

B I O G A S

ENERGIA Y FERTILIZANTES A PARTIR DE DESECHOS ORGANICOS

MANUAL PARA EL PROMOTOR DE LA TECNOLOGIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS
DIVISION FUENTES DE ENERGIA
FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGIA



ORGANIZACION
LATINOAMERICANA DE ENERGIA

B I O G A S

ENERGIA Y FERTILIZANTES A PARTIR DE DESECHOS ORGANICOS

MANUAL PARA EL PROMOTOR DE LA TECNOLOGIA

**Ma. ISABEL MANDUJANO A.
ALFONSO FELIX A.
ANA MARIA MARTINEZ**

**Cuernavaca, Morelos
MEXICO, 1981**

ES PROPIEDAD : OLADE

Dirección de Desarrollo de Proyectos y
Transferencia de Tecnología, Programa
Regional de Biogas, y

I. I. E.

División Fuentes de Energía, Departa-
mento Fuentes No-Convencionales de
Energía.

2121

Mandujano, María Isabel / et. al. /

Biogas : energía y fertilizantes a partir de desechos
orgánicos, manual para el promotor de tecnología / María
Isabel Mandujano ; Alfonso Félix A. ; Ana María Martí-
nez. — Cuernavaca, México : OLADE, IIE, 1981. —
44 p. : il. ; 30 cm. — (OLADE : Serie Publicaciones
Especiales No. 6). — imp. ; esp.

ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA (OLADE)
10 de Agosto 5133 y Naciones Unidas
Casilla 6413 Telex 2728 OLADE - ED
Quito — ECUADOR

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS (I. I. E.)
Casilla A - 475 Telex 17351 INEL - ME
Cuernavaca - Morelos, MEXICO

C O N T E N I D O

	Página
I. Introducción.....	7
II. Qué es el Biogas.....	8
III. Cómo se produce el Biogas.....	9
IV. Cómo es una Planta de Biogas.....	13
Características.....	13
Tipos de Digestores.....	13
V. Diseño de una Planta de Biogas.....	17
VI. Operación.....	20
VII. Mantenimiento.....	22
VIII. Utilización del Biogas y del Bioabono.....	23
IX. Seguridad.....	25
X. Investigación sobre Digestores en el I.I.E.	26
XI. Glosario.....	28
XII. Bibliografía.....	29
XIII. Apéndice.....	31

Edición Técnica
ALFREDO PANIAGUA URDIALES (OLADE)

Edición General
MARUJA BAÑADOS C. (OLADE)

OLADE
Organización Latinoamericana de Energía
CENTRO DE INFORMACION

I. INTRODUCCION

El abastecimiento de energéticos comerciales como la electricidad, kerosene, gas natural o licuado, y otros, al medio rural, tiene grandes restricciones debido fundamentalmente al aislamiento, dispersión, falta de vías de comunicación, etc., de muchas de las comunidades rurales.

Datos oficiales recientes* revelan que tan sólo en América Latina, 90 millones de habitantes de las áreas rurales presentan carencias importantes en cuanto a la disponibilidad de energía útil para fines domésticos y agroindustriales. Por su parte en Africa (para el 85o/o de la población) y en la región sur de Asia (para el 70o/o de sus habitantes) se presenta el mismo tipo de problemas.

Una de las soluciones capaces de ayudar a resolver en parte esta situación está en las plantas de biogás, las que pueden operar a partir de casi toda la materia orgánica, especialmente de residuos agrícolas y basuras, así como de desechos de animales y humanos. Por medio de este proceso se obtienen gas combustible y fertilizantes, resolviendo al mismo tiempo serios problemas ambientales al convertir desechos que hacen proliferar larvas y moscas, en recursos útiles.

Por otra parte, estas instalaciones tienen la ventaja de adaptarse a las condiciones del medio rural, pudiendo ser sumamente sencillos en su construcción, operación y mantenimiento.

El objeto fundamental de elaborar este folleto es difundir los aspectos básicos de la tecnología del biogás, y su enfoque se orienta principalmente a los promotores de la misma en el medio rural. Se explica que es el biogás, como se produce, en que consiste una planta de biogás, su diseño y operación, y cuales son los beneficios derivados de su utilización. Asimismo se incluye una descripción de los trabajos de investigación y desarrollo llevados a cabo durante los últimos cinco años por el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, como parte de un proyecto bajo contrato con la Gerencia de Electrificación Rural de la Comisión Federal de Electricidad.

* Requerimientos Futuros de Fuentes No Convencionales de Energía en América Latina PNUD
OLADE, Quito - Ecuador, Junio, 1979.

II. QUE ES EL BIOGAS

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos(1), (2).

Cuando esta mezcla de gases se produce en forma natural, se le llama "gas de los pantanos"; fue descubierto y reportado por Shirley en 1667 y es el responsable de los llamados "fuegos fatuos". Volta fue el primero en reconocer una relación entre el gas de los pantanos y la vegetación en descomposición en el fondo de los lagos.

En 1808 Sir Humphrey Davy colectó el metano e inició la experimentación que puede considerarse como el principio de la investigación en este campo, sin embargo su interés no estaba enfocado a resolver problemas de energía sino hacia la producción agrícola.

En 1883-1884 Pasteur y Gayón, su colaborador, concluyeron que la fermentación de estiércol en ausencia de aire producía un gas que podía ser usado para calefacción e iluminación.

En 1896 el biogás fue utilizado en el alumbrado de una calle en Exeter, Inglaterra, siendo esta su primera aplicación importante.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, excretas humanas, residuos vegetales como pajas, pastos y hojas secas, y basuras domésticas. En la Tabla I* se dan algunos ejemplos de desechos que pueden ser utilizados para producir biogás.

La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. En promedio su composición es la siguiente:

— Metano	(CH ₄)	54-70 o/o
— Bióxido de carbono	(CO ₂)	27-45 o/o
— Hidrógeno	(H ₂)	1-10 o/o
— Nitrógeno	(N ₂)	0.5-3 o/o
— Acido sulfhídrico	(H ₂ S)	0.1 o/o

El metano es un gas combustible, incoloro, inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. Es el principal constituyente del gas natural, ya que más del 90 o/o de este combustible es metano.

El biogás, con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede usarse para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria agrícola, bombear agua o generar energía eléctrica. En la Tabla II* se ilustra el valor combustible del biogás en comparación con otros combustibles(3).

* Tablas en Apéndice, pág. 31

III. COMO SE PRODUCE EL BIOGAS

Como se señaló anteriormente, el biogas se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, o sea en condiciones anaeróbicas, quedando como residuo del proceso un lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos con un alto valor fertilizante. Debido a esto último, es factible procesar los desechos animales y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural para producir gas combustible, sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales, los que generalmente se reincorporan a los terrenos de cultivo.

En la práctica, los desechos mezclados con agua se introducen a un recipiente cerrado, llamado digestor, que es donde se realiza el proceso de generación de biogas. Cuando el digestor es de carga diaria, como se verá más adelante, todos los días se carga con una cantidad dada de desechos mezclados con agua, y del digestor sale un volumen de lodos fertilizantes igual al de la mezcla alimentada; el biogas se genera en forma continua durante todo el día. Cuando se trata de un digestor que trabaja a régimen de "lote", se carga todo de una sola vez, no descargándose hasta después de dos o tres meses, cuando se vacía el residuo se aplica al campo; en este caso la cantidad de biogas producida es mayor en las primeras semanas y va bajando a medida que transcurre el tiempo, por lo que casi siempre se instalan varios digestores en "batería", los que se cargan en forma alternada, con objeto de disponer siempre de la cantidad requerida de biogas.

A continuación se da una breve explicación de los parámetros que controlan el proceso. Es conveniente aclarar que a pesar de que es recomendable operar los sistemas lo más cerca posible de las condiciones óptimas para lograr una buena eficiencia de generación de biogas, esto no siempre es factible en el medio rural. Por lo tanto se deberán buscar las mejores condiciones dentro de las posibilidades existentes en el sitio, manteniendo la operación sencilla y sin complicaciones para el usuario.

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica se lleva a cabo por la acción de diversas familias de bacterias. Usualmente se consideran dos etapas de dicho proceso:

- 1a. Etapa: formación de ácidos
- 2a. Etapa: formación de gases

En la primera etapa la materia prima es atacada por las bacterias formadoras de ácidos, mismas que convierten los desechos en compuestos más simples como los ácidos acético, butírico y propiónico. En la segunda etapa los ácidos formados en la primera son convertidos a metano y bióxido de carbono por acción de otro grupo de bacterias.

Todos estos procesos se llevan a cabo simultáneamente dentro del digestor, al cual sólo se alimenta la materia prima en las condiciones adecuadas.

Tomando en cuenta que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico. A continuación analizaremos detalladamente los parámetros que influyen directamente en la formación del metano.

TEMPERATURA. El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60°C. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60°C dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y desarrollen.

En la práctica, sobre todo en pequeños sistemas instalados en el medio rural, no se controla la temperatura del proceso, y se trabaja a temperatura ambiente sin proporcionar calor al digestor. Una forma simple de aumentar la temperatura de operación y con ello la cantidad de biogas producido, es calentar el agua con la que se va a efectuar la mezcla, por ejemplo en calentadores solares. En la gran mayoría de los casos los digestores se construyen enterrados para evitar que se pierda mucho calor.

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura, el mesofílico de 30 a 40°C y el termofílico de 55 a 60°C.

RANGO MESOFILICO (30-40°C). Las bacterias que se desarrollan en este rango de temperatura se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura. La temperatura óptima es de 35°C y la mayoría de los desechos orgánicos se pueden digerir a esta temperatura produciendo biogas.

La Figura 1* muestra que la producción de biogas aumenta al acercarse a la temperatura óptima.

RANGO TERMOFILICO (55-60°C). Este rango de temperatura, en el que se produce mayor cantidad de biogas que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios de temperatura y en pequeños sistemas resulta antieconómico mantener esta temperatura controlada, especialmente en climas fríos.

TIEMPO DE RETENCION. Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura, ya que a mayores temperaturas el tiempo de retención requerido para obtener una buena producción de gas es menor⁽⁴⁾, según se observa en la Figura 1.

En un digestor que trabaja a régimen estacionario o sea de "lote", el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga.

En un sistema de carga diaria, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digestor, ya que se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempo de retención (días)}} = \frac{\text{volumen de carga diaria}}{\text{(m}^3\text{/día)}}$$

Es decir que para un tiempo de retención de 30 días, cada día se carga $\frac{1}{30}$ del volumen total del digestor, y en promedio la materia orgánica y la masa microbiana permanecen 30 días dentro del sistema. La cantidad de biogas producido por una planta dependerá, entre otras cosas, de la cantidad de desecho alimentado diariamente. Usualmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y la alimentación diaria varía entre 1 y 5 kg. de sólidos totales por metro cúbico de digestor.

RELACION CARBONO/NITROGENO. Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogas al ser sometida a fermentación anaeróbica, y la cantidad y calidad del biogas producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la

formación de nuevas células⁽¹⁾. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima es de 30.

Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada; al estar presente nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Entre las materias primas más utilizadas en la generación de biogas, están los desechos animales, cuya relación C:N es siempre menor que la óptima, debido a que tienen un contenido importante de nitrógeno. Otro material muy usado son los residuos agrícolas, los que generalmente tienen relaciones C:N muy altas, ya que contienen muy poco nitrógeno, por lo que casi siempre se mezclan con desechos animales o se les agrega un compuesto nitrogenado, como puede ser urea, para acercarse a un balance adecuado de carbono y nitrógeno.

Es práctica común que un digestor se alimente con mezclas de varios residuos disponibles en la localidad, por lo que se incluye en la Tabla III una lista de las relaciones C:N de las materias comúnmente utilizadas, que permitirá tener una idea de las posibilidades de combinarlas para obtener proporciones aceptables de carbono y nitrógeno.

PORCENTAJE DE SÓLIDOS. Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida; esta última es llamada "sólidos totales".

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga al digestor, es también un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo en forma satisfactoria.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9 o/o de sólidos totales es óptima para la digestión⁽⁵⁾.

Para calcular el volumen de agua que debe ser mezclada con la materia prima para dar la proporción deseada, es indispensable conocer el porcentaje de sólidos de ésta. En el caso del estiércol de bovino fresco, que tiene de 17 a 20 o/o de sólidos totales, se deberán agregar de 1 a 1.5 litros de agua por cada kilogramo de estiércol para así obtener una mezcla de alrededor de 8 o/o de sólidos totales.

En la Tabla IV se presentan datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos desechos, y la cantidad de agua que hay que agregar por cada kilogramo fresco para obtener el 8 o/o de sólidos totales deseado. Como es obvio, estos datos sólo se dan como una guía, ya que la humedad contenida en un material depende de muchos factores externos, entre ellos la temperatura ambiente, las lluvias, el tiempo que lleva expuesto al aire, etc.

pH. En plantas de biogas alimentadas con estiércol de bovino, se han obtenido niveles de pH en el intervalo de 6.7 a 7.5 o sea un medio prácticamente neutro. El pH se mantiene en ese rango sólo, si el digestor está operando correctamente. Si se pierde el equilibrio tornándose demasiado ácido, las bacterias formadoras de metano se inhiben aumentando la proporción de bióxido de carbono en el biogas⁽⁶⁾.

Las causas por las cuales puede descender el pH son, entre otras:

- Aumento repentino de la carga
- Presencia de elementos tóxicos en la materia prima
- Cambio súbito de la temperatura

En algunos casos el pH bajo puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como agua con cal.

AGITACION. La generación de biogas depende totalmente de que las bacterias cumplan en forma óptima su ciclo biológico y de ahí la importancia de darles las mejores condiciones para que esto ocurra. Los microorganismos y la materia prima o sustrato deben estar en íntimo contacto, por lo que es necesario agitar la masa interna del digestor.

Con plantas de gas operando a nivel mesofílico, la agitación requerida es muy leve siendo suficiente la que provoca la carga diaria al entrar al digestor. En el caso de digestores que trabajan a nivel termofílico, la agitación requerida es continua para establecer un mejor contacto entre bacterias y sustrato, proporcionando además una temperatura interna más uniforme.

En la superficie de la mezcla se tiende a formar una "nata" debido al material fibroso no digerible, la cual se debe romper por medios mecánicos para que el biogas salga libremente del seno de la mezcla⁽⁷⁾.

IV. COMO ES UNA PLANTA DE BIOGAS

Una planta de biogas consiste básicamente de un tanque o pozo llamado digestor donde ocurre la fermentación y un contenedor hermético que tiene como función almacenar el biogas producido; las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de almacenamiento puede ser rígido o flotante. La carga y descarga del sistema puede ser por gravedad o por bombeo.

En la Figura 2*, se muestra un esquema de una instalación de biogas cargada por gravedad, con un tanque de almacenamiento flotante separado del digestor.

El procesamiento de desechos en el digestor permite generar biogas y como residuo del proceso se tiene un excelente abono orgánico que lleva el nombre de bioabono. En China se encuentran operando actualmente más de 8 millones de digestores y cerca de 80.000 en la India, mismos que suplen de biogas y bioabono al mismo número de familias.

Una planta de biogas de carga diaria tipo hindú, de 4m^3 de volumen, puede producir 3m^3 de biogas por día, a partir de todo el desecho producido diariamente por unas 3 vacas y 75 litros de agua caliente. Esta cantidad de biogas normalmente es suficiente para cocinar los alimentos de una familia de 5 a 6 miembros.

1. CARACTERISTICAS DEL DIGESTOR

Para que un digestor de desechos orgánicos opere en forma correcta, deberá reunir las siguientes características:

- a). Deberá ser hermético con el fin de evitar la entrada de aire, el que interfiere con el proceso, y fugas del biogas producido.
- b). Deberá estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, lo que usualmente se consigue construyéndolos enterrados.
- c). Aun no siendo un recipiente de alta presión, el contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad.
- d). Deberá contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema.
- e). Los digestores deberán tener acceso para mantenimiento.
- f). Se deberá contar con un medio para romper las natas que se forman.

2. TIPOS DE DIGESTORES

Resulta conveniente clasificar a los digestores, según su modo de operación, en los siguientes tipos:

- De lote (régimen estacionario o "batch")
- De régimen semi-continuo
- Horizontales de desplazamiento
- De régimen continuo
- Otros

* Ver Apéndice.

a). Digestores de Lote (régimen estacionario o batch).

sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que han dejado de producir gas combustible. Normalmente consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogas.

Este sistema es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materia orgánica que presentara problemas de manejo en un sistema continuo o cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En esos casos generalmente se usan varios digestores cargados a diferentes tiempos para tener siempre biogas disponible. Otro ejemplo sería cuando el interés primordial es la obtención del fertilizante orgánico, el cual se requiere en épocas específicas del año; en este caso, la carga se hace al tener disponibles los desechos y la descarga una o dos veces por año, en la época de la siembra. Así también el digestor a régimen estacionario o de lote, es ideal cuando a nivel laboratorio se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un desecho o mezcla de desechos.

Un digestor de este tipo es el diseño OLADE-Guatemala⁽⁹⁾, del que se presenta un esquema en la Figura 3*.

b). Digestores de Régimen Semi-Continuo. Este es el tipo de digestores más usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino.

Digestores Tipo Hindú⁽¹⁰⁾. Existen varios diseños de estos digestores, pero en general son verticales y enterrados, semejando un pozo, como se ve en el esquema de la Figura 4*. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogas si se mantienen las condiciones de operación.

El gasómetro está integrado al sistema, o sea que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso; en esta forma la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de menos de 20 cms., de columna de agua, lo que facilita su salida desde el seno de la misma. Además, la presión de utilización del biogas es constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que se alimenta. En caso de requerirse una presión mayor, simplemente se quitan los contrapesos o se colocan sobre la campana. Por lo general el volumen del gasómetro es del orden del 1/3 del biogas generado al día.

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos.

El digestor normalmente se construye de ladrillos, con un aplanado interior de cemento pulido para evitar filtraciones, pero también pueden utilizarse otros materiales de construcción comunes en la región. La campana puede construirse de lámina de fierro, de fibra de vidrio o de otro material, con la condición de que no permita la fuga del gas. El material de construcción de la campana se deberá seleccionar con cuidado, ya que esta parte del sistema puede resultar costosa.

Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogas, generándose entre 0.5 y 1 volumen de gas por volumen de digestor, y aún más. Como la campana está al nivel del suelo, es fácil sacarla una vez al año para pintarla y al mismo tiem-

* Ver Apéndice.

po extraer las natas que se han formado en la superficie de la mezcla. Se tiene control sobre el material que se alimenta, lo que permite una operación uniforme.

Para la correcta operación de un digestor que genere suficiente biogas para una familia, se requiere contar con los desechos de unas tres vacas o su equivalente en otros residuos, lo que en algunos casos podría ser un problema si no se cuenta con ganado estabulado.

Su costo en general es mayor que el de los digestores tipo chino que se describirán a continuación; sin embargo, al calcular el costo, deberá tenerse en cuenta que para producir la misma cantidad de biogas, el volumen de digestor tipo hindú requerido es aproximadamente un tercio del volumen requerido si se emplea un digestor chino.

Digestores Tipo Chino(11). Los digestores de este tipo, como el que aparece en la Figura 5*, son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados.

Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas composteados mezclados con lodos activos de otro digestor, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, se va alimentando diariamente con los desechos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogas dentro del mismo sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, aumenta su presión, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, y llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 cms., de columna de agua. Como consecuencia de la variación de presión, la que sube al generarse el gas y baja al empezar a utilizarlo, se reduce la eficiencia de los equipos en que se usa. Si la presión sube a valores muy altos, aumenta el riesgo de fugas de gas a través de microporos en el domo y también la probabilidad de que se formen fisuras por movimientos ligeros de las paredes. La fluctuación del nivel de la mezcla en fermentación aumenta el contacto de la fase líquida con el oxígeno del aire, reduciéndose la actividad de las bacterias generadoras de metano, y la alta presión impide que el gas salga libremente del seno de la mezcla, todo lo cual conduce a una menor eficiencia de generación de biogas en los digestores tipo chino, en comparación con los de tipo hindú, generándose en el primero entre 0.15 y 0.2 volúmenes de gas por volumen de digestor.

Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta, y una o dos veces al año el digestor se vacía completamente, aplicando el residuo a los campos de cultivo.

Los digestores se construyen casi siempre por los mismos usuarios, con asesoramiento de un técnico especializado, a partir de ladrillos, bloques pre-fabricados o por vaciado integral de concreto ligero sobre la propia tierra.

A pesar de que el digestor tipo chino es poco eficiente para generar biogas, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general largos, y además se tiene disponible una gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con la tierra antes de la siembra.

* Ver Apéndice.

Dado que se emplea la técnica de autoconstrucción y que se hace uso de materiales comunes, el costo de este tipo de digestor suele ser menor que el del tipo hindú.

c). **Digestores Horizontales de Desplazamiento(13),(14).** Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados; semejando un canal, con relaciones de largo a ancho de 5 a 1 hasta 8 a 1 y sección transversal circular, cuadrada o en "V". En la Figura 6* se presenta un diagrama de este tipo de planta. Se operan a régimen semi-contínuo, entrando la carga por un extremo del digestor, y saliendo los lodos por el extremo opuesto. La cúpula puede ser rígida o de algún material flexible que no presente fugas de gas y que resista las condiciones de intemperie. El gas generado se colecta en esta cúpula, de la que puede pasar a un gasómetro flotante.

Este tipo de digestores se recomiendan cuando se requiera trabajar con volúmenes mayores de los 15m^3 , para los cuales la excavación de un pozo vertical comienza a resultar muy problemática; o sea que están más bien enfocados a la generación de biogas para aplicaciones comunales, como puede ser el accionar pequeños motores para bombeo, molienda, o generación de electricidad.

d). **Digestores de Régimen Continuo(16).** Este tipo de digestores se desarrollaron principalmente para tratamiento de aguas negras, y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros sustratos. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto, este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo industrial, donde se genera una gran cantidad de biogas el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales.

e). **Otros Tipos de Digestores.** La investigación en el tema de fermentación anaeróbica, buscando aumentar la eficiencia de generación de biogas y de degradación de la materia orgánica reduciendo el tiempo de retención, ha llevado al desarrollo de diversos tipos de digestores, como son los llamados filtros anaeróbicos. En estos sistemas de alimentación continua y alta dilución (1 a 1.5 o/o de sólidos totales), por métodos físicos se logra retener los microorganismos dentro del digestor durante 20 a 30 días, mientras que el líquido activo pasa a través del sistema en tiempos de 1 a 5 días. Con esto se logra reducir en forma significativa el tamaño de la planta, con la consecuente disminución de los costos de instalación y operación, mejorando la eficiencia de generación de biogas.

Otro sistema que se encuentra en desarrollo son los digestores de etapas múltiples, diseñados para aislar grupos de bacterias en cámaras separadas, cada una de las cuales trabaja en las condiciones óptimas para el desarrollo del tipo de microorganismos que contienen.

Con este sistema se logra una mayor degradación de la materia orgánica alimentada, con el consecuente aumento de la cantidad de biogas generado.

V DISEÑO DE UNA PLANTA DE BIOGAS

El diseño de una planta de biogas dependerá del tipo y cantidad de desechos disponibles, de las condiciones climáticas, así como de los materiales de construcción de que se disponga en cada sitio. Con objeto de minimizar los costos de la planta, ésta deberá ser de un tamaño adecuado a cada necesidad, construida hasta donde sea posible con materiales y mano de obra locales.

DIMENSIONAMIENTO. Antes de proceder al diseño de una planta para el medio rural, es preciso determinar el potencial de generación de biogas presente, con el objeto de definir su factibilidad, tomando en cuenta que la forma de manejo del ganado en esas comunidades impide recolectar todo el estiércol producido por sus animales. Por lo tanto la condición a satisfacer es que se pueda disponer de una cantidad mínima de desechos, que permita producir el biogas requerido para satisfacer las necesidades que se pretenden cubrir.

Los datos experimentales que a continuación se presentan permiten hacer este tipo de cálculos^{(17), (18)}.

Tipo de animal	Estiércol Fresco producido al día	Litros de biogas ^{b)} producido por cada kg. fresco.
Vaca	10.00 ^{a)}	60
Cerdo (50 kg)	2.25	78
Gallina (2 kg)	0.18	62
Heces humanas	0.40	70

Equipo	Consumo de biogas (m ³ /hr)
Estufa (2 quemadores)	0.40 - 0.55
Lámpara	0.15 - 0.21
Refrigerador (1.8 ft ³)	0.05 - 0.063
Motor C.I.	0.45 - 0.55 por cada H.P.

- a). El dato se refiere a una estimación de la cantidad de estiércol que es posible recolectar, de todo el producido, cuando el ganado no está estabulado.
- b). Este valor varía según el diseño de digestor utilizado. Los datos presentados son para un digestor tipo hindú.

A manera de ejemplo, consideremos los siguientes casos:

1. Se requiere suficiente biogas para cocinar durante cinco horas en una estufa de dos quemadores.

Según las tablas anteriores, y tomando un promedio de consumo de 0.5 m³/hora, se necesitarán 2.5m³ de biogás, para lo que se requieren 42 kg de estiércol de vaca fresco al día. Se estima que esta cantidad de residuo se puede recolectar de 4 ó 5 vacas no estabuladas (o de 2 que sí lo están).

2. Las necesidades que se quieren cubrir son las siguientes:

	Volumen de biogas
Estufa de dos quemadores (5 horas)	2.5m ³
Lámpara (3 horas)	0.6m ³
Motor de 2 HP (4 horas)	4.4m ³
	7.5m ³

Para poder suministrar esta cantidad de biogas, se requiere de 125 kg de estiércol de vaca (12 vacas no estabuladas ó 6 estabuladas) ó 100 kg de estiércol de cerdo (43 animales) o bien de 125 kg de desechos de gallina (694 gallinas), o cualquier combinación entre ellos.

Si resulta favorable la comparación entre las necesidades y el potencial de generación de biogas, se puede entonces proceder al cálculo de la planta. (Apéndice).

Partiendo de la capacidad que tendrá la planta se definirá: diseño, ubicación, materiales, técnicas de construcción, forma de operación y mantenimiento.

DISEÑO. Como ya se mencionó anteriormente, existen varios diseños de plantas de biogas. En la publicación de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) "Strategies and Technologies for Implementing Rural Biogas Programs in Latin America"(19), se hace una descripción detallada de los siguientes cuatro tipos de plantas: OLA-DE-Guatemala, Chino, Xochicalli-México e Instituto de Investigaciones Eléctricas-México. En las Figuras 7 y 8* del presente trabajo, se presenta el diseño de una planta tipo hindú de 4m³ de volumen, como la que se dimensionó en el Apéndice.

LOCALIZACION. Una decisión importante es la relativa al lugar donde se construya una planta de biogas.

Deberá ser un sitio donde la materia prima esté accesible y el agua requerida esté disponible, para efectuar la carga diaria. Se debe procurar estar lo más cerca posible del punto de uso del biogas y al mismo tiempo facilitar el empleo del bioabono o su almacenamiento en caso de ser necesario.

La topografía del lugar así como las características del suelo, tendrán influencia en el tipo de digestor, técnica constructiva y costos.

Los niveles de las aguas subterráneas pueden también obligar a utilizar cierto tipo de planta o a cambiar la ubicación.

Desde el punto de vista meteorológico, deberá buscarse un sitio al abrigo del viento, de preferencia un lugar soleado, cuidando que la insolación no provoque fallas por esfuerzos térmicos en las cúpulas expuestas al sol.

Si se trata de plantas a nivel comunal, la ubicación será distinta a la de un digestor familiar, y deberá procurarse un sitio que permita futuras ampliaciones de la planta, sin descuidar los aspectos de acceso de la materia prima y utilización de los productos.

MATERIALES Y TECNICAS DE CONSTRUCCION. Las plantas de biogas han sido concebidas en geometría cilíndrica, rectangular, oval y esférica; horizontales y verticales; bajo tierra o a nivel del suelo, y construidas de ladrillo, mampostería, cemento, metal, hule

* Ver Apéndice.

sintético, plástico, etc. En términos generales las distintas opciones de formas y materiales han sido probadas y trabajan satisfactoriamente cuando se emplea un diseño adecuado.

Sin embargo, el escaso poder adquisitivo de los pobladores de las comunidades rurales obliga a explotar otras opciones que resulten más baratas y que aseguren una vida larga de las instalaciones, entre las que se encuentran las técnicas de autoconstrucción como son las de suelo-cemento y ferrocemento, así como la utilización de fibra de vidrio; los resultados que hay hasta ahora con estas técnicas son satisfactorios, siempre y cuando un técnico experimentado en las mismas entrene previamente al personal que tendrá a su cargo la construcción, y vigile ésta durante su desarrollo.

OLADE

**Organización Latinoamericana de Energía
CENTRO DE INFORMACION**

VI. OPERACION. Como ya se señaló en capítulos anteriores, la producción de biogas depende en gran parte del tiempo de retención, el porcentaje de sólidos totales y la temperatura, a los cuales se lleva a cabo el proceso.

En el caso específico del medio rural, donde hay cierta limitación en la disponibilidad de desechos, no siempre sería factible manejar tiempos de retención muy cortos, por lo que normalmente se opta por tiempos de retención o fermentación de 20 a 45 días. Como ya se señaló, el volumen de carga diaria será igual al volumen del digestor dividido entre el tiempo de retención.

Tampoco es posible controlar el porcentaje de sólidos en forma precisa, siendo suficiente el dar indicaciones de agregar de 1 a 1.5 volúmenes de agua por cada volumen de estiércol fresco que se va a alimentar al sistema, y en esta forma completar la carga diaria. Por ejemplo, para cargar el digestor de 4m³ calculado en el Apéndice, se indicaría al usuario que diariamente agregue 4 cubetas llenas de estiércol fresco y entre 4 y 6 cubetas de agua, según lo seco que esté el estiércol en esa época del año. Este régimen de carga llevaría a trabajar en condiciones de operación de aproximadamente 30 días de tiempo de retención y 8 o/o de sólidos totales. También es conveniente señalar que el estiércol y el agua se deberán homogenizar lo mejor posible, mezclándolos muy bien en la pileta de carga antes de que entren al digestor.

La temperatura es otro parámetro muy difícil de controlar en el medio rural. Como ya se señaló, el construir el digestor enterrado ayuda a aislarlo térmicamente. Cuando es posible, se recomienda acoplar al digestor un calentador solar de agua, ya que al usar agua caliente para realizar la carga diaria se obtiene un incremento importante en la cantidad de biogas producido.

A continuación se presentan datos experimentales⁽²¹⁾ sobre la operación de un digestor de 10m³ tipo hindú, trabajando con estiércol de vaca a 8 o/o de sólidos totales y a temperaturas de 28 a 30°C, las que se lograron al efectuar las cargas diarias con agua caliente proveniente de calentadores solares.

**PRODUCCION DE BIOGAS DE UN DIGESTOR DE 10m³ TIPO HINDU⁽²¹⁾,
(ESTIERCOL DE VACA, 8 o/o SOLIDOS TOTALES, 28 A 30°C)**

Tiempo de retención (Días)	CARGA DIARIA			Producción de biogas (lts./día)
	(kg. est./día)	(lts. agua/día)	(lts. tot./día)	
10	444	556	1000	14069
15	297	370	667	9450
30	148	185	333	7256
42	106	132	238	6886
45	99	123	222	4295

Como se ve de la tabla anterior, la producción diaria de biogas aumenta al disminuir el tiempo de retención, lo cual es lógico, ya que la cantidad de estiércol alimentada al día aumenta considerablemente al bajar este tiempo. Sin embargo, también de estos datos se puede ver que la cantidad de biogas producido por cada kilogramo alimentado es menor

entre menor sea el tiempo de retención; esto también es lógico, ya que al estar menos tiempo sometida a fermentación, la materia orgánica se degrada menos, y sale del sistema sin haber producido todo el biogas que es capaz de producir.

Estos datos nos indican que si se quiere favorecer la producción de biogas, se debe tratar de trabajar a tiempos de retención cortos, mientras que si se quiere producir un bioabono de mejor calidad, (o sea degradar lo más posible la materia orgánica), es mejor trabajar a tiempos de retención largos.

VII. MANTENIMIENTO. Es esencial que todos los componentes del sistema estén libres de fugas de gas para eliminar pérdidas del mismo, y acumulación de gas combustible en áreas confinadas, por motivos de seguridad, así como la entrada de aire al sistema lo que inhibe el proceso. Por lo tanto, se deberán efectuar inspecciones rutinarias por lo menos una vez por semana, para asegurar que no se presente este tipo de fallas, y permitir su corrección en el momento de ser detectadas.

En las ocasiones en que se vacía el digestor, se deberá efectuar una inspección cuidadosa del interior del mismo para detectar y corregir problemas de construcción que pudieran haberse presentado. Se deberá también aplicar un recubrimiento a base de pintura anticorrosiva a todas las partes metálicas internas del sistema, así como a las tuberías y conexiones en constante contacto con el biogas.

En digestores tipo hindú con campana metálica, es recomendable quitar esta por lo menos una vez al año, para pintarla como se ha mencionado, y al mismo tiempo extraer las "natas" que se han formado en la superficie de la fase líquida.

VIII. UTILIZACION DEL BIOGAS Y DEL BIOABONO

USOS DEL BIOGAS⁽¹⁸⁾

El biogas puede usarse directamente en quemadores, como por ejemplo en estufas, lámparas, refrigeradores, etc., o bien puede ser utilizado como combustible en máquinas de combustión interna.

Si el biogas se va a quemar directamente, sólo es necesario eliminar las gotas de agua en suspensión que son arrastradas por el gas al salir del digestor, evitando así la obstrucción de las tuberías en las que se maneja el biogas. Una forma de eliminar esta agua es haciendo pasar el gas a través de un separador de líquidos, que consiste básicamente en un recipiente que guarda una temperatura más baja que el biogas, para condensar el vapor de agua y atraparlo.

Si el gas va a ser usado como combustible en un motor de combustión interna, es necesario eliminar las trazas de ácido sulfhídrico (H_2S). Para quitar esta impureza se hace pasar el biogas a través de una trampa de limadura de hierro, mediante la cual quedan eliminadas las trazas de H_2S . La limadura de hierro se regenera periódicamente por una simple exposición de aire durante 3 ó 4 días.

La utilización del biogas en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente. En general los quemadores diseñados para gas LP se adaptan utilizando mayores espreas y distintos ajustes de aire primario. Para la adaptación de motores de combustión interna, se puede optar por la modificación del carburador de gasolina o bien usar un carburador especial para gas.

En el caso de los motores diesel, lo que se hace es operarlos en forma dual (85 o/o biogas, 15 o/o diesel), para prevenir daños en los inyectores.

UTILIZACION DEL BIOABONO. Además de generar gas combustible, la fermentación anaeróbica de la materia orgánica produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes, evitando en ésta forma la competencia que se podría presentar con el aprovechamiento tradicional de los residuos animales y agrícolas con fines fertilizantes o como combustibles.

Su composición varía de acuerdo al desecho utilizado, y en promedio un análisis en base seca es el siguiente⁽²²⁾:

pH	7.5
Materia orgánica	85.0 o/o
Nitrógeno	2.6 o/o
Fósforo	1.5 o/o
Potasio	1.0 o/o

No posee mal olor, ni contamina, tampoco atrae moscas, puede ser aplicado directamente al campo en forma líquida o bien ser deshidratado y almacenado para usarse posteriormente.

Puede servir como materia prima para producir compostas mezclado con rastrojos; también puede utilizarse para cultivos por hidroponía, en los que se proporciona a la planta la humedad y los nutrientes que requiere sin utilizar tierra.

Se puede usar para fertilizar estanques de peces ayudando a formar su alimento.

Las principales ventajas del efecto fertilizante de estos lodos radica en lo siguiente⁽²³⁾:

- Posee mayor cantidad de nitrógeno que la materia prima original en base seca, el que mediante el proceso de digestión se torna más asimilable por las plantas.
- Es un buen material para el mejoramiento de suelos.
- A diferencia del estiércol fresco, no posee olores desagradables.
- No contiene bacterias patógenas o semillas de malas hierbas, puesto que el proceso de digestión las elimina.
- Un metro cúbico de bioabono producido diariamente puede fertilizar más de 2 has. de tierra por año a un nivel de 200 kg N/ha.
- El incremento de la producción agrícola por el uso del bioabono puede alcanzar un promedio de 10-20 o/o⁽¹⁷⁾.

IX. SEGURIDAD

El biogas puede causar explosiones al tener como principal componente metano, el cual tiene niveles de explosión que van desde 5 hasta 15 o/o (proporción en volumen con aire).

Tomando en cuenta que la composición típica del biogas incluye entre 60 y 70 o/o de metano, los niveles de explosión son de 7 a 24 o/o de biogas en aire (en volumen).

Al encender fósforos o bien al producir chispas por choques metálicos, el gas puede alcanzar temperaturas de 650 a 750°C a las cuales puede deflagrar o explotar.

La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del aire es de 1.293 gr/lt., y que considerando un contenido de 35 o/o de CO₂, la densidad del biogas llega a 1.09 gr/lt., este es más ligero que el aire y puede diluirse en él fácilmente. Si la proporción de CO₂, rebasa el 46 o/o, el biogas se vuelve más denso que el aire, subiendo su límite de peligrosidad ya que puede ser asfixiante cuando su acumulación causa que el oxígeno del aire baje a 17.3 o/o y si baja hasta 13 o/o es positivamente sofocante.

Por todas estas razones, hay que tomar precauciones en el manejo de biogas, similares a las que se tienen con cualquier gas combustible, es decir:

- Al llenar tanques con biogas, éstos deben de estar libres de oxígeno, al igual que las líneas de transporte de gas.
- Se deben realizar pruebas de fugas con agua jabonosa.
- Cuidar que no hayan flamas, brasas, cigarrillos encendidos o calzado con clavos que produzcan chispas en las áreas de compresión y carga.
- Los locales donde se maneje biogas deben ser de preferencia altos y bien ventilados.
- Los extinguidores deben ser CO₂ y polvo ABC.

X. INVESTIGACION SOBRE DIGESTORES EN EL I.I.E.

Debido a que los trabajos de investigación y desarrollo sobre el proceso de generación de biogas son relativamente nuevos en México, la aplicación de esta tecnología es todavía muy incipiente. Sin embargo, a nivel rural se presentan muchas posibilidades de implantación de digestores en un futuro próximo, sobre todo en poblaciones mal comunicadas donde la leña es casi la única opción energética y donde tampoco se cuenta con fertilizantes, los cuales resultan muy costosos para la raquítica economía de estas comunidades.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas se ha venido trabajando durante cinco años en la investigación del proceso de fermentación de desechos orgánicos y en la implantación de digestores, y a continuación se presenta un resumen de los trabajos desarrollados en esta área:

1). Experimentación a Nivel Laboratorio^{(5), (24) a (27)}

Los estudios se iniciaron con la experimentación a nivel laboratorio (0.2m^3) de los parámetros que gobiernan el proceso de digestión, relacionando la generación y calidad del gas con la composición de los desechos orgánicos alimentados. Se estudiaron estiércoles de ganado bovino y porcino; mezclas de estiércol bovino con rastrojos de maíz, sorgo, arroz y cáscara de cacahuete, mezclas de desechos de ganado bovino, porcino y gallinaza con rastrojo de sorgo, y mezclas de estiércol bovino con lirio acuático. Se estudió además el porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla utilizando estiércol bovino, la temperatura a la que se realiza el proceso, y factores como pH y agitación.

2). Digestor a Escala Familiar^{(20), (21)}

Una vez terminados los estudios a escala laboratorio, se procedió a construir un digestor de 10m^3 tipo hindú, que cubriera las necesidades energéticas para el uso doméstico de alumbrado y cocción de alimentos de una familia de 6 miembros. Este digestor se operó durante 2 años a régimen continuo (carga diaria) y a 5 diferentes tiempos de retención, con y sin agitación, con objeto de evaluar la producción de gas en diferentes condiciones de operación.

3). Digestor a Escala Comunal^{(13), (15)}

El siguiente paso fue el diseño y construcción de un digestor de 40m^3 de volumen, enfocado hacia la instalación de estos sistemas en comunidades rurales aisladas. Este digestor procesa media tonelada de estiércol bovino al día y diariamente genera 30m^3 de biogas. Es una unidad horizontal de desplazamiento operada por gravedad. La unidad se ha estado operando por más de dos años, y actualmente el seguimiento operacional lo está llevando a cabo personal del Instituto Tecnológico Agropecuario (ITA) No. 9 de Xoxocotla, Morelos.

4). Utilización de los Productos de Digestores

En lo referente a usos del gas, se han realizado trabajos relacionados con su análisis, purificación, secado, compresión y almacenamiento. Se llevaron a cabo estudio de utilización del gas en estufas domésticas de 2 quemadores, lámparas, refrigeradores de absorción, motor generador de 700 W y motor generador de 16 KW. Todos estos equipos comerciales fueron adaptados para quemar biogas, y se realizaron pruebas de operación comparando este combustible con los convencionales⁽¹⁸⁾.

Los lodos del digestor se evaluaron para conocer su poder fertilizante comparándolos con fertilizante químico y con estiércol fresco en una plantación de lechugas⁽²²⁾. Se están realizando estudios a mayor escala en plantaciones de maíz. Estos estudios se llevan a cabo en la Universidad Autónoma Metropolitana Ixtapalapa.

5). Difusión de la Tecnología

Buscando difundir la tecnología, se han instalado digestores de 3m³ en tres comunidades rurales, lo cual fue objeto de un contrato con el Instituto de Ingeniería de la UNAM y SAHOP. Por su parte, SAHOP procedió a instalar 10 unidades semejantes. En las instalaciones de la Comisión de Desarrollo Agrícola y Ganadero del Estado de México, se construyó un digestor de 20m³ de capacidad, el cual ya ha empezado a operar, con fines de demostración al personal que labora en el desarrollo rural del Estado de México. Se construyó un digestor de 30 m³ en la comunidad de Jicarero, Mor., con objeto de emplear el gas generado en la operación de refrigeradores. Se han firmado además convenios con la ENEP-Cuautitlán y SAHOP para la instalación de unidades grandes.

6). Otras Actividades

Actualmente se está trabajando en la generación de biogas en el rango termofílico y se investigan nuevas opciones de producción de biogas como es el uso de digestores que operen con desechos de alto contenido de sólidos y el empleo de lirio acuático y bagazo de caña como materias primas del proceso de fermentación.

XI. GLOSARIO

Bacterias Anaeróbicas. Bacterias que proliferan únicamente en ausencia de oxígeno libre.

Bacterias Mesofílicas. Familias de bacterias cuyo ciclo biológico se lleva a cabo en forma óptima entre 30 y 35°C.

Bacterias Metanogénicas. Son las bacterias anaeróbicas que destruyen los ácidos orgánicos, principalmente el ácido acético, para formar metano (CH₄).

Bacterias Termofílicas. Familias de bacterias cuyo ciclo biológico se lleva a cabo en forma óptima entre 55 y 60°C.

Bioabono. Residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes y mejoradoras de suelos, que se obtiene como residuo de la biometanación.

Biogas. Mezcla de gases que se obtiene a partir de la biometanación, cuyos principales componentes son metano (CH₄) y bióxido de carbono (CO₂).

Biometanación. Fermentación anaeróbica de la materia orgánica en la que se produce biogas, quedando un residuo estabilizado (bioabono).

Celulosa. Polímero biológico formado por moléculas de glucosa, material básico de las plantas fibrosas.

Degradación. Proceso mediante el cual las moléculas orgánicas complejas se convierten en moléculas simples.

Digestor. Tanque o pozo donde ocurre la fermentación anaeróbica.

Fermentación Anaeróbica. Proceso microbiológico que llevan a cabo bacterias anaeróbicas en ausencia de aire.

Inóculo. Material que activa el proceso microbiológico.

Metano. Es el hidrocarburo más simple. Está formado por un átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno (CH₄). Es un gas combustible, incoloro, e inodoro; es el principal componente del gas natural.

Nitrógeno total (TKN). Nitrógeno total por Kjeldahl: Cantidad de nitrógeno que se obtiene después de la digestión de materia orgánica con ácido sulfúrico.

Patógenas. Bacterias que causan enfermedades tanto a los animales como al hombre. (Ej. Salmonella).

pH. Medida de la acidez o alcalinidad. Se define como el logaritmo del recíproco de la concentración del ión hidrógeno. Un pH de 7 se considera neutro, menor que 7 ácido y mayor de 7 alcalino.

Relación Carbono: Nitrógeno (C:N). Cociente de los pesos de carbono y nitrógeno total, presentes en la materia prima.

Sólidos totales (ST). Peso de la materia sólida que permanece después de haber secado una muestra de materia orgánica a una temperatura de 103 ± 1°C, hasta peso constante.

Sólidos volátiles (SV). Porción de los sólidos totales que se volatilizan al llevarlos a una temperatura de 550 ± 50°C.

Sustrato. Nutrientes que se proporcionan al proceso biológico para alimentación de los microorganismos que lo llevan a cabo. (En un digestor, sería la carga diaria de materia orgánica).

XII. BIBLIOGRAFIA

- (1). Methane generation from human, animal and agricultural wastes. National Academy of Sciences. Washington, D.C., U.S.A. 1977.
- (2). Energy, agriculture, and waste management. W.J. Jewell, Ed., Proceedings of the 1975 Cornell Agricultural Waste Management Conference. Ann Arbor Science. Ann Arbor, Mich. USA. 1977.
- (3). Methane, planning a digester. P.J. Meynell. Prism Press. Great Britain, 1976.
- (4). Feasibility of dairy manure stabilization by anaerobic digestion. W. Gramms, D.E. Proctor. Water and Sewage Works, pag. 361-364, September, 1967.
- (5). Determinación del porcentaje óptimo de sólidos para digestores de desechos orgánicos. Informe IIE/FE-A2/4. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Diciembre, 1977.
- (6). Anaerobic digestion of hog wastes. E.P. Taiganides, et al. J. Agric. Eng. Res. No. 8, pag. 327-333, 1963.
- (7). Methane power plants. L.J. Fry. Published by D.A. Knox. Andover, Hampshire, Great Britain. 1975.
- (8). Utilización de fuentes no-convencionales de energía en sistemas de bombeo para irrigación; solar térmica, eólica y biogás. Informe IIE/FE-AS/01. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos. México. Agosto, 1980.
- (9). I Seminario Latinoamericano de Biogas. OLADE. República Dominicana. Agosto, 1980.
- (10). Bio-gas plant. Ram Bux Singh. Gobar Gas Research Station, Ajitmal, Etawah. India. 1975.
- (11). Bio-gas Technology and utilization. Sichuan Provincial Office of Bio-gas Development. Sichuan, China, 1979.
- (12). Producción de biogás a partir de desechos orgánicos. ITINTEC. Lima, Perú. Noviembre, 1979.
- (13). Diseño, construcción y operación del digestor comunal de desechos orgánicos. Informe IIE/FE-A2/13. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Agosto, 1979.
- (14). Anaerobic fermentation of agricultural residues-potential for improvement and implementation. Final Report. W.J. Jewell, et al. National Technical Information Service, Springfield, Va., USA (En prensa).
- (15). Obtención de biogás a partir de desechos orgánicos, aplicado dentro del proyecto "Sistemas Energéticos Integrados en Comunidades Rurales". V.F. Santander. Tesis Profesional. ESIQIE. IPN. México, D.F., 1978.

- (16). Operation of a 50,000 gallon anaerobic digester at the Monroe State Dairy Farm, Monroe, Washington. ECOTOPE GROUP. U.S. Department of Energy Contract No. EG-77-C-06-1016. Washington, D.C., U.S.A., 1979.
- (17). Biogas plants, building instructions. BORDA Biogas Team. German Appropriate Technology Exchange. Bremen. Federal Republic of Germany, 1980.
- (18). Estudios, adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización del biogás. Informe IIE/FE-A2/14. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Mayo, 1979.
- (19). Strategies and technologies for implementing rural biogas programs in Latin America. OLADE. Serie Documentos OLADE No. 11 2a. Edición. Quito, Ecuador, 1981.
- (20). Diseño, construcción y costos del digester familiar de desechos orgánicos. Informe IIE/FE-A2/5. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Diciembre, 1977.
- (21). Informe Final sobre operación del digester familiar. Informe IIE/FE-A2/11. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Abril 1979.
- (22). The use of anaerobically digested cattle slurry as a fertilizer for vegetables. G.J. Gómez, G.G. Viniegra. Tropical Animal Production No. 4, pag. 16-30, 1979.
- (23). Obtención de energía mediante la digestión de estiércol de vaca. E.J. Pichardo, et al. Tesis Profesional. ENEP-Cuautitlán. UNAM. México, D.F. 1980.
- (24). Comportamiento del estiércol porcino en la obtención de biogás por fermentación anaeróbica. Informe IIE/FE-A2/8. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Noviembre, 1978.
- (25). Evaluación de mezclas de estiércol de bovino y esquilmos vegetales para obtención de biogás por fermentación anaeróbica. Informe IIE/FE-A2/12. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Junio, 1979.
- (26). Obtención de biogás a partir de mezclas de desechos animales y rastrojo de sorgo. D. Sánchez Escamilla. Tesis Profesional. ITR-Zacatepec. México (En revisión).
- (27). Evaluación de la influencia de la temperatura en la digestión de desechos orgánicos. Informe IIE/FE-A2/10. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Mor., México. Mayo, 1979.

XIII APENDICE

CALCULO DE UN DIGESTOR CILINDRICO VERTICAL CON CAMPANA, DE TIPO HINDU

Para dimensionar un digestor, se requiere de los siguientes datos:

- Requerimientos de biogás por día ————— B (m³ biogás/día)
- Relación del volumen de biogás producido al día por volumen de digestor

$$\text{————— } R \left(\frac{\text{m}^3 \text{ biogás/día}}{\text{m}^3 \text{ digestor}} \right)$$

Se tiene entonces que el volumen del digestor (V) en metros cúbicos, estará dado por la relación:

$$V = \frac{B}{R}$$

Para calcular el digestor requerido en el primero de los ejemplos antes descritos, se procede de la siguiente manera:

- 1). Los requerimientos diarios de biogás para cubrir las necesidades planteadas son B = 2.5 m³/día.
- 2). Un digestor tipo hindú operando con desechos de vaca mezclados con agua caliente, a 25 días de residencia, presenta una relación de volumen de biogas producido al día por volumen de digestor del orden de 0.75, o sea que R = 0.75.
- 3). El volumen del digestor, $V = \frac{B}{R}$, será entonces

$$V = \frac{2.5}{0.75} = 3.33 \text{ m}^3$$

Con objeto de asegurar que se cuenta con suficiente gas, pasamos al orden inmediato superior, lo que no da un volumen de digestor de 4m³, el que producirá del orden de 3m³ de biogás al día.

- 4). Si se trata de un digestor cilíndrico vertical de diámetro (d) igual a la profundidad (h), d=h, el volumen del cilindro será.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \times h = \frac{\pi d^3}{4} = 4 \text{ m}^3$$

y por lo tanto su diámetro

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \times 4}{\pi}} = 1.72 \text{ m}$$

Tenemos entonces que un digestor de 4m³ de volumen será un pozo de 1.72m de diámetro y 1.72m de profundidad.

- 5). La relación de altura a diámetro del pozo no necesariamente es de 1 a 1. Veamos

el cálculo de la profundidad del pozo para este mismo digestor de 4m^3 de volumen si estipulamos un diámetro de 1.60m

$$V = \frac{\pi \times 1.60^2}{4} \times h = 4\text{m}^3$$

$$h = \frac{4 \times 4}{1.60^2} = \frac{4 \times 4}{2.56} = 1.99\text{m}$$

Tenemos ahora un pozo de 1.60m de diámetro y 2m de profundidad.

- 6). Para este pozo, las dimensiones de la campana para almacenar la mitad de biogas producido en un día, o sea $\frac{1}{2} \times 3\text{m}^3 = 1.5\text{m}^3$ de biogás, serán 1.50m de diámetro, para dejar 0.10m de holgura con el pozo, y su altura h'

$$V' = \frac{\pi \times 1.50^2}{4} \times h' = 1.5\text{m}^3$$

$$h' = \frac{1.5 \times 4}{1.50^2 \pi} = \frac{1.5 \times 4}{2.25 \pi} = 0.85$$

por lo tanto las dimensiones de la campana serán:

$$\begin{aligned} d' &= 1.50 \text{ m} \\ h' &= 0.85 \text{ m} \end{aligned}$$

En la misma forma se procede para calcular las dimensiones para cualquier digestor, partiendo de la cantidad de biogas que se desee producir y la eficiencia del sistema propuesto.

TABLA I

**DESECHOS AGRICOLAS Y ANIMALES CON POTENCIAL
PARA PRODUCIR METANO(4)**

-
- Desechos Animales - Estiércoles, cama, desechos alimenticios, orina, etc.
 - Residuos Agrícolas - Semillas, pajas, bagazo de caña, etc.
 - Desechos de Rastros - Sangre, carne, desechos de pescado, etc.
 - Residuos Agroindustriales - Aserrín, desechos de tabaco, cascarilla de arroz, desechos de frutas y vegetales, etc.
 - Residuos Forestales - Ramas, hojas, cortezas, etc.
-

TABLA II

**VALORES PROMEDIO DEL PODER CALORIFICO DE DIFERENTES
COMBUSTIBLES Y SU EQUIVALENTE REFERIDO AL BIOGAS⁽¹⁸⁾**

Combustible	kcal/m ³	kcal/kg	Cantidad equivalente a 1000m ³ de biogas	
Biogas	5335	—	1000m ³	
Gas Natural	9185	—	581m ³	
Metano	8847	—	603m ³	
Propano	22052	—	242m ³	
Butano	28588	—	187m ³	
Electricidad	860 kcal/kWh	—	6203 kWh	
Carbón		6870	776 kg	
Petróleo		11357	470 kg	553 lts
Combustóleo		10138	526 kg	528 lts

TABLA III

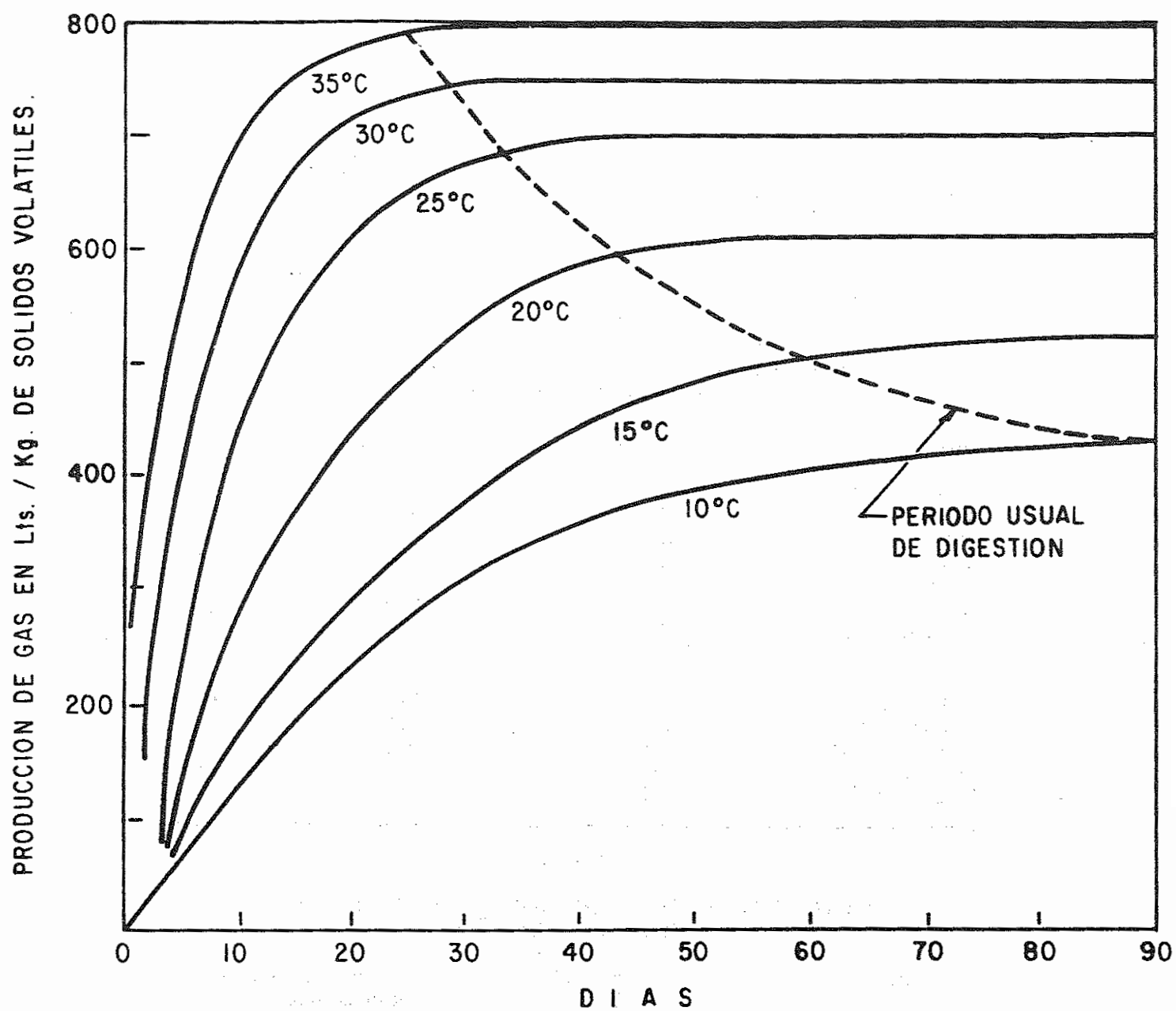
**RELACION CARBONO: NITROGENO DE DIVERSOS DESECHOS
DISPONIBLES EN EL MEDIO RURAL⁽³⁾**

Material	o/o N (base seca)	o/o C (base seca)	C:N
Desechos Animales			
Bovinos	1.7	30.6	18:1
Equinos	2.3	57.6	25:1
Ovinos	3.8	83.6	22:1
Porcinos	3.8	76.0	20:1
Aves	6.3	50.0	7.9:1
Excretas humanas	0.85	2.5	3:1
Desechos Vegetales			
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Paja de arroz	0.63	42.0	67:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1
Rastrojo de soya	1.30	41.0	32:1

TABLA IV

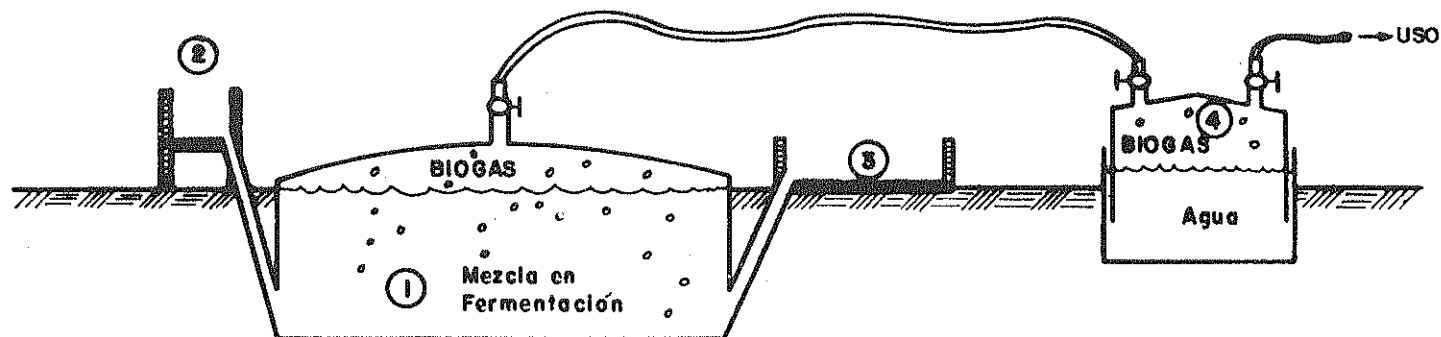
**DATOS PROMEDIO SOBRE EL CONTENIDO DE SOLIDOS TOTALES
DE DIVERSOS DESECHOS⁽¹⁵⁾**

Material	Sólidos Totales (o/o)	Litros de agua por kilogramo de desecho para obtener 8o/o de sólidos totales. (lt/kg)
Heces humanas	17.0	1.1
Estiércol de vaca	20.0	1.5
Caballos, bueyes y mulas	25.0	2.1
Cerdos	18.0	1.3
Ovejas	32.0	3.0
Gallinas	44.0	4.5
Cáscara de cacahuete	96.6	11.1
Hojas secas	50.0	5.3
Paja de arroz	92.6	10.6
Rastrojo y hojas de maíz	77.0	8.6
Papel periódico	93.0	10.6



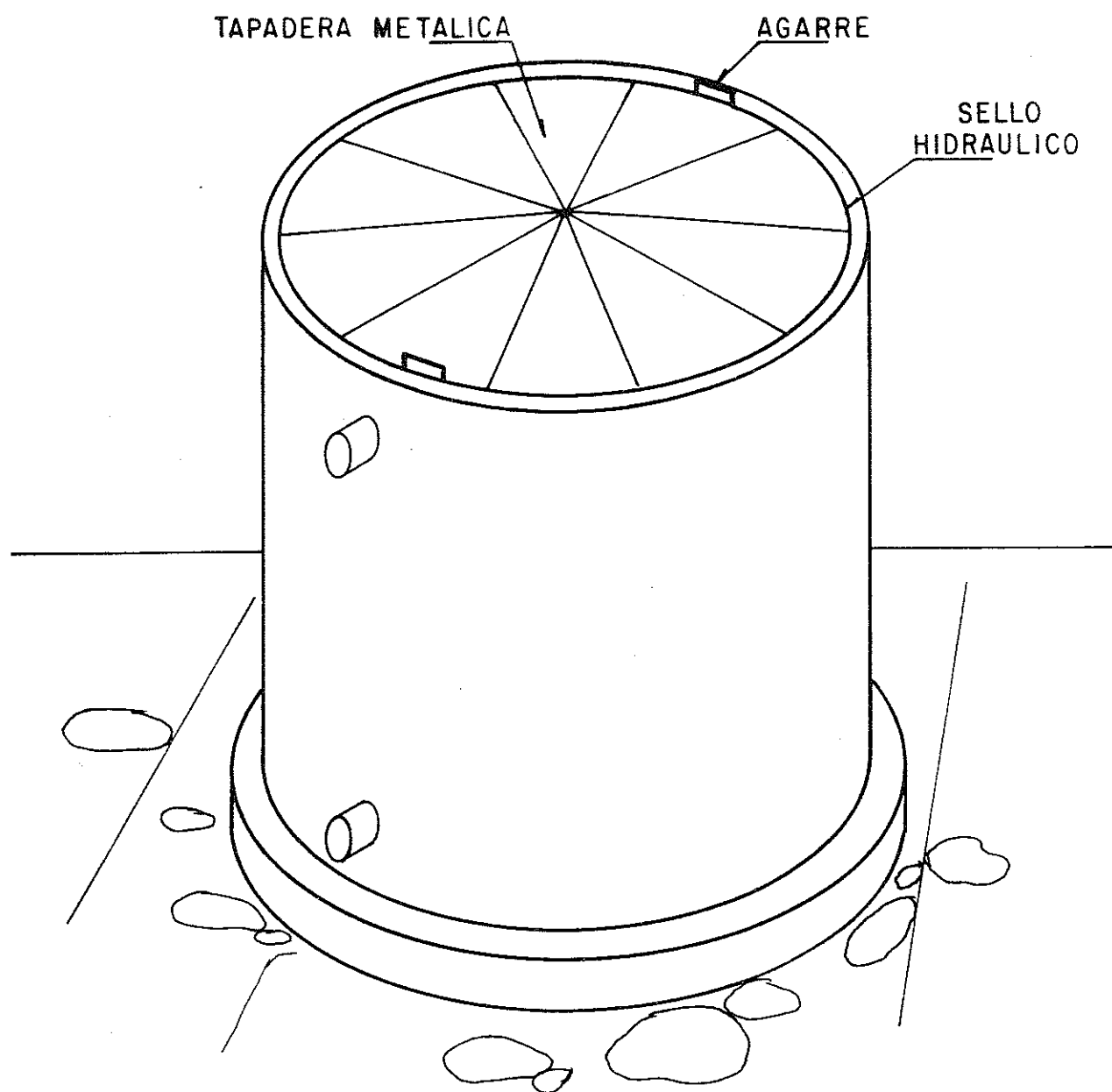
PRODUCCION DE GAS A DIFERENTES TEMPERATURAS (3)

FIGURA 1



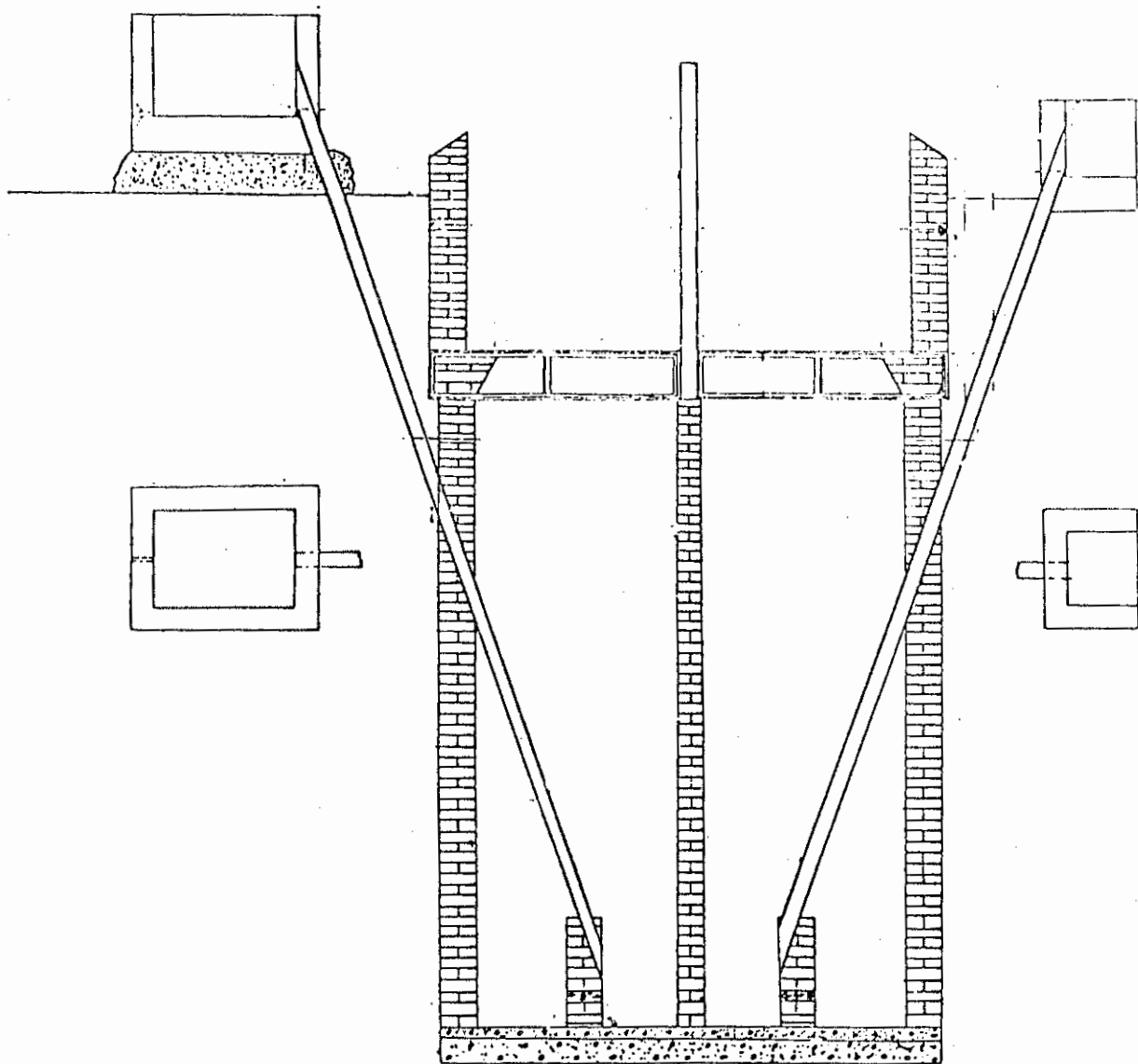
- ① Digestor
- ② Pileta de Carga (Materia Prima)
- ③ Pileta de Descarga (Lodos Residuales)
- ④ Almacenamiento de Biogas

FIG. 2. ESQUEMA DE UNA INSTALACION DE GENERACION DE BIOGAS.



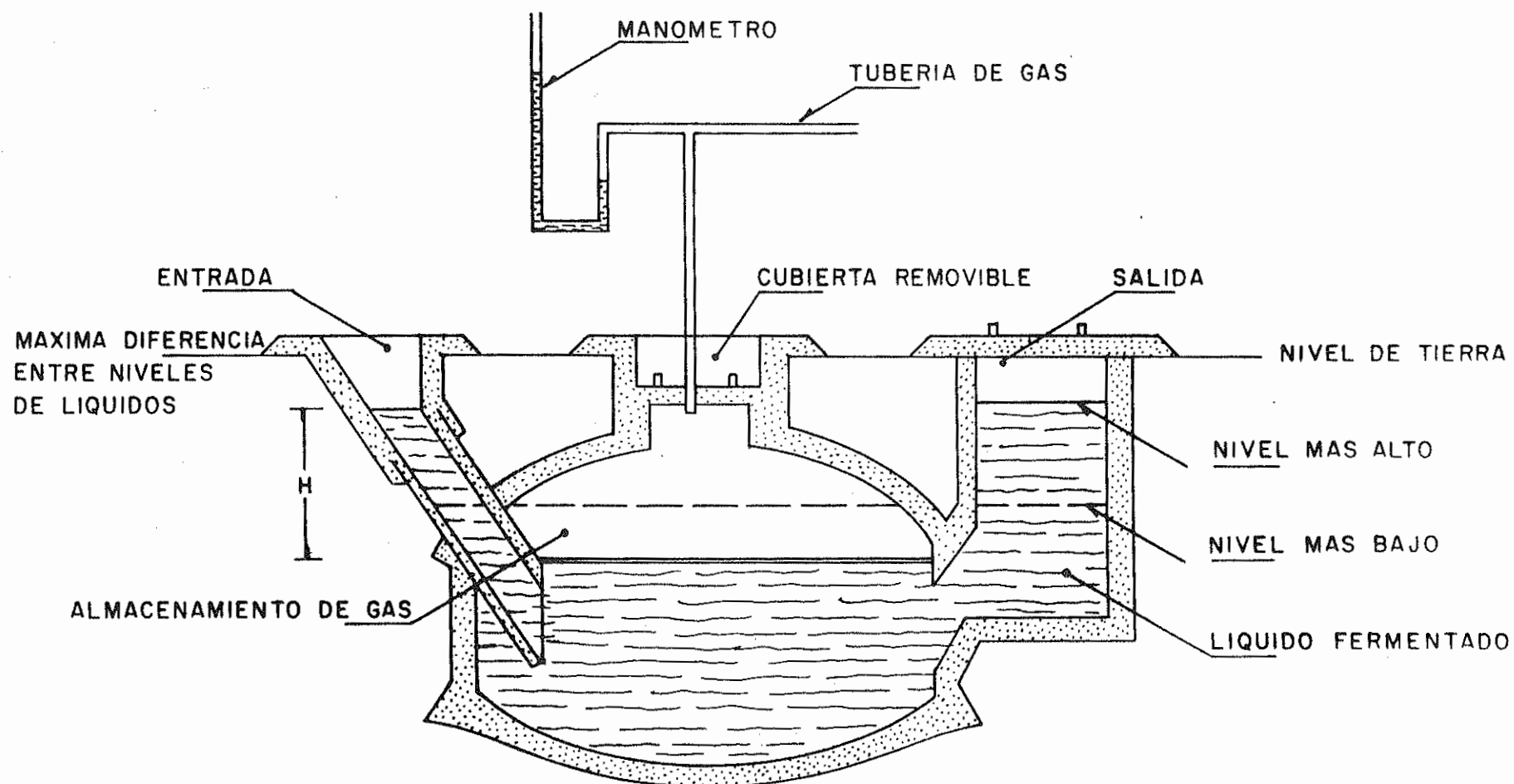
DIGESTOR TIPO OLADE - GUATEMALA (9)

FIGURA 3



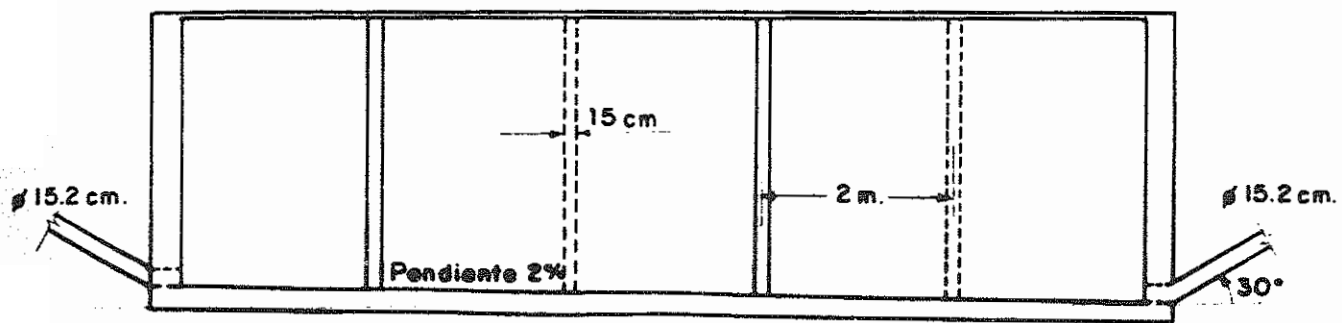
PLANTA DE BIOGAS DISEÑADO POR SINGH (10)(12)
(ESTACION DE INVESTIGACION DE GAS GOBAR)

FIGURA 4

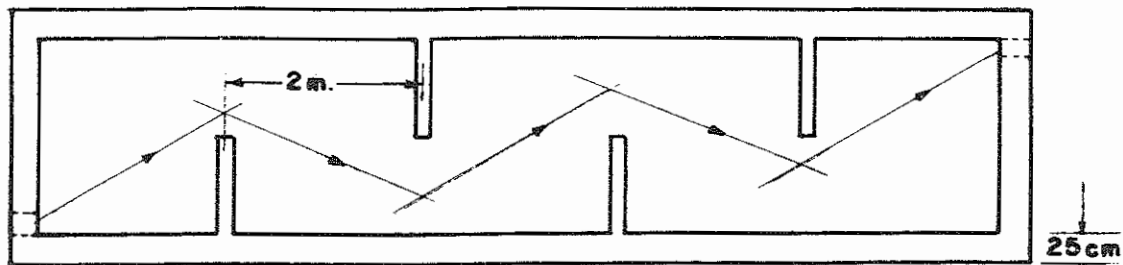


PLANTA DE BIOGAS FAMILIAR TIPO "CIRCULAR, PEQUEÑO
Y ACHATADO" USADO EN LA REPUBLICA POPULAR CHINA (12)

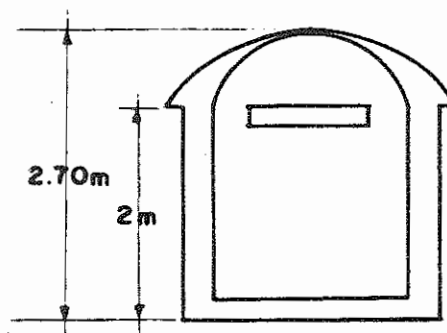
FIGURA 5



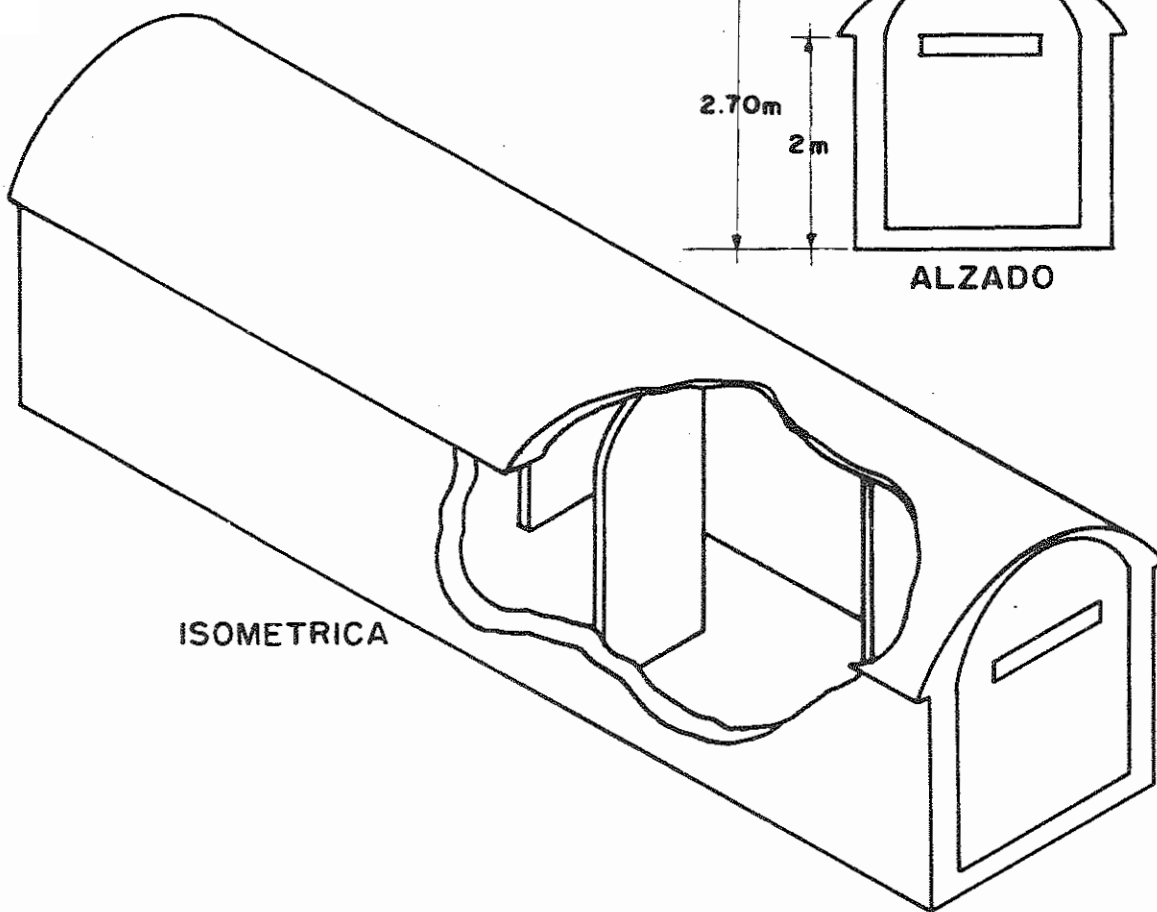
CORTE



PLANTA



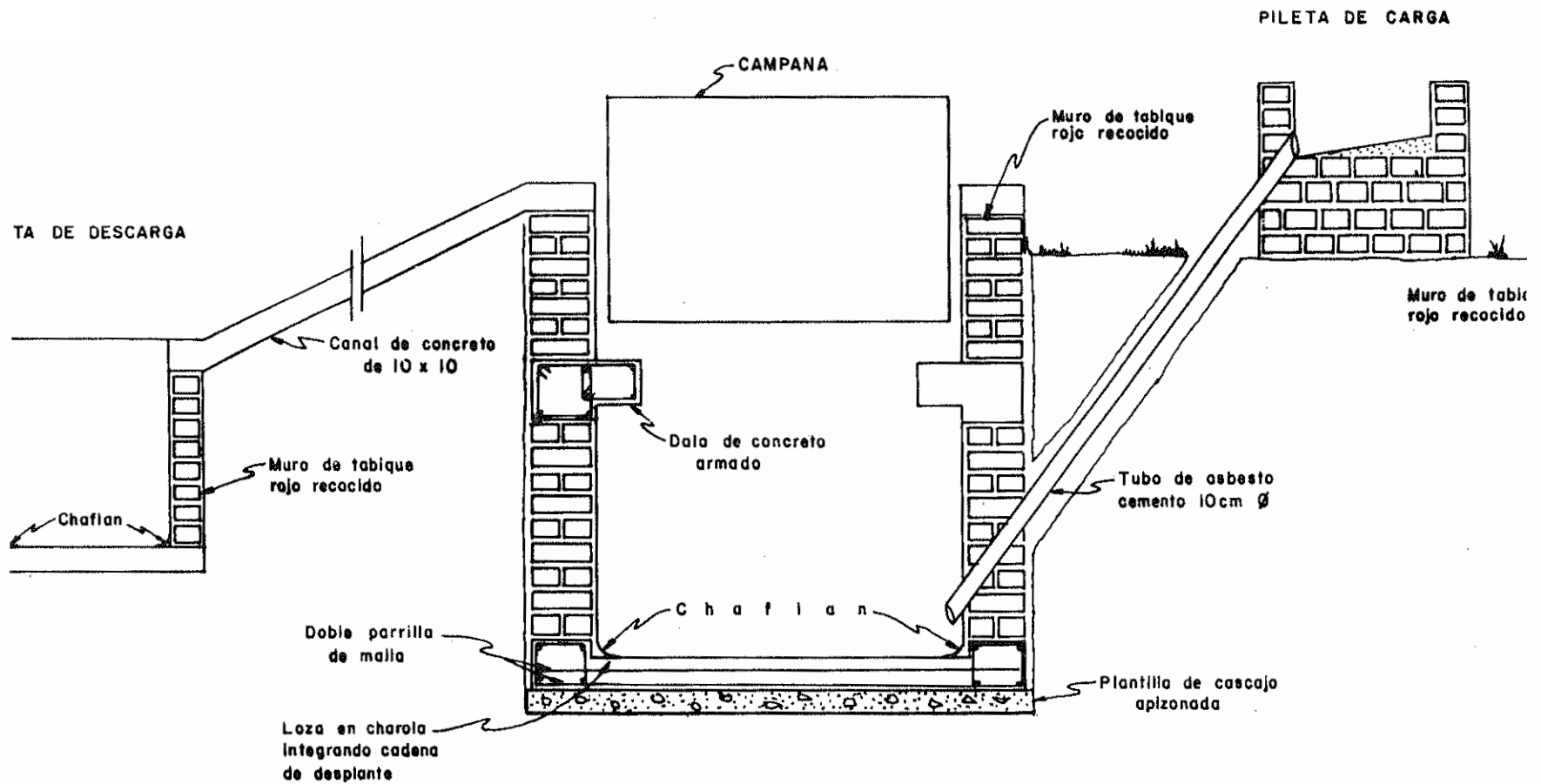
ALZADO



ISOMETRICA

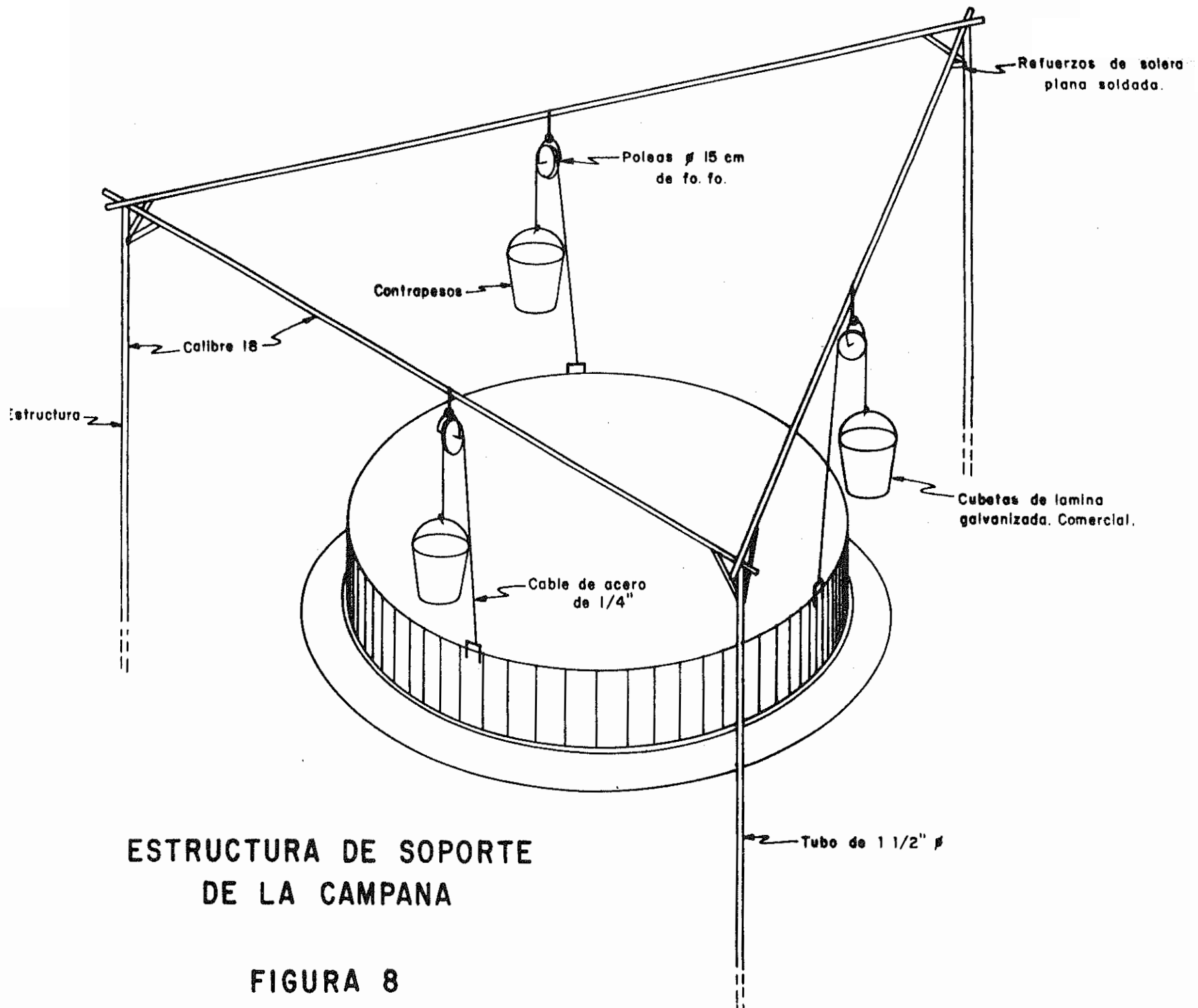
Digestor de 40 m³ (15)

Figura No. 6



DIGESTOR TIPO HINDU DE 4 m³ DE CAPACIDAD

FIGURA 7



ESTRUCTURA DE SOPORTE
 DE LA CAMPANA

FIGURA 8

Esta primera edición
de 3.000 ejemplares se terminó
de imprimir en el mes de diciembre de 1981
en Novass Producciones
La Rábida 169,
Quito, Ecuador