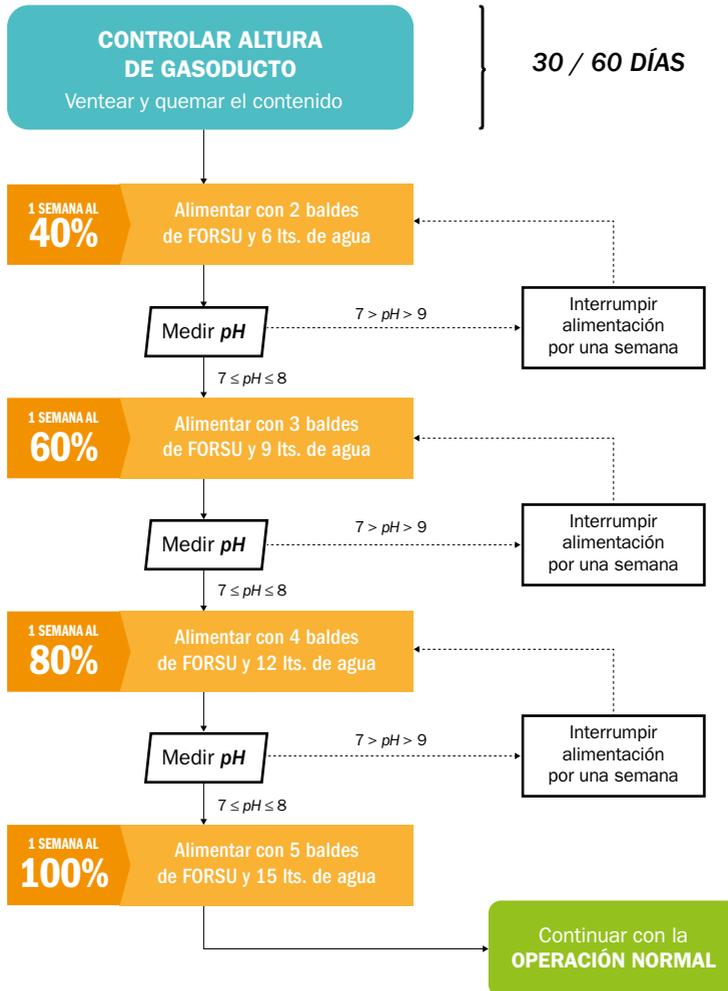
²⁰ Dependiendo del contenido de humedad del inóculo, tal como se explicó en la página 35.

²¹ Como ya se ha dicho, el biodigestor puede funcionar adecuadamente con valores de *pH* algo menores a 7, por ejemplo: 6.5. Sin embargo, dado que el instrumento de medición no nos permite una precisión mayor a la unidad, es preferible ser rigurosos y evitar desvíos que no se aprecien y que sean, por lo tanto, riesgosos.

Inoculación



Alimentación de puesta en marcha



4.1. Tabla de valores para puesta en marcha:

Para facilitar el control del proceso de puesta en marcha, se sugiere completar la siguiente tabla con los valores correspondientes. Se brinda un ejemplo para FORSU (que es el que se expone en el

diagrama de flujo precedente). Los valores para el resto de los sustratos deberán calcularse con ayuda del consultor a cargo de la puesta en marcha.

Día del proceso	Día de la semana	Porcentaje de la cantidad final de sustrato	Cantidad	Ejemplo para FORSU		Mi sustrato:.....	
				Sustrato	Agua	Sustrato	Agua
1	Lunes	10%	Balde de 10 lts/día	4	1		
2	Martes	10%		4	1		
3	Miércoles	10%		4	1		
4	Jueves	10%		4	1		
5	Viernes	10%		4	1		
6	Sábado						
7	Domingo						
8	Lunes	25%		10	2.5		
9	Martes	25%		10	2.5		
10	Miércoles	25%		10	2.5		
11	Jueves	25%		10	2.5		
12	Viernes	25%		10	2.5		
13	Sábado						
14	Domingo						
31	Lunes	40%	Botellas de 1 lts/día	2	½		
32	Martes	40%		2	½		
33	Miércoles	40%		2	½		
34	Jueves	40%		2	½		
35	Viernes	40%		2	½		
36	Sábado						
37	Domingo						
38	Lunes	60%		3	¾		
39	Martes	60%		3	¾		
40	Miércoles	60%		3	¾		
41	Jueves	60%		3	¾		
42	Viernes	60%		3	¾		
43	Sábado						
44	Domingo						
45	Lunes	80%	4	1			
46	Martes	80%	4	1			
47	Miércoles	80%	4	1			
48	Jueves	80%	4	1			
49	Viernes	80%	4	1			

50	Sábado						
51	Domingo						
52	Lunes	100%		5	1,5		
53	Martes	100%		5	1,5		
54	Miércoles	100%		5	1,5		
55	Jueves	100%		5	1,5		
56	Viernes	100%		5	1,5		
57	Sábado						
58	Domingo						
59	Lunes	100%	Botellas de 1 lts/día	5	1,5		
60	Martes	100%		5	1,5		
61	Miércoles	100%		5	1,5		
62	Jueves	100%		5	1,5		
63	Viernes	100%		5	1,5		
64	Sábado						
65	Domingo						
66	Lunes	100%		5	1,5		
67	Martes	100%		5	1,5		
68	Miércoles	100%		5	1,5		
69	Jueves	100%		5	1,5		
70	Viernes	100%		5	1,5		
71	Sábado						
72	Domingo						
73	Lunes	Fin de Puesta en Marcha. Inicio de la operación normal.					
74	Martes						
75	Miércoles						
76	Jueves						
77	Viernes						
78	Sábado						
79	Domingo						
80	Lunes						
81	Martes						



Glosario y fórmulas

FORSU: Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos; los residuos de comedor entran en esta categoría.

Digerido/digestato/biofertilizante: efluente del biodigestor, materia orgánica degradada y estabilizada rica en elementos minerales, en forma de barro que es el subproducto de la generación de biogás. En función a la carga usada y el proceso seguido, esta materia orgánica, también conocida como bioabono, puede presentarse de dos formas: líquida, conocida como biol y sólida, conocida como biosol. Es muy valioso para uso como fertilizante y su aplicación mejora la estructura porosa del suelo y la retención de humedad, favoreciendo el desarrollo de microorganismos, entre muchas otras ventajas.

pH: índice adimensional del grado de acidez o basicidad de un fluido. Su escala es de 1 a 14, siendo 1 el extremo más ácido (ej: ácido de baterías) y 14 el más básico (ej: soda caústica). El agua potable tiene un pH cercano a 7.

Factor o variable de operación: el valor o característica que la variable o factor debe tener a lo largo de la vida del biodigestor, durante la operación estable, y no en situaciones de transición y circunstanciales como la puesta en marcha o una salida de régimen indeseada. El equipo se diseña considerando estos valores.

42 **%ST:** porcentaje de Sólidos Totales = gramos de Sólidos Totales /100 g de mezcla.

Balance de masa - cálculo de cantidades para alimentar o inocular el biodigestor:

$$M_1 \cdot C_1 = M_2 \cdot C_2$$

Siendo:

M_1 = masa (kg) de sustrato

C_1 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato puro, sin agregado de agua

M_2 = masa total de la mezcla sustrato + agua (kg)

C_2 = contenido de sólidos (%ST) del sustrato con agregado de agua (que se propone que sea igual a 6%)

De lo cual resulta, despejando:

$$M_2 = M_1 \cdot C_1 / C_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

(para FORSU) = 8 kg. 20%/6% = 27 kg de mezcla total.

A su vez, la mezcla total está compuesta por el sustrato más el agua agregada, es decir, $M_2 = M_1 + M$ agua agregada, por lo que la cantidad de agua a agregar, surge de:

$$M \text{ agua agregada} = M_2 - M_1 \quad (\text{Ec. 2})$$

(para FORSU) = 27 kg - 8 kg = 19 kg (redondeando: 2 baldes de 10 litros)²².

NL: nivel de líquido.

²² La densidad del agua es 1 kg/lt, por lo tanto, 1kg equivale a un litro (sólo para este material).



Autoridades y Equipo de Trabajo

Gobernador de la Provincia de Santa Fe

Ing. Miguel Lifschitz

Vicegobernador

CPN Carlos A. Fascendini

Ministra de Educación:

Dra. Claudia E. Balagué

Secretario de Educación:

Dr. Oscar Alberto Di Paolo

Director Provincial de Gestión

y Coordinación de Proyectos

de la Secretaría de Educación:

Prof. Germán Falo

Asistente Técnico:

Prof. César Oitana

Secretaria de Estado de la Energía:

Sra. Verónica Geese

Subsecretario de Energías Renovables:

Sr. Roberto Bisso

Director Provincial de Coordinación

y Planificación de Bioenergías:

Lic. Esp. Sebastián Lagorio

CONTENIDOS

Contenidos, redacción,

edición y coordinación:

Ing. Virginia Marchisio

Colaboración:

Sr. Gilberto Izaguirre

Diseño Editorial e ilustraciones interior:

Mariano Donal, Martín Pedretti

y Aitor Aramberry

Ilustración para portada:

Sebastián Mercou



Programa
Educación Energética



BioEnergías
Santa Fe