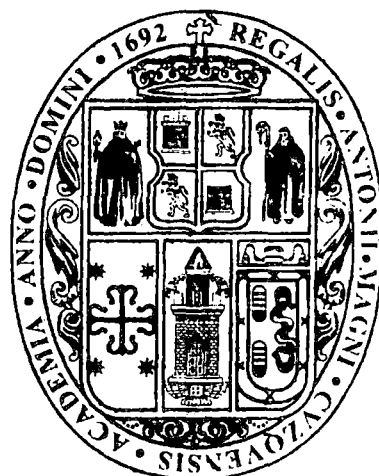


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**CARRERA PROFESIONAL DE FÍSICA**



**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN BIODIGESTOR  
MODELO CHINO MEJORADO PARA ZONAS ANDINAS**

Tesis presentada por:

**Br. FREDY ALMANZA MAMANI**

Para optar el título profesional de  
**FISICO**

Asesor:

**Lic. PEDRO F. ZANABRIA PACHECO**

**CUSCO - PERÚ  
2011**

**TESIS AUSPICIADA POR EL CONSEJO DE INVESTIGACION - UNSAAC**

## DEDICATORIA

*A dios y a mis queridos padres:  
Máximo Almanza Quispe y Cecilia  
Mamani de Almanza con mucho cariño  
y gratitud por su apoyo incondicional.*

*A mis hermanos que los quiero mucho por  
su apoyo incondicional, en los buenos y  
malos momentos para lograr mis metas  
trazadas.*

*A mi querida enamorada Yovana por su  
comprensión y cariño en los momentos  
difíciles. A todos mis amigos que  
siempre me apoyaron moralmente para  
todos mis propósitos.*

## AGRADECIMIENTO

*Reconocimiento especial al:*

*Lic. Pedro F. Zanabria Pacheco. Por la confianza que tuvo en mi y todos los conocimientos que compartió conmigo; por su paciencia y por el tiempo dedicado en el asesoramiento del presente trabajo.*

*A todos los profesores de la carrera profesional de física por sus enseñanzas durante mi formación profesional.*

INDICE

1. RESUMEN
2. INTRODUCCIÓN
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
4. JUSTIFICACION
5. HIPOTESIS
6. OBJETIVOS.
7. FACTIBILIDAD ECONOMICA
8. FACTIBILIDAD TÉCNICA.
9. METODOLOGIA.

CAPITULO I

FUNDAMENTACION TEORICA

1.1.- PANORAMA DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN EL PERU.....	1
1.1.1. LA ENERGIA SOLAR.....	2
1.1.2.- LA ENERGIA EOLICA.....	6
1.1.3.- LA ENERGIA HIDRAULICA.....	7
1.1.4.- ENERGIA GEOTERMICA.....	8
1.1.5. LA ENERGIA DE LA BIOMASA.....	9
1.1.5.1. POTENCIAL DE BIOMASA EN EL PERU.....	10
1.1.5. 2. POTENCIAL BIOMASA VEGETAL.....	11
1.1.5.3. POTENCIAL DE LA BIOMASA ANIMAL.....	12
1.1.5.4. BIOCOMBUSTIBLES.....	13
1.2. DIGESTOR.....	13
1.2.1.- PARTES DE UN DIGESTOR.....	13
1.2.2. CLASIFICACION DE LOS DIGESTORES.....	14
1.2.3. TIPOS DE DIGESTORES.....	16
1.2.4. EXPERIENCIAS EN EL MUNDO Y EN EL PERU.....	20
1.3. COMPONENTES Y PRODUCTOS DE UN DIGESTOR.....	21
1.3.1.- DIGESTION ANAEROBICA.....	21
1.3.2.- BIOGAS Y SUS CARACTERISTICAS.....	23
1.3.3.- BIOABONO.....	24
1.3.4.- EL BIOL.....	24

1.4.- PARAMETROS DE UN DIGESTOR.....	25
1.4.1. DENSIDAD.....	25
1.4.2. PH.....	25
1.4.3. TEMPERATURA.....	26
1.4.4. TOXICIDAD.....	27
1.5.- RELACION CARBONO – NITROGENO Y TIEMPO DE RETENCION.....	28
1.5.1. RELACION CARBONO-NITROGENO.....	28
1.5.2. TIEMPO DE RETENCION.....	28
1.6.- PROCESO DE FORMACION DE METANO.....	29
1.7. INVERNADEROS.....	30
1.8.- ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PLANTAS DE BIOGAS.....	30
1.8.1. EFECTO DEL CALENTAMIENTO DE LA LECHADA.....	42
1.8.2. EFECTO DEL AISLAMIENTO.....	43
1.8.3. EFECTO DE LA CALEFACCION DEL INVERNADERO.....	45

## CAPITULO II

### DISEÑO, CONSTRUCCION, MATERIALES Y METODOS

2.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO Y CARACTERISTICAS CLIMATICAS.....	48
2.2.- DISEÑO Y CONDICIONES.....	48
2.3.- DIMENCIONAMIENTO.....	53
2.4. HERRAMIENTAS.....	55
2.5. MATERIALES.....	56
2.6. CONSTRUCCION.....	57
2.6.1.- PLACA DE FONDO.....	57
2.6.2.- MANPOSTERIA.....	58
2.6.3.- DEPOSITOS DE CARGA Y DESCARGA.....	58
2.6.4. REVESTIMIENTO.....	59
2.6.5.- TAPA, SELLO DE AGUA Y CONEXIONES AUXILIARES.....	60
2.7. INSTALACION DE SENSORES.....	61
2.8. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DE MEDIDA.....	63
a. MULTIMETRO DIGITAL.....	63
b. HIGROTERMOMETRO.....	63
c. RADIOMETRO.....	63

d. TERMOMETRO DIGITAL Y ANALOGICO.....	64
e. PH-METRO.....	64
f. TERMORESISTENCIAS PT-100.....	64
g. TERMOCUPLAS.....	64
h. MANOMETRO.....	64
2.9. INSTALACION DEL INVERNADERO.....	65
2.10. DEFINICION DEL MATERIAL ORGANICO.....	66

### CAPITULO III

#### RESULTADOS Y DISCUSSIONES

3.1.- PRUEBA DE HERMETICIDAD DEL DIGESTOR.....	67
3.2. ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	67
3.2.1. EFECTO DEL CALENTAMIENTO DE LA LECHADA O LODO EN UN SISTEMA AISLADO TERMICAMENTE.....	67
3.2.2. EFECTO DE LA CALEFACCION DEL INVERNADERO.....	70
3.2.3. EFECTO DEL AISLAMIENTO.....	71
3.3.- EVALUACION DEL BIODIGESTOR EN VACIO SIN INVERNADERO.....	74
3.4.- EVALUACION DEL DIGESTOR EN VACIO CON INVERNADERO.....	76
3.5. EVALUACION DEL DIGESTOR CARGADO CON AGUA SIN INVERNADERO.....	78
3.6. EVALUACION DEL DIGESTOR CARGADO CON AGUA Y CON INVERNADERO INSTALADO.....	81
3.7. EVALUACION DE LA PRIMERA CARGA.....	83
3.8. EVALUACION DE LA SEGUNDA CARGA.....	87
3.9. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE LA EVALUACION DEL DIGESTOR.....	90
3.10. EVOLUCION DEL PH.....	92
3.11. PRODUCCION DE BIOGAS Y BIOABONO.....	93
3.11.1. PRODUCCION DEL BIOL.....	93
3.12. ANALISIS ECONOMICO.....	94
3.12.1. COSTOS DE MATERIALES.....	94
3.12.2. COSTOS DE MANO DE OBRA.....	95
3.12.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	96

**3.12.4. BENEFICIOS DEL USO DE DIGESTOR EN UN PERIODO DE 20**

<i>AÑOS</i> .....	97
<i>CONCLUSIONES</i> .....	99
<i>RECOMENDACIONES</i> .....	100
<i>BIBLIOGRAFIA</i> .....	101
<i>ANEXOS</i> .....	103
<i>ANEXO 1: PROPIEDADES FISICAS DE LOS DIFERENTES MATERIALES DE CONSTRUCCION</i> .....	104
<i>ANEXO 2: FOTOS</i> .....	107

## RESUMEN

En el Distrito de Yaurisque, Provincia de Paruro, a 3340 m.s.n.m. de altura, se ha construido y evaluado el funcionamiento de un digestor de  $6\text{m}^3$ , modelo chino mejorado para zonas andinas, con aislamiento en el suelo y paredes laterales, empleando ladrillo cocido como material de mampostería, con refuerzo de fierro corrugado, para evitar las fracturas y agrietamientos muy comunes en dichos sistemas, y para mejorar la inercia térmica del sistema e incrementar la temperatura del lodo, se ha construido sobre el biodigestor un invernadero. Como material orgánico de fermentación se ha empleado materia orgánica producida en la zona andina: estiércol de cabras, ovejas, cuyes y conejos. Se ha mejorado el proceso de conversión metanogénica en 65 días para una temperatura media en el lodo de  $17.2^{\circ}\text{C}$ , en el interior del invernadero  $20.75^{\circ}\text{C}$  y temperatura media del ambiente exterior  $12.5^{\circ}\text{C}$  produciéndose  $0.53\text{m}^3$  de gas metano y 10 litros de biol por día.



## **INTRODUCCIÓN**

Nuestro país, al igual que otros países de Sudamérica, está viviendo una gran crisis energética que repercute directamente en la economía de los pequeños productores debido a los altos costos de los combustibles provenientes del petróleo.

Una de las herramientas importantes para enfrentar la crisis es la utilización de fuentes de energía renovables y de bajo costo, como es el caso de la energía solar, la eólica o la biomasa. En particular los residuos orgánicos de las actividades agropecuarias y su descomposición en biodigestores para obtener el biogás, bioabono, biol, producto que pueden ser empleados por las familias campesinas para sus actividades cotidianas como cocción de alimentos, abonos y controles sanitarios de naturaleza orgánica, como consecuencia generan un ahorro energético y económico, el empleo de productos menos contaminantes y mejora de la calidad de vida.

Otra opción eficiente es el del caso de digestores para el tratamiento de excreta humana que ordinariamente son vertidas a los ríos, contaminándolos y causando graves enfermedades en la salud de las personas que la consumen.

El Centro de Capacitación para el desarrollo (CECADE) Qosqo Yachay Wasi, ([www.cuscosolar.org](http://www.cuscosolar.org)) ubicado en el distrito de YAURISQUE, Provincia de Paruro, es una Asociación Civil sin fines de lucro, dedicada a ofrecer Cursos de Capacitación a familias campesinas en estado de pobreza, para mejorar sus capacidades y destrezas, así mismo es un centro de difusión promoción y transferencia de tecnologías que emplean las energías renovables, se genera una gran cantidad de residuos ORGANICOS, que requieren un tratamiento para transformarlos en insumos para una agricultura orgánica sostenible. Para ello apoya la ejecución de proyectos de investigación a nivel de tesis universitaria, ofreciendo todas las facilidades para el empleo de sus instalaciones y equipamiento.

Debido a la necesidad de plantear nuevas alternativas energéticas y promover conciencia en el uso de los desechos orgánicos y darles una mejor ocupación, planteamos el diseño, construcción de un BIODIGESTOR TIPO CHINO MEJORADO PARA ZONAS ANDINAS para producir bioabono, biol y biogás, así mismo para estudiar la conveniencia de usar biodigestores como plantas de tratamiento de aguas residuales, de esta manera se

promoverá el ahorro de combustibles más contaminantes como el carbón y la leña y la eliminación de desagües al río.

En el Perú el 90% de la población rural recurre a la biomasa como combustible doméstico, generalmente utilizándolo en fogones tradicionales de manera ineficiente, sin chimenea y en ambientes con escasa ventilación. Esto aumenta riesgos de infecciones respiratorias, enfermedades pulmonares y oculares, y trastornos del embarazo. La organización mundial de la salud, estima que en Perú la contaminación doméstica es responsable de al menos 1500 muertes prematuras al año.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Las experiencias desarrolladas en zonas andinas, en diferentes proyectos sobre digestores presentan los siguientes problemas:

- I. Problemas en la parte estructural, agrietamientos en las paredes y piso de los digestores por donde se filtra el agua y el gas.
- II. La temperatura de fermentación es muy baja debido a las temperaturas medias alcanzadas en estos lugares, el retraso de la conversión, y baja eficiencia en la producción del biogas.
- III. Construcción de los digestores lejos de la producción del material orgánico y la falta de capacitación sobre el manejo y mantenimiento de estos sistemas.

## **JUSTIFICACION**

Las experiencias del empleo de digestores en zonas andinas (3000 a 4000m de altitud) es muy limitada, no existen reportes sobre los principales aspectos técnicos: estructura, confort térmico y otros que limitan el funcionamiento de estos sistemas. El presente trabajo se desarrolla proponiendo alternativas a la problemática expuesto por lo que el diseño considera mejoras en su estructura y comportamiento térmico y optimización de la materia orgánica disponible, elementos necesarios para la mejora de la eficiencia de conversión del gas, bioabono y el biol que son residuos de la digestión anaeróbica, estos residuos contienen en mayor proporción el N, P, K que sirven para nutrir un suelo de cultivo.

## **HIPOTESIS**

Un biodigestor “modelo Chino mejorada para zonas andinas” con mampostería de ladrillo, refuerzo de fierro, aislamiento térmico en suelo y paredes, dentro de un invernadero, incrementa la inercia térmica del sistema, mejorando la eficiencia de producción de gas, biol y bioabono.

## **OBJETIVOS.**

### **OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar, construir, evaluar un “biodigestor modelo chino mejorado para zonas andinas”, para evitar las fallas estructurales y optimizar la producción de gas, bioabono y biol, empleando diferentes tipos de materia orgánica.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Mejorar la estructura del piso y paredes empleando mampostería de ladrillo cocido reforzado con fierro.
- Aislar el sistema para mantener una temperatura óptima de conversión
- Evaluar la influencia del Invernadero en la mejora de la inercia térmica del sistema.
- Comparación de la producción de gas, bioabono y biol, empleando diferentes tipos de cargas con materiales disponibles en zonas andinas.

### **FACTIBILIDAD ECONOMICA**

Los beneficios directos del uso de la digestión pueden ser estimados en base al uso del biogás, como una fuente alternativa a energía no renovable, y a la aplicación del efluente como una sustitución de nutrientes aportados por fertilizantes sintéticos

El valor comercial del biogás como fuente de energía fue estimado en su equivalente en valor energético de un combustible fósil que puede ser reemplazado por el uso de biogás.

Un combustible comúnmente utilizado en zonas alto andinas es la leña y bosta de vacunos y el diesel, el cual se puede sustituir instalando digestores eficientes de este tipo.

### **FACTIBILIDAD TÉCNICA.**

Los biodigestores son sistemas de amplio uso a nivel mundial, los chinos pioneros en el desarrollo tecnológico, tienen activos millones de estos sistemas con resultados innovadores, que mejoran la calidad de los usuarios, en su mayoría campesinos, pequeñas

empresas, por lo que existe mucha información acerca de la factibilidad técnica. En Sudamérica y en particular en el Perú existen muchas experiencias sobre el desarrollo de digestores para la producción de biogás y bioabono, con resultados positivos en la costa, pero con resultados no auspiciosos en la sierra peruana, por los problemas expuestos anteriormente.

## **METODOLOGIA.**

El presente trabajo es un proyecto científico tecnológico de evaluación y contrastación de las principales variables en el proceso de conversión: materia orgánica en relación de mezcla del lodo, temperatura de fermentación, pH, humedad, presión y las variables meteorológicas del entorno: temperatura humedad relativa radiación solar, etc. Paralelamente se evaluarán la producción de gas, bioabono, biol, costos de producción e instalación. Esta información será evaluada y contrastada con experiencias similares realizadas en zonas andinas.

## **CAPITULO I**

### **FUNDAMENTACION TEORICA**

#### **1.1. PANORAMA DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN EL PERU**

El uso tecnificado de las E.R. en particular de la energía solar se remonta a las épocas pre incas e incas donde se empleó de diferentes formas: secado y almacenamiento de productos agropecuarios, la energía solar, comenzó en el Perú, como en muchos otros países, en los años setenta del siglo pasado, como consecuencia de la llamada crisis de petróleo. Se trabajó en diferentes instituciones del país (mayormente en universidades) en capacitación y desarrollo tecnológico, especialmente en bombeo de agua con molinos de viento, calentadores solares de agua y secadores solares de productos agrícolas. Estas experiencias fueron puntualmente exitosas, la tecnología de los calentadores solares de agua, secadores solares artesanales de maíz usados hoy en el departamento del cusco diseminados por investigadores de la UNSAAC en cooperación con la GTZ Alemán.

En el Perú, cerca de 6.5 millones de personas carecen de energía eléctrica. La mayor parte de ellas (5 millones) vive en zonas rurales, donde más del 67% de la población se encuentra en la misma situación. Esta carencia acentúa, y en algunos casos perpetúa, la situación de pobreza de estas poblaciones. (MINEM 2001)

Ante esto, la estrategia usual para incrementar la cobertura energética es ampliar la red del sistema eléctrico interconectado nacional. Sin embargo, por la extensa y complicada geografía del territorio peruano, es probable que la red nunca llegue a las zonas más aisladas, pobres y despobladas.

Por lo tanto, en estas zonas, las alternativas para el abastecimiento energético tienen que basarse en fuentes renovables. Por ello, desde 1992, Soluciones Prácticas-ITDG, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), implementó el Fondo de Promoción de Micro centrales Hidráulicas, que desde 2006 se amplió formando el Fondo de Promoción de Energías Renovables (FOPER), que ahora incluye otros tipos de energías renovables además de la micro hidroenergía, y está expandiendo su ámbito de acción a Bolivia, Ecuador y Colombia.

El 2005 se realizó el “Estudio sobre la situación actual de las energías renovables del país y su perspectiva de desarrollo en el mercado eléctrico nacional” del cual se ha obtenido que la combustión directa de residuos vegetales tales como el bagazo, cascarilla de café, cascarilla de arroz, residuos de maíz pudieran generar alrededor de 7,008 GWh/año. Otro tipo de biomasa como los residuos animales pueden también convertirse en fuente de energía, tiene el potencial de generar 9,655 GWh/año.

Los proyectos de Generación con Biomasa, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) por considerarse la biomasa como renovable. (<http://www.minem.gob.pe>)

### **1.1.1. LA ENERGIA SOLAR**

La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio Peruano. En la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante grande y bastante uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso.

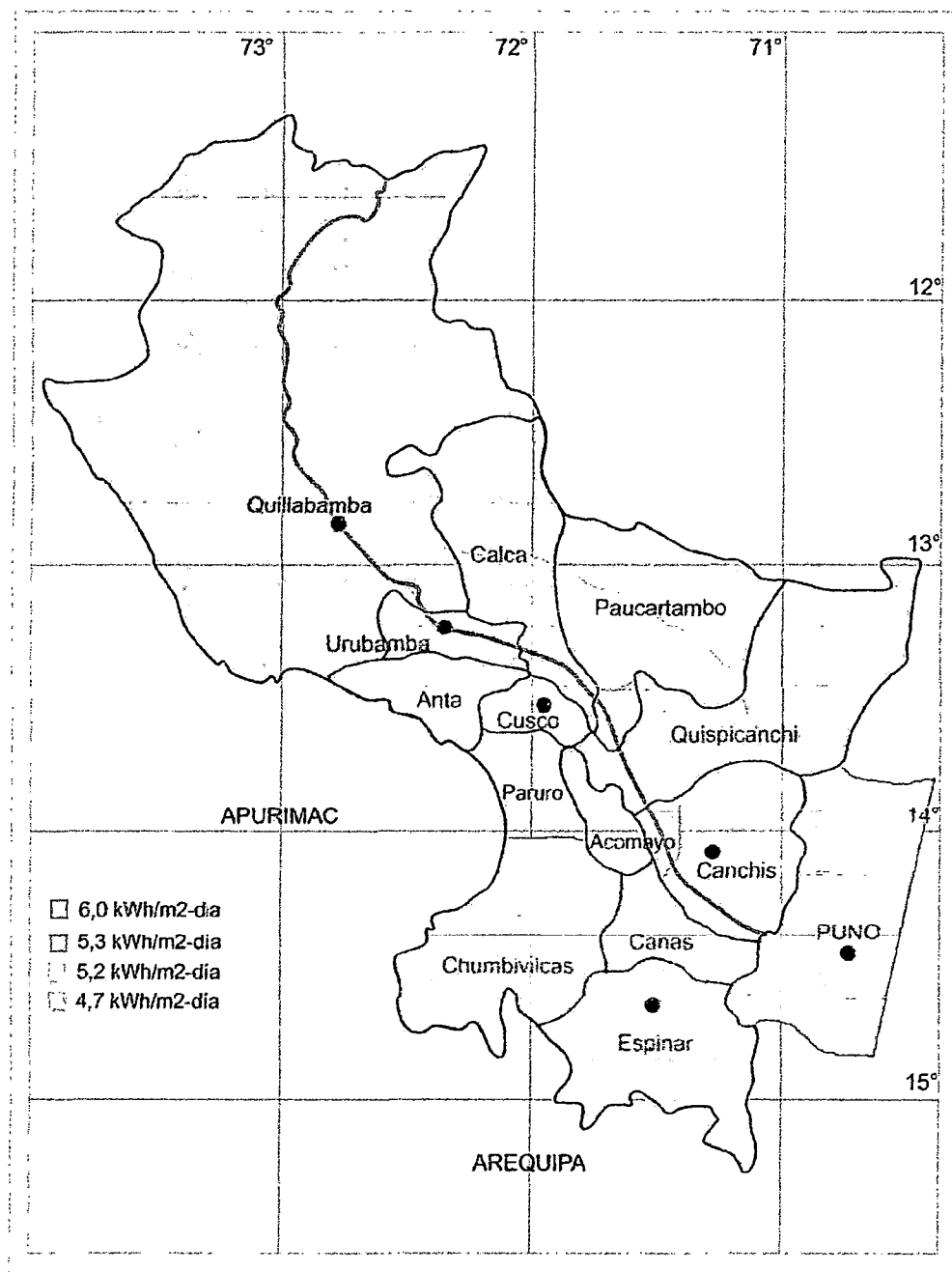
Existen mapas del potencial solar en el Perú (Senamhi 2005), así como del departamento del Cusco (Zanabria, 2004), mostrando un gran potencial de este recurso en todo el territorio nacional, con valores medios diarios anuales que oscilan entre los 4-5 kWh/m<sup>2</sup>día en la costa y selva y de 5-7 KWh/m<sup>2</sup>día, en la zona andina. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia. El problema es transformar esta energía solar en energía útil y con un costo aceptable.

Una de las formas más usadas en la conversión foto térmica, donde la energía solar se transforma en calor, empleando fundamentalmente el principio del cuerpo negro, es decir una superficie negra, absorbe la energía solar y la transforma en calor, que puede ser usado para calentar ambientes, calentar agua (termas solares), aire y secar diversos productos, cocinar, etc.

Otra forma de utilización es la conversión fotovoltaica, que emplea paneles solares “conformados por células de silicio, que transforman la energía solar en electricidad, para diferentes usos: iluminación, TV radio comunicación, postas de salud, etc.

Estas son tecnologías limpias, maduras, eficientes y altamente confiables.

**MAPA DE RADIACIÓN SOLAR DEL DEPARTAMENTO DEL CUSCO  
(PROMEDIO DIARIO ANUAL)**



**Figura (1.1): Mapa de Radiación solar en el Cusco**  
Fuente: (Zanabria, 2004)



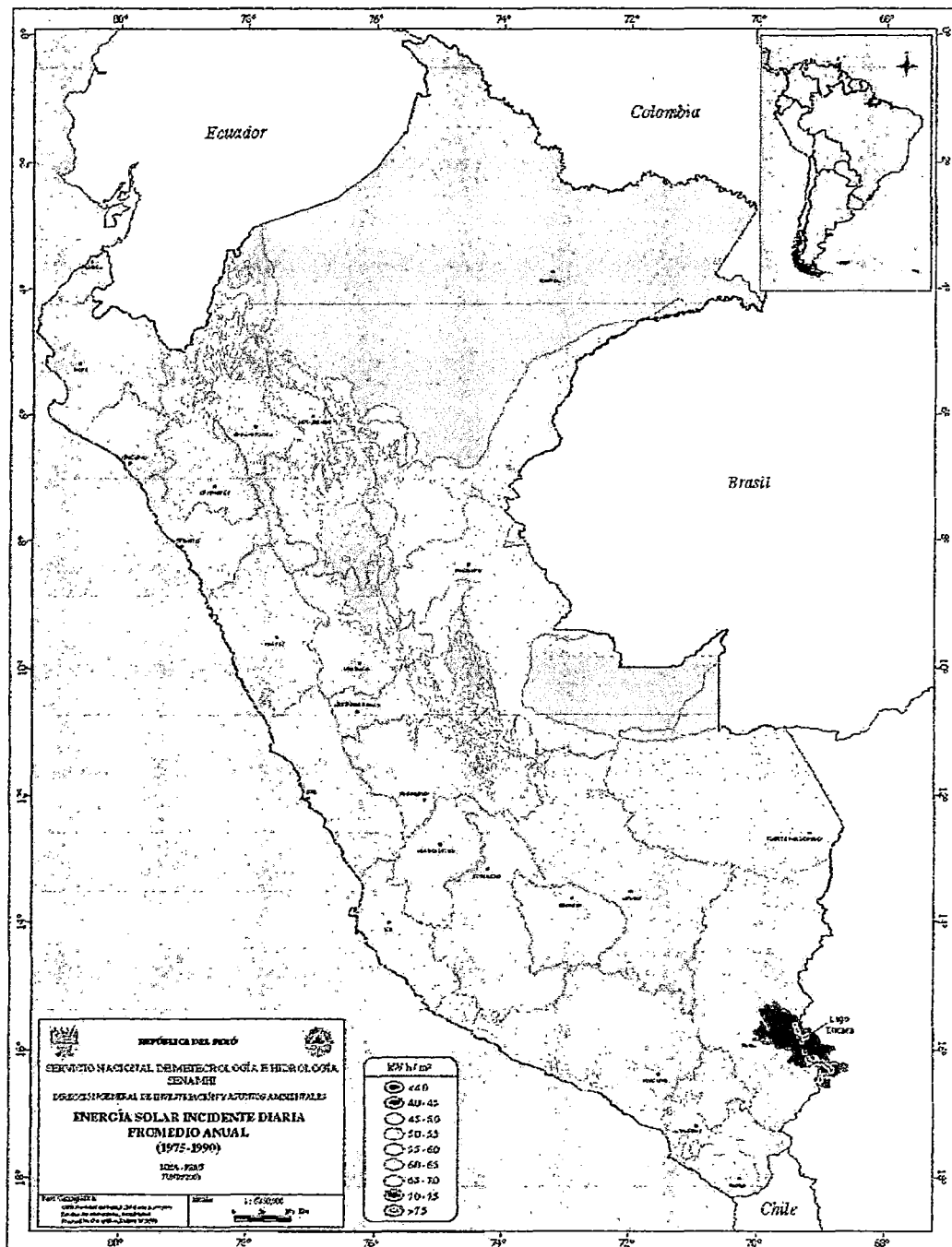


Figura (1-2) Mapa de energía solar incidente diaria promedio anual del Perú.

Fuente: (Senamhi 2005)

Algunas definiciones formales de las cantidades más importantes que se manejan en el campo de la radiación se presentan a continuación.

**RADIACION.** Es la energía electromagnética emitida, transferida o recibida

**RADIACION SOLAR.** Término genérico para la energía radiante que emite el Sol.

**IRRADIANCIA.** Potencia solar incidente en una superficie por unidad de área,  $I$  ( $W/m^2$ ).

**IRRADIACION.** Energía solar incidente en una superficie por unidad de área.

Es el resultado de integrar la irradiancia en un período de tiempo,  $H$  ( $KWh/m^2$ ).

Cualquiera de los términos anteriores puede ser aplicado a cualquier rango de radiación espectral. La relación entre las diferentes magnitudes espectrales es la siguiente:

$$v = f / c = 1 / \lambda$$

$$f = c / \lambda$$

En donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $v$  el número de onda,  $f$ , la frecuencia y  $c$ , la velocidad de la luz.

Otros términos que se manejan particularmente para flujos de radiación dentro de la atmósfera son:

**Radiación de onda corta.** (Radiación solar). Radiación de longitudes de onda entre 0.2 y 4  $\mu m$ , aproximadamente.

**Radiación de onda larga.** (Radiación terrestre). Radiación de longitudes de onda entre 4 y 100  $\mu m$ , aproximadamente.

**Radiación solar directa.** Radiación solar que se recibe del ángulo sólido del disco solar.

**Radiación Solar Difusa.** Radiación solar procedente de toda la bóveda celeste. Está originada por la dispersión de la radiación en la atmósfera.

**Radiación solar reflejada.** Fracción de la radiación solar (directa y difusa) que es reflejada por la superficie terrestre.

**Radiación Solar Global.** Suma de la radiación solar directa, difusa y reflejada. En cuanto a la simbología se sugiere que cuando se refiere a irradiancia se utilice la letra  $I$  y cuando se refiera a irradiación se utilice  $H$ .

### **1.1.2. LA ENERGIA EOLICA**

La energía del viento ha sido ampliamente utilizada en el Perú como alternativa para que los campesinos extraigan agua del subsuelo. Piura, Chiclayo, Ica, Arequipa, Puno y los valles del desierto de Lurín presentan condiciones ideales para el funcionamiento de estos equipos. Los vientos alcanzan velocidades promedios de 6 a 9 metros por segundo, lo que gráficamente equivale a que el aire levanta polvo y hojas de papel o que en estanques se formen crestas en la superficie del agua. En Piura cada máquina bombea entre 40 a 60 metros cúbicos por día, una persona del medio rural requiere 125 litros por día; una hectárea de algodón 165 metros cúbicos semanales.

En Arequipa, en el margen del río Chili, miles de aspas giran entre el sol y el viento irrigando ingeniosamente más de 450 hectáreas de cultivos. Se han realizado estudios para determinar el potencial de utilización de la energía eólica principalmente en Piura, Arequipa y recientemente en Puno como alternativa de solución a los problemas de sequía que se presentan en esa región. Las velocidades registradas alcanzan 18 Km. /h. y a 70 - 100 metros por encima del nivel del suelo se registran velocidades variables con un promedio de hasta 30km/h.

Estas velocidades del viento son suficientes para justificar el bombeo con energía eólica cuando la profundidad a que se halla el agua no es excesiva, y puede permitir la generación de electricidad a pequeña escala por medio del viento en zonas aisladas.

La velocidad del viento en un determinado lugar depende de varios factores: rumbo, altura sobre el suelo y configuración del terreno. El rumbo tiene poca importancia, pues es fácil disponer un mecanismo para que el molino presente el frente a la dirección más favorable del viento. Una fórmula usual en molinos pequeños es adaptando una cola orientadora en la parte posterior. En este caso Jacobs, encontró que con molinos de dos aspas la cola determina una inestabilidad muy grande del aparato, lo que se eliminó introduciendo la hélice de 3 aspas. Una alternativa energética que pretende impulsar el estado a través del MINEM es la energía eólica. Se han instalado dos pequeños aerogeneradores, como proyectos piloto: en el Perú

- Central Eólica 250 KW en Malabrigo, se encuentra funcionando desde el año 1996.
- Central Eólica 450 KW San Juan de Marcona, se encuentra funcionando desde el año 1998.

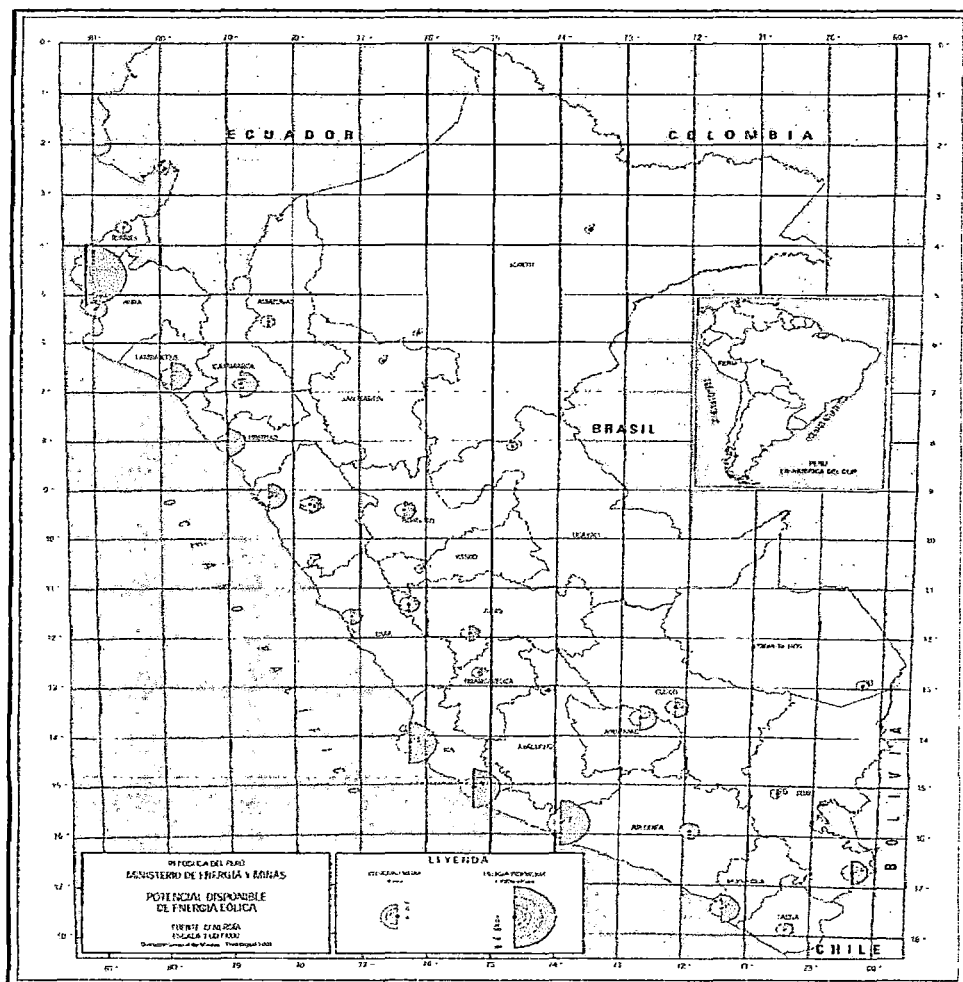


Figura. (1-3) Mapa del potencial eólico en el Perú.

Fuente: (Minem-2001)

### 1.1.3. LA ENERGIA HIDRAULICA

Energía convencional, muy conocida en el Perú, sin embargo solo se considera renovable a la mini, micro y pico centrales hidroeléctricas, por tener casi nulo impacto ambiental.

Se aprovecha solamente 3 - 4 % del potencial hidráulica en el Perú, mayormente en centrales hidroeléctricas grandes conectados a la red nacional, y suministrando 23 % de toda la energía consumida en el Perú y 71 % de la energía eléctrica.

- Adinelsa, una empresa estatal, administra 31 centrales hidráulicas, con un potencial total de 31 MW.

- ITDG, una ONG, ha diseñado y construido diversos pico- y micro centrales hidráulicas, incluyendo las turbinas, especialmente en la región de Cajamarca donde mantiene también un centro de demostración y capacitación en energías renovables”, CEDECAP. (<http://www.minem.gob.pe>)

#### **1.1.4. ENERGIA GEOTERMICA.**

La energía geotérmica es un recurso benigno y renovable, que va de acuerdo con el control del medio ambiente y que asegura una buena conservación del mismo.

El aprovechamiento de este recurso permitirá tener una fuente más de generación de energía que favorecerá al desarrollo de diversas regiones de extrema pobreza.

La energía geotérmica resulta del aprovechamiento de las diferencias de temperatura que se presentan en el subsuelo.

Esto permite el calentamiento del agua subterránea, que en algunos casos llega a vaporizarse (géisers). La fuente puede ser de alta entalpía, si la temperatura del agua es suficiente para generar electricidad, o de baja entalpía, si se le puede aprovechar sólo para calefacción. Gracias a la “Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos”, promulgada el 29.02.1997, el marco legal favorece la inversión privada, teniendo en cuenta que nuestro país posee alrededor de 300 manifestaciones de aguas termales entre 49°C y 89°C, situadas a lo largo de la Cordillera Occidental y en menos proporción en los valles interandinos y la zona oriental.

La energía geotérmica se puede aplicar en la industria, comercio y el sector domiciliario, para la generación de electricidad o el calentamiento de agua y calefacción de ambientes.

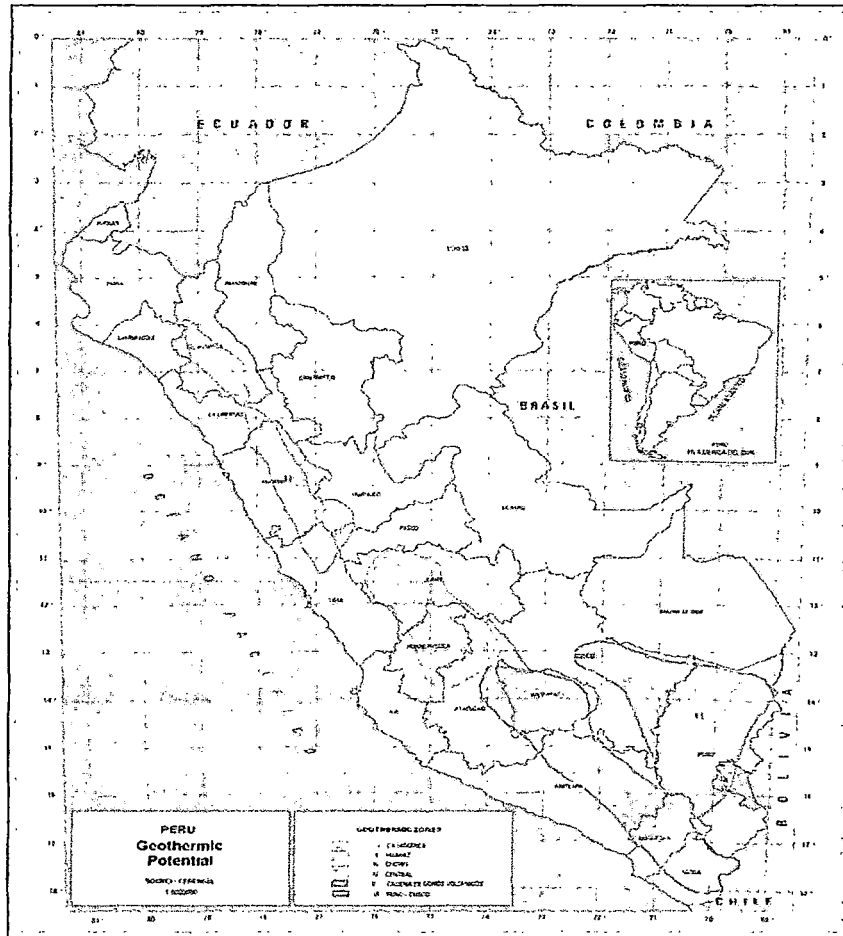


Figura. (1-5) Mapa del potencial geotérmico del Perú.

Fuente: ([http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia\\_geotermica.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia_geotermica.pdf)).

### 1.1.5. LA ENERGIA DE LA BIOMASA

Por su consumo, en orden de importancia son: leña, biocombustibles, biodigestores residuos sólidos y forestales. La leña tiene un alto consumo, debido a que no tiene costo o en su defecto es demasiado barata y adicionalmente, es de libre disponibilidad.

En el Perú por su uso ancestral, la leña ocupa el tercer lugar de consumo final total, después de la electricidad.

### 1.1.5.1. POTENCIAL DE BIOMASA EN EL PERU.

El plan nacional de energía 2015, del ministerio de energía y minas muestra la información genérica de este potencial que se incluye en el siguiente cuadro.

Tabla (1-1) potencial de biomasa

<b>Potencial Energético Recuperable</b>	<b>Periodo</b>	<b>Energía (TEP)</b>	<b>Energía (GWh)</b>
residuos agrícolas	1995 - 1999	$53 \cdot 10^3$	616.39
residuos pecuarios	1995 - 1999	$12 \cdot 10^3$	139.56
residuos agroindustriales	1998	$117 \cdot 10^3$	1360.71

Fuente: (Rafael L. Espinoza P. 2005)

La energía TEP es una unidad de energía (tonelada equivalente de petróleo). Su valor equivale a la energía que hay en una tonelada de petróleo y como puede variar según la composición de este.

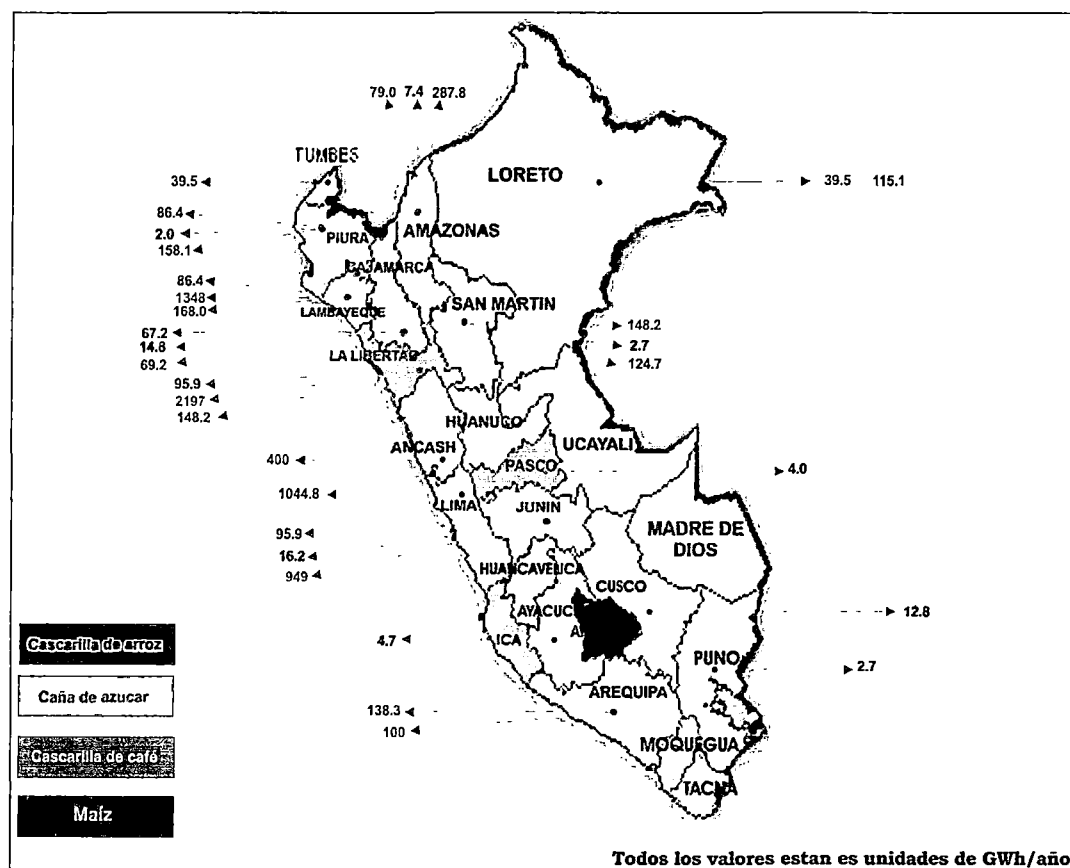


Figura (1-4) mapa del potencial de biomasa en el Perú

Fuente: (CER UNI 2005)

### 1.1.5.2. POTENCIAL DE BIOMASA VEGETAL.

El mapa elaborado contiene valores de potencial de energía correspondientes a residuos de maíz, de arroz, de café y de la caña de azúcar, en calidad de potencial parcial de la biomasa en el Perú. Por lo tanto su uso debe restringirse a esta característica. Es más, los valores mostrados han sido calculados sobre la base del integro de los residuos producidos en todo el Perú que no representa, necesariamente, la cantidad de biomasa con factibilidad de ser transformada en energía. La suma nacional se presenta en el cuadro que sigue:



**Tabla (1-2) Potencial de biomasa vegetal**

Producto Vegetal	Prod. Residuos t/año	poder calorífico KJ/Kg	energía obtenible GWh/año
cascarilla de café	14513	16733	67.5
cascarilla de arroz	212400	16746	988
bagazo	2387500	7530	4993.9
residuo de maíz	550000	6280	959.4
		<b>Total</b>	<b>7008.8</b>

Fuente: (Rafael L. Espinoza P. 2005)

### 1.1.5.3. POTENCIAL DE LA BIOMASA ANIMAL.

Con el mismo criterio anterior se ha calculado el potencial de la biomasa animal considerando el método bioquímico de la fermentación anaerobia, el resultado es el siguiente.

**Tabla (1-3) potencial de biomasa animal**

Animales	Cabezas de ganado miles	Prod. Total estierc. Kg/día	Biogás total m <sup>3</sup> /día	Energía producible MWh/día	Energía producible GWh/año
vacuno	4927	78832000	2916784	16042.312	5855.4
porcino	2819	6483700	389022	2139.621	781
caprino	2024	3643200	182160	1001.88	365.7
Ovino	14686	26434800	1321740	7269.57	2653.4
Alpaca	3035	1669250	0	0	0
Llama	1156	1156000	0	0	0
				<b>Total</b>	<b>9655.5</b>

Fuente: (Rafael L. Espinoza P. 2005)

#### **1.1.5.4. BIOCOMBUSTIBLES.**

Este tipo de combustibles provienen de la biomasa y toman una forma química determinada, como el alcohol etílico o etanol, metanol, biodiesel y combustibles gaseosos tales como hidrogeno y metano. Los biocombustibles se utilizan principalmente como fuente de energía de automotores y para producir energía eléctrica. El biodiesel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales que puede ser utilizado tanto como sustituto del diesel derivado de petróleo o como aditivo del mismo. Su utilización no requiere cambios en el motor, debido a sus propiedades fisicoquímicas muy similares a las del diesel de petróleo; reduce las emisiones de SO<sub>2</sub> y CO, entre otros gases contaminantes, cuando se usa como aditivo o como combustible sustituto del diesel.

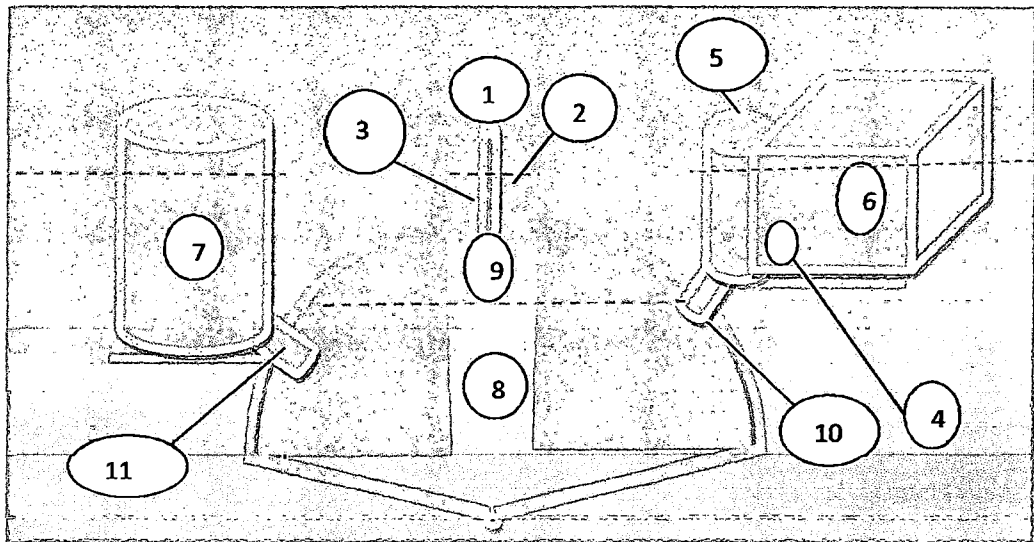
#### **1.2. DIGESTOR.**

El digestor, es un sistema que facilita el crecimiento y la proliferación de un grupo de bacterias anaerobias metanogénicas, los cuales descomponen la materia orgánica obteniendo como resultado final una mezcla de gases (metano y dióxido de carbono) conocido genéricamente como biogás. Así mismo en el proceso final de la descomposición se obtienen dos tipos de abono, conocidos como biol (líquido) y bioabono (sólido) los cuales son ricos en nutrientes y materia orgánica estabilizada.

##### **1.2.1. PARTES DE UN BIODIGESTOR**

En el mundo se han desarrollado una serie de experiencias que no tuvieron resultados de gran éxito con este tipo de digestores en especial en zonas andinas.

Un digestor consta de las siguientes partes:



**Figura. (1-6): Partes del Biodigestor modelo chino mejorado**  
Fuente: (*propia*)

Dónde:

1. Tubería de salida del gas.
2. Sello de agua.
3. Tapa móvil.
4. Entrada del material.
5. Caja de control de carga.
6. Pozo de carga.
7. Depósito del efluente o biol.
8. Materia orgánica.
9. Almacenamiento de gas.
10. Tubería de entrada.
11. Tubería de salida del efluente.

### **1.2.2. CLASIFICACION DE LOS BIODIGESTORES.**

De acuerdo a la frecuencia de cargado, los sistemas de biodigestion se pueden clasificar en: *batch* o *discontinuos*, *semicontinuos* y *continuos*.

## **SISTEMAS BATCH O DISCONTINUOS.**

Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que haya dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante.

## **SISTEMAS SEMICONTINUOS**

Es el tipo de digestor más usado en el medio rural, cuando se trata de digestores pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino.

Entre los de tipo hindú existen varios diseños, pero en general son verticales y enterrados. 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 biogás si se mantienen las condiciones de operación. Este tipo de digestores presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 a 1 m<sup>3</sup> de volumen de gas por volumen de digestor.

En lo que respecta a los biodigestores tipo chino, estos son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados. En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el gas 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 hasta más de 100 cm de columna de agua. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0.1 a 0.4 m<sup>3</sup> de biogás/m<sup>3</sup> de digestor.

## **SISTEMAS CONTINUOS**

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas residuales. 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 industriales, donde se generan una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales.

### **1.2.3. TIPOS DE BIODIGESTORES**

#### **POZOS SÉPTICOS**

Es el más antiguo y sencillo digestor anaerobio que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de allí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaeróbica, para el uso doméstico.

Para la correcta operación de estos pozos es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en él, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias, razón por la que los pozos se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación.

Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con Polímetros a esta agua a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaeróbica.

#### **DIGESTOR DEL DOMO FLOTANTE.**

La planta con domo flotante se compone de un digestor en forma de bóveda esférica (o cilíndrica) y un depósito de gas móvil en forma de campana flotante. La campana puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua cilíndrico.

El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en la campana misma. Para evitar que la campana se ladee, se construye un soporte de hierro como guía.

La campana además de subir y bajar puede girar, así puede mover la capa que eventualmente pueda flotar en la superficie de la carga de fermentación.

Para la construcción del digestor, se usa comúnmente ladrillos, cemento, arena y grava, para la campana flotante, lamina de acero.

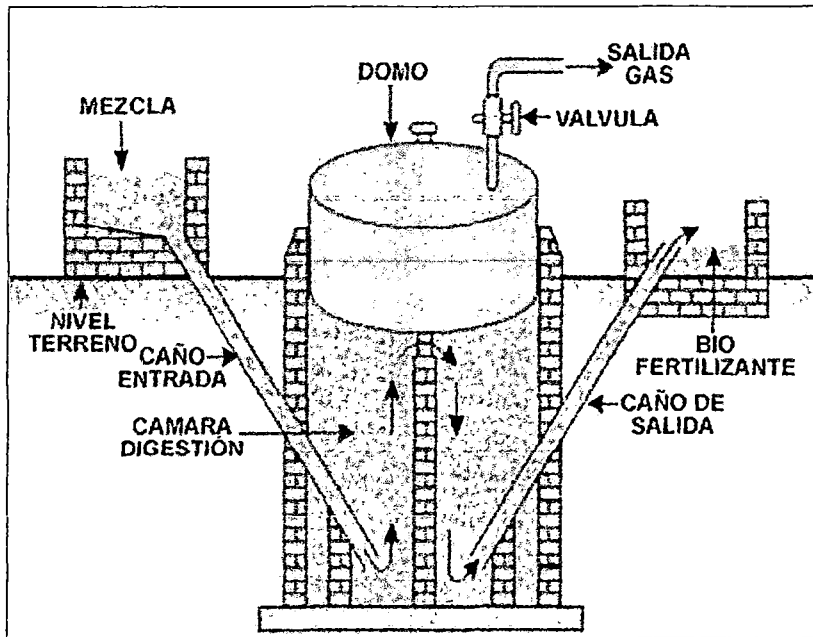


Figura (1-7) Digestor de domo flotante  
Fuente: (ICAITI 1983)

**VENTAJAS:**

- Manejo fácil.
- Presión del gas constante.
- El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana.

**DESVENTAJAS:**

- Alto costo de construcción de la campana.
- En la mayoría de los casos, la campana es metálica y por eso sujeta a corrosión.
- Más costos de mantenimiento causado por trabajo de pintura. (Proyecto CVC GTZ OEKOTOP 1987).

## DIGESTOR DE DOMO FIJO.

Este reactor consiste en una cámara de gas-firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y “fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y extremos nivelados. Hay un tapón de la inspección a la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo y cambia de sitio algunos de los volúmenes del digestor en la cámara del efluente, con presiones en el domo entre 1 y 1.5 mm de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón para la cima hemisférica y el fondo. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de digestores se ha construido en China y ha estado funcionando correctamente (FAO, 1992) pero, desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China. Esta instalación tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a 20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático.

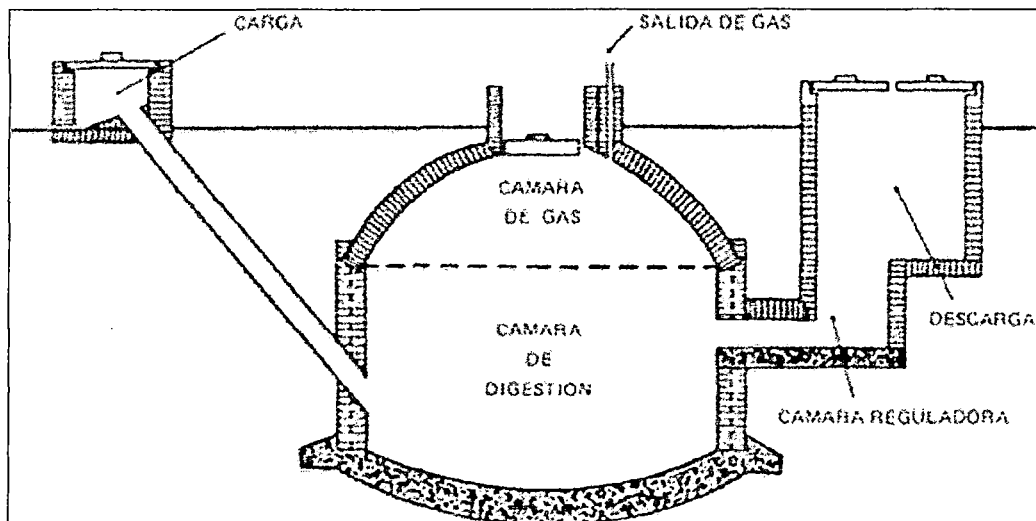


Figura. (1-8): Digestor de domo fijo modelo chino

Fuente:(ICAITI 1983)

## **BIODIGESTOR DE ESTRUCTURA FLEXIBLE**

La inversión alta que exigía construir el digestor de estructura fija resultaba una limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a ingenieros en la Provincia de Taiwán en los años sesenta (FAO, 1992) a hacer digestores de materiales flexibles más baratos. Inicialmente se usaron nylon y neopreno pero ellos demostraron ser relativamente costoso. Un desarrollo mayor en los años setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio producto llamado "el barro rojo PVC."

Esto fue reemplazado después por polietileno menos costoso que es ahora el material más comúnmente usado en América Latina, Asia y África. Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando digestores de plástico económico como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión así en otros recursos naturales.

En este digestor el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con Biomasa en fermentación; la bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma.

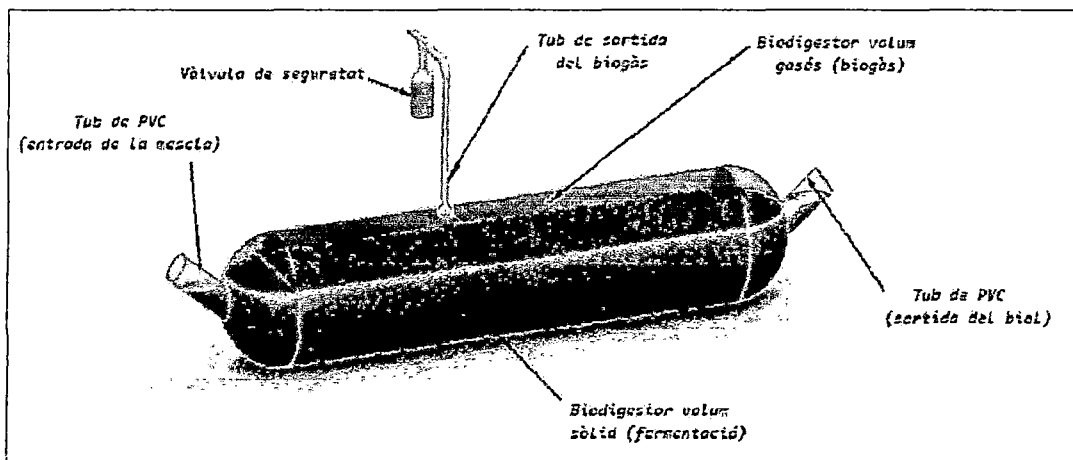


Figura. (1-9): Digestor de estructura flexible  
Fuente: (ICAITI 1983)



#### **1.2.4. EXPERIENCIAS EN EL MUNDO Y EN EL PERU**

China tiene más de 7 millones de digestores artesanales sin calefacción india más de 120 mil pequeños digestores sin calefacción en Europa Alemania es líder en digestores industriales (2,500 MW instalados al 2004) en el Perú existen aproximadamente 106 digestores (en 15 departamentos) con predominio de modelos artesanales chinos de diferentes capacidades comprendidos entre 2 a 30m<sup>3</sup>. (MINEM-2005)

Tabla (1-4) biodigestores artesanales en el Perú

<b>BIODIGESTORES EN EL PERU POR DEPARTAMENTOS</b>	
<b>DEPARTAMENTOS</b>	<b>CANTIDAD</b>
Piura	3
Cajamarca	47
Lambayeque	2
Amazonas	1
Ancash	2
Lima	7
Arequipa	18
Junín	1
Cusco	1
Madre de dios	2
Pucallpa	1
Huánuco	3
Tacna	14
Moquegua	2
Puno	2
<b>TOTAL</b>	<b>106</b>

Fuente: (Seminario Internacional; Las Energías renovables y el desarrollo de regiones rurales; Universidad nacional San Antonio Abad; Cusco / U. de Lima)

### **1.3. COMPONENTES Y PRODUCTOS DE UN DIGESTOR**

Antes de escribir la descripción de los componentes y productos de un digestor es necesario definir algunos términos fundamentales.

**LODO O LECHADA.** Es la mezcla del material orgánico disuelto en agua para ser vertidas en el digestor.

**EFLUENTE.** Es el residuo de la fermentación que es expulsada del digestor (biol, bioabono)

**TIEMPO DE RETENCION.** Es el tiempo estimado en el cual se realiza la digestión anaeróbica dando resultados los gases, metano y CO<sub>2</sub>, esto varía de acuerdo a la temperatura del medio.

#### **1.3.1. DIGESTION ANAEROBICA**

La digestión anaeróbica es un proceso mediante el cual, una gran variedad de desechos orgánicos, en un ambiente sin aire, pueden ser convertidos en un gas combustible rico en metano, llamado “biogás”, y un residuo semisólido, rico en nitrógeno, llamado “bioabono” o efluente.

Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaeróbica se desarrolla en tres etapas durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias.

En el proceso de digestión anaeróbica podemos distinguir tres etapas:

Hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis.

#### **HIDRÓLISIS.**

Consiste en la solubilización de la materia orgánica cruda. Esta materia orgánica está formada principalmente por polímeros de hidratos de carbono, proteínas y lípidos y ocurre por la acción de exoenzimas secretadas por las bacterias anaeróbicas y facultativas. De esta etapa se obtienen productos orgánicos simples y solubles.

Para algunos tipos de sustratos, esta es la etapa limitante del proceso ya que hay algunos materiales no digeribles o que se digieren demasiado lento.

Las especies anaeróbicas presentes en esta etapa se pueden dividir en dos clases:

Las que actúan en condiciones óptimas cuando la temperatura del proceso es de 20°C a 35°C encontrando a las bacteroides y eurobacterium entre otros.

Cuando la temperatura se eleva entre los 50°C y 60°C las bacterias que actúan forman esporas y pertenecen al género Clostridium.

### **ACIDOGÉNESIS.**

En esta segunda etapa los productos solubles de la etapa anterior son convertidos en ácidos orgánicos volátiles de cadena corta y alcoholes producto de la acción de endoenzimas, algunos de los ácidos grasos más importantes que se forman son: ácido acético, propiónico y butírico. Sólo el ácido acético formado da origen al 70% de la producción de metano.

Las bacterias acetogénicas son las encargadas de la degradación de los ácidos grasos de cadena larga (productos de la primera etapa) como los ácidos palmíticos y esteáricos para su posterior transformación a ácido acético

### **METANOGÉNESIS.**

En esta etapa los ácidos orgánicos simples producidos en la etapa anterior son convertidos, por acción de las bacterias metanogénicas, en sustrato para la descomposición, estabilización y producción de metano y anhídrido carbónico.

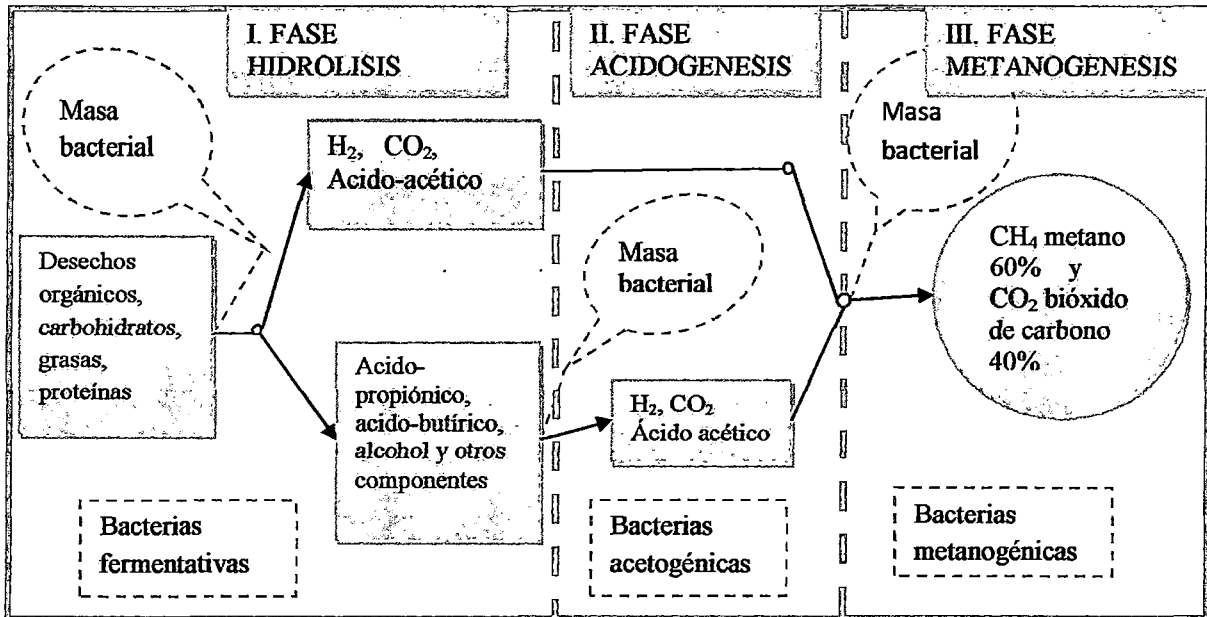


Figura (1-10) Fases de la fermentación anaeróbica de la biomasa.  
Fuente: (Proyecto CVC GTZ OEKOTOP 1987)

### 1.3.2. BIOGAS Y SUS CARACTERISTICAS

El término biogás se refiere al gas metano, producido mediante la digestión anaerobia de los desperdicios de granja u otros tipos de biomasa, tales como estiércol de animales, excreta humano, residuos de cosechas, etc.

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de 700° C, La temperatura de la llama alcanza unos 870°

Tabla (1-5): Componentes de biogás y formula química

componentes	Fórmula Química	(%)
Metano	CH <sub>4</sub>	60-70
Dióxido de Carbónico	CO <sub>2</sub>	30-40
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1
Nitrógeno	N	0,5
Monóxido de Carbono	CO	0,1
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0,1
Ácido Sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0,1

Fuente: *(Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, 1980)*

El contenido de metano depende de la temperatura de fermentación. Con bajas temperatura de fermentación se obtiene un alto porcentaje de gas metano, pero las cantidades de gas son menores.

El metano, principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características de combustible al mismo.

### **1.3.3. BIOABONO**

Es un material completamente descompuesto anaeróbicamente que queda en la parte inferior del biodigestor que se descarga una vez la carga haya copado gran parte del biodigestor, que sirve como abono para utilizar directamente en el campo de cultivo.

### **1.3.4. EL BIOL**

Es un líquido conocido como Bio-Fertilizante (inodoro) que es expulsado del biodigestor como producto de la descomposición anaeróbica que contiene: 20% de Proteínas, 4% de NPK solubles, 14% de Nitrógeno y 20% de Potasio. *(Monterrey N.L México: ING. JAIME LUIS SALDAÑA MÉNDEZ 2006)*

## **1.4. PARAMETROS DE UN DIGESTOR**

### **1.4.1. DENSIDAD**

Se define como la masa de un material por unidad de volumen y se expresa en  $\text{kg/m}^3$ . Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

### **1.4.2. PH**

El pH en el digestor es la función de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el gas, de la concentración de los ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima.

El rango de pH óptimo es de 6.6 a 7.6. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y el acetato tienden a disminuir el pH del sustrato. (GTZ CVC)

Si las bacterias metanogénicas no alcanzan a convertir rápidamente los AGV a medida que lo producen las bacterias acetogénicas, estos se acumulan y disminuyen el pH en el digestor. Sin embargo, el equilibrio  $\text{CO}_2$ -bicarbonato opone resistencia al cambio de pH.

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el digestor.

El primero es parar la alimentación del digestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias fermentativas y se reduce la producción de los AGV.

Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del digestor pero en pocas cantidades, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para aumentar el pH, como el agua con cal. Las cenizas de soda (carbonato de sodio) constituyen una variante más costosa, pero previenen la precipitación del carbonato de calcio. Los requerimientos de

buffer varían según el residual, los sistemas de operación y tipos de operación. (Pohland y Suidon (1978).)

### **1.4.3. TEMPERATURA**

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura.

Para los digestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos.

Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas y esto es crítico para la vida de las células.

Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen del termo-estabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el digestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas.

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales:

**Mesofílico** (de 20 a 45 °C).

**Termofílico** (por encima de 45 °C).

**Psicrofílico** (ocurre entre los 10 y 25 °C).

La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la Mesofílico, así que los biodigestores Termofílico pueden ser la mitad en volumen que los Mesofílico, manteniendo su eficiencia general.

La temperatura es uno de los factores de mucha relevancia en el proceso anaeróbico, ya que define las zonas en donde se pueda llevar el proceso ya sea por latitud o altura, también ella es vista como el factor en potencia para aumentar la eficiencia de los sistemas, principalmente cuando se trata de saneamiento, la temperatura afecta el tiempo de retención para la digestión y degradación del material orgánico dentro del

digestor, la degradación se incrementa en forma geométrica con los aumentos de temperatura de trabajo, además se aumenta la producción de gas.

Una forma de aumentar la eficiencia del sistema es calentando el efluente, para ello se hace circular agua caliente por un serpentín colocado dentro de la cámara de fermentación, también se utiliza bujías de calentamiento, pero tienen el inconveniente de que el calor no se distribuye uniformemente en el efluente. Finalmente el ciclo digestivo al ser más rápido a altas temperaturas determina que la capacidad del digestor debe ser mayor a menores temperaturas que a altas temperaturas. (GTZ OEKOTOP1987)

Tabla (1- 6): Rangos de temperatura y tiempo de retención

FERMENTACION	MINIMO	OPTIMO	MAXIMO	TIEMPO DE RETENCION
Psicrofilico	4-10 °C	15-18°C	25-30°C	Arriba de 100 días
Mesofilico	15-20 °C	28-33°C	35-45°C	30-60 días
Termofilico	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: (Proyecto CVC GTZ OEKOTOP 1987)

#### **1.4.4. TOXICIDAD**

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta.

En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante.

Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al biodigestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas. Se reportó la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos.



## **1.5. RELACION CARBONO – NITROGENO Y TIEMPO DE RETENCION**

### **1.5.1. RELACION CARBONO – NITROGENO**

Esta relación es el número obtenido al dividir la cantidad de carbono entre la cantidad de nitrógeno presentes en un material dado. Por lo general se debe trabajar con materiales que tengan relaciones C/N en el intervalo de 15 a 30. El uso de materiales con relaciones más altas implica el riesgo de que el biodigestor no funcione correctamente o de que su producción sea muy baja. Tanto el carbono como el nitrógeno son indispensables para el proceso fermentativo dentro del digestor, pero su adecuada proporción influye en el correcto funcionamiento del proceso de fermentación. Referencia (*Energía desarrollo y vida EDEVI 2002*).

Tabla (1- 7): Relación carbono- nitrógeno de diferentes materiales

SUSTRATO	C/N
Orina	0,8
excreta de vacuno	10 - 20
excreta de porcino	9 – 13
excreta de gallina	5 – 8
excreta de caprino/ovino	30
excreta de humanos	8
Paja de cereales	80 – 140
Paja de maíz	30 – 65
Gras fresco	12
Desperdicios de verduras	35

Fuente: (*seminario sobre "biodigestores" - ICA 1986*)

### **1.5.2. TIEMPO DE RETENCION**

El tiempo de retención es el número de días que una cantidad dada de carga permanece dentro del digestor, este tiempo de retención varía según el caso porque depende de la temperatura ambiente, del tipo de sustrato usado y de la cantidad de sustrato disponible

para la mezcla por día. El tiempo de retención para una temperatura media baja es de 60 a 65 días. (*Proyecto CVC GTZ OEKOTOP 1987*)

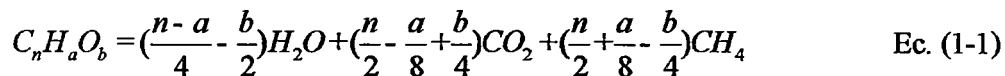
## 1.6. PROCESO DE FORMACION DE METANO

Según su composición química, las sustancias que entran en la descomposición de las materias orgánicas que contienen hidratos de carbono, se encuentran más o menos polimerizadas. El tiempo que lleva la degradación de esa materia, es función del grado de polimericen, siendo su duración menor cuanto menor es este. Así, sustancias poco polimerizadas como los azúcares, los almidones y aun las hemicelulosas, son susceptibles de descomponerse rápidamente, en condiciones anaerobias, produciendo ácidos orgánicos del tipo del ácido butírico.

La acumulación rápida de estos ácidos en el medio, provoca su esterilización, no pudiéndose producir ninguna otra fermentación a partir de ese momento.

Por el contrario, las sustancias fuertemente polimerizadas se descomponen en forma lenta suficiente, como para que los ácidos formados se descomponen a su vez, a medida que se van produciendo. De ambas puede obtener metano en cantidades importantes y en forma continua.

Las ecuaciones estequiométricas de Buswell son aplicables a la formación de metano de todos los sustratos, según Yongfu *et al.* (1989):



Donde n, a y b son la cantidad de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno contenidos en las moléculas de materia orgánica degradadas. Como ejemplo, para la molécula de almidón (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), la fórmula es como sigue:



Esto quiere decir que la fermentación anaerobia de almidón resulta en un 50% de metano.

## **1.7. INVERNADEROS.**

Un invernadero, es un sistema muy complejo, destinado a crear un microclima (efecto invernadero), que hace posible mejorar la inercia térmica en regiones donde las condiciones ambientales no lo permiten.

Un material ideal para la cobertura de los invernaderos es aquel que reúne las siguientes características.

- a) Dejar pasar durante el día la radiación solar para calentar el suelo y paredes del invernadero e impedir por la noche que salga el calor almacenado en la misma.
- b) Estar dotado de protección frente a la radiación ultravioleta, para evitar que se deteriore rápidamente.

El polietileno térmico y estabilizado es el plástico más utilizado porque evita que el invernadero se enfríe y tiene protección contra la radiación UV, y es más económico que el vidrio. (P. Zanabria -2001)

La interacción de factores internos y externos de un invernadero, determina el balance térmico del invernadero. En base a este balance puede determinarse la aportación energética necesaria para asegurar el nivel térmico a mantener bajo el invernadero. Por otro lado el análisis de los diferentes términos, permite diseñar sistemas que mejoren la inercia térmica del invernadero.

## **1.8. ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PLANTAS DE BIOGAS**

V. V. N. Kishore (1989) desarrolla una metodología para estudiar el comportamiento térmico, los procesos de transferencia de calor y establecer las condiciones óptimas, para el manejo y producción en una planta de biogás, para este análisis toma como modelo de referencia un digestor "Indio" cilíndrico.

Por su versatilidad, este modelo se ha adecuado para estudiar el prototipo desarrollado en el presente trabajo, esquemáticamente se muestra en la Fig. (1-11a y 1-11b) los diversos componentes de flujo de calor así como la red de resistencias. Donde se muestra un volumen de lechada de temperatura  $T$ , encima de la superficie y debajo del domo existe un volumen donde eventualmente se almacenará el gas producido cuya temperatura es  $T_d$ .

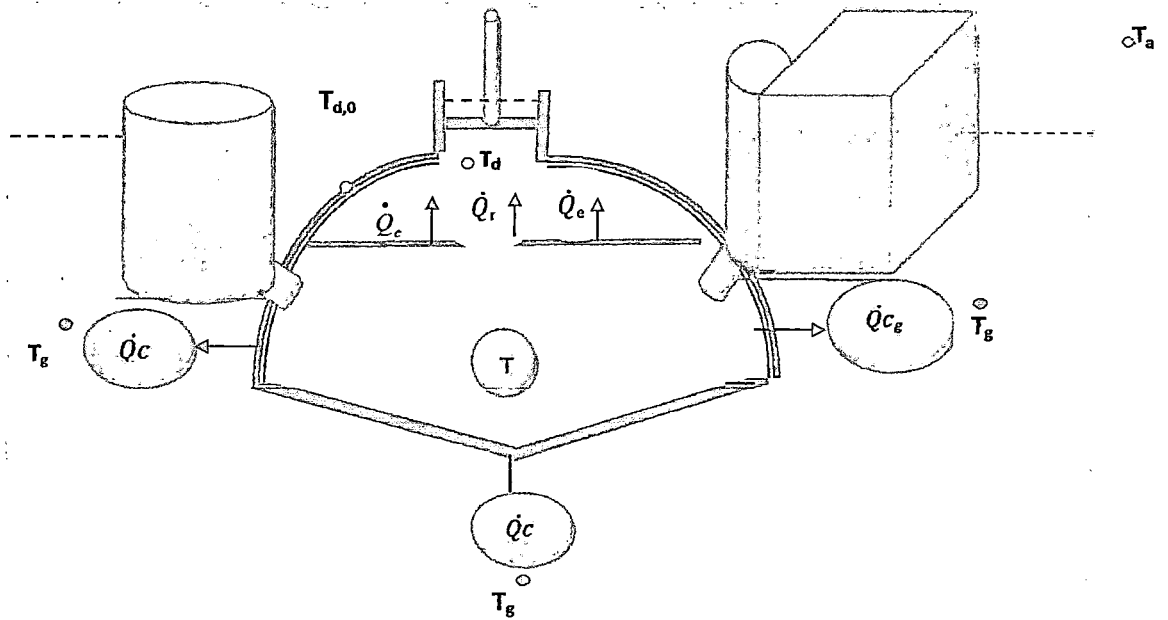


Figura (1-11a): Diversos componentes de flujo de calor en el biodigestor

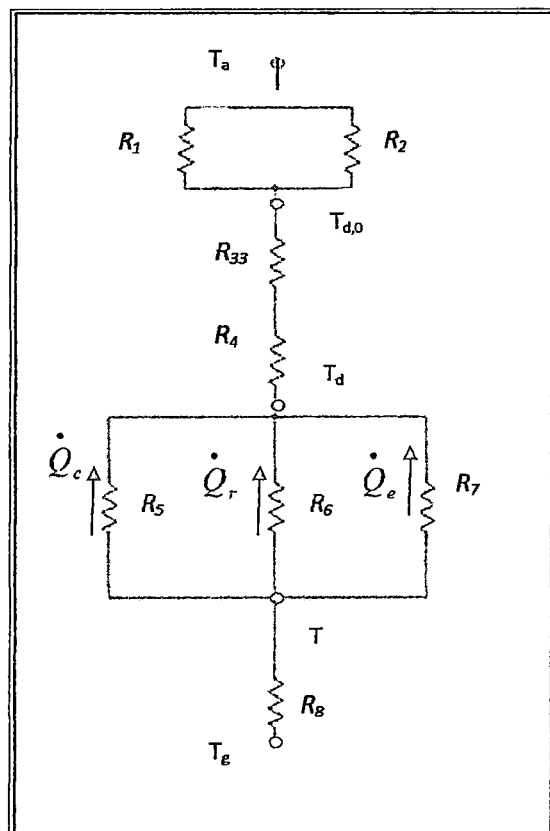


Figura (1-11b): Red de resistencias en el biodigestor

En este análisis se emplean los siguientes parámetros y notaciones:

- A: El área de superficie de la lechada dentro del digestor ( $m^2$ ).  
C<sub>p</sub>: El calor específico de lechada digestiva ( $J Kg^{-1} °C^{-1}$ ).  
G: La capacidad de la planta de biogás ( $m^3 dia^{-1}$ ).  
h: Coeficiente de transferencia de calor ( $W m^2K^{-1}$ ).  
k: Conductividad térmica ( $W m^{-1}K^{-1}$ ).  
l: Distancia desde el fondo del digestor hasta el nivel del agua (m).  
 $\dot{m}$ : Tasa de flujo de masa de la lechada a través del digestor (Kg/s).  
p: Presión de vapor de agua (mmH<sub>2</sub>O).  
P: Perímetro del digestor. (m).  
 $\dot{Q}$ : Razón de transferencia de calor.  
T: Temperatura. (°C).  
U: Transmitancia térmica. ( $W/m^2K$ ).  
(UA)<sub>eff</sub>: Transmitancia térmica efectiva ( $W/m^2K$ ).

La ecuación general de balance de energía luego puede escribirse como:

$$\rho V C_p \left( \frac{dT}{dt} \right) = \dot{m} C_p (T_m - T) - \dot{Q}_L + \dot{Q}_{ext} \quad \text{Ec. (1-3)}$$

Dónde:

ρ: Densidad del lodo en el interior del digestor.

V: Volumen del lodo en el interior del digestor

C<sub>p</sub>: Calor específico del lodo

T: Temperatura del lodo dentro del digestor

t: Tiempo

T<sub>m</sub>: Temperatura de mezcla en la entrada del lodo

$\dot{Q}_L$ : La tasa de pérdidas totales de calor de la planta de biogás para afueras

$\dot{Q}_{Ext}$ : El aporte externo de calor para el digestor

Para las condiciones locales para una temperatura constante, la derivada en la ecuación (1-3) será igual al cero. Para el caso de que ninguna parte exterior este calentándose, ecuación (1-3) puede escribirse como.

$$\dot{m}C_p(T_m - T) = \dot{Q}_L \quad \text{Ec. (1-4)}$$

$\dot{Q}_L$  Constará de varios términos que son demostrados esquemáticamente dentro de la fig. (1-11a)

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e + \dot{Q}_g \quad \text{Ec. (1-5)}$$

Dónde:

$\dot{Q}_c, \dot{Q}_r$  y  $\dot{Q}_e$  Son las pérdidas de calor por convección, radiación y evaporación a través del fondo y los lados del digestor.

Antes de evaluar por separado, cada componente de pérdida de calor, partimos de la suposición de que el área de la superficie de la lechada es igual al área de la superficie interior del domo, la temperatura T de la lechada es uniforme y la temperatura del lado interior del domo,  $T_d$ , es también uniforme. En una situación verdadera, el domo es curvado y por lo tanto las áreas de intercambio de calor son diferentes. Las anteriormente citadas suposiciones se hacen para simplificar el tratamiento de pérdidas de calor.

La pérdida de calor por convección está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_c = Ah_c(T - T_d) \quad \text{Ec. (1-6)}$$

Dónde:

$h_c$ : coeficiente de transferencia de calor debido a la convección natural

A: área de superficie de la lechada

La pérdida de calor por radiación está dada por: la siguiente relación:

$$\dot{Q}_r = Ah_r(T - T_d) \quad \text{Ec. (1-7)}$$

$h_r$ : coeficiente de pérdida de calor por radiación, es una función de T y  $T_d$ .

La pérdida de calor debido a la evaporación del líquido de la lechada está dada por la relación siguiente:

$$\dot{Q}_e = 2.2Ah_c[p(T) - p(T_d)] \quad \text{Ec. (1-8)}$$

Dónde:

P: presión de vapor de agua en mm de mercurio en la temperatura correspondiente.

Las ecuaciones (1-6), (1-7) y (1-8) fueron desarrolladas originalmente por Dunkle, 1961. Las ecuaciones de Dunkle, involucran funciones no lineales de temperatura, habían sido simplificadas para estudiar calentadores de agua de tipo techo (Maru et al., 1986).

La ecuación (1-8), es válida para mezclas del vapor de agua, de aire y podemos emplearlas para mezclas de biogás-agua-vapor. El valor de P está dado por la ecuación de Antoine.

$$P(T) = \exp\left[18.403 - \frac{3885}{T+230}\right] \quad \text{Ec. (1-9)}$$

Se espera que la diferencia entre T y  $T_d$  sea pequeña, la siguiente aproximación lineal está hecha:

$$P(T) - P(T_d) = \left(\frac{dp}{dT}\right)(T - T_d) \quad \text{Ec. (1-10)}$$

La derivada en la anterior ecuación, fácilmente puede ser obtenida de la ecuación (1-9).

Las pérdidas de calor de la superficie pueden ser resumidas como sigue:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{L,s} &= \dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e \\ &= A[h_c(T - T_d) + h_r(T - T_d) + 2.2h_c\left(\frac{dp}{dT}\right)(T - T_d)] \\ \dot{Q}_{L,s} &= A[h_c + h_r + 2.2h_c\left(\frac{dp}{dT}\right)](T - T_d)\end{aligned}\quad \text{Ec. (1-11)}$$

Como se ha señalado uno de los problemas en la operación de pequeñas plantas de biogás en zonas andinas es la baja o nula producción de gas, sobre todo en el invierno como consecuencia de las bajas temperaturas medias ambientales. Según los estudios de *V. V. N. KISHORE (1989)*, en digestores cilíndricos pequeños familiares en el norte de la India. Para aumentar la temperatura en el digestor se sugiere:

- a) Mezclar la materia orgánica con agua caliente.
- b) Encerrar el digestor dentro de un invernadero solar.

Para validar estas sugerencias es importante estudiar los mecanismos de intercambio de calor en una planta de biogás, para efectos de este análisis a diferencia del indicado. Tomaremos el modelo esférico materia del presente trabajo.

Para el balance térmico es necesario tomar en cuenta las siguientes hipótesis:

- I. La tasa de flujo de masa del gas, proveniente desde el digestor es insignificante comparado con la del lodo o lechada.
- II. La lechada digestiva está en una temperatura completamente uniforme
- III. El calor generado (absorbido) de las reacciones bioquímicas diversas ocurrido en el digestor es insignificante; (Prased & Sathyanarayan, Sobel & Muck. 1983)
- IV. Las pérdidas de calor de la lechada en el exterior son insignificantes.

Para simplificar nuestro análisis consideraremos los siguientes aspectos:

- La base del digestor es plana, circular de área  $\pi R^2$ .
- La mezcla o lechada ha sido llenado hasta una altura de  $R/2$  y el área de esta también es  $\pi R^2$ . (superficie lateral)
- El domo o cúpula sobre la mezcla es de forma esférica de área  $\pi R^2$ .
- La superficie del digestor no está enterrada.



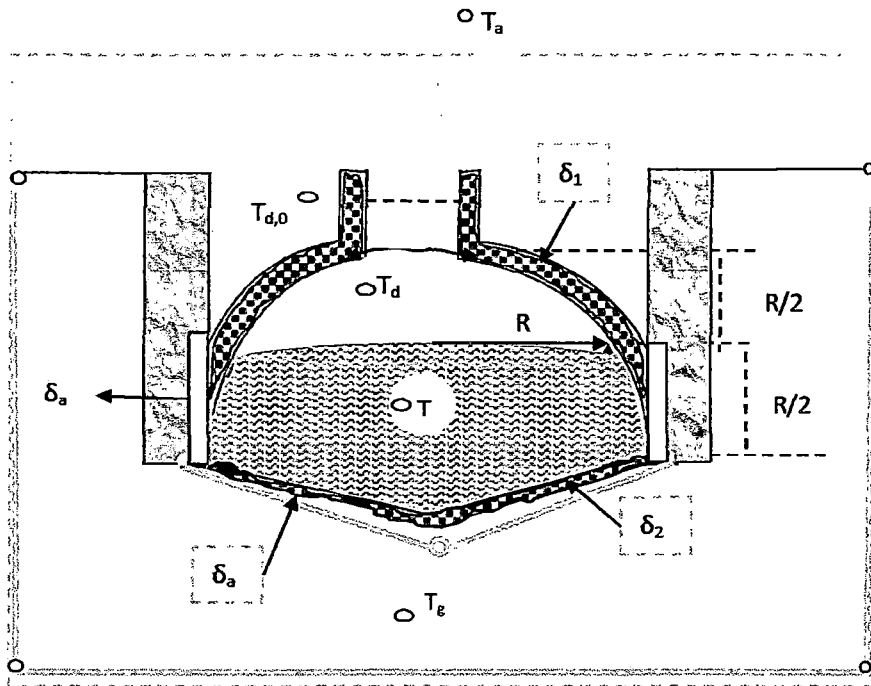


Figura (1-12). Consideraciones para la evaluación del digestor de domo esférico

Fuente:(propia)

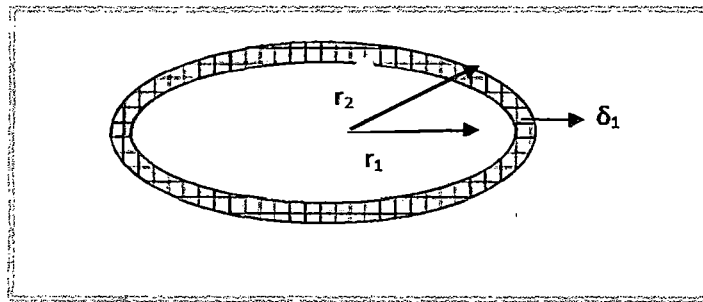


Figura (1-13). Vista en corte del domo esférico

Fuente:(propia)

De las figuras (1-12) y (1-13) se tiene:

- Área de la esfera =  $4\pi R^2$
- $\frac{1}{2}$  esfera =  $2\pi R^2$
- $\frac{1}{4}$  esfera =  $\pi R^2$
- $\delta_1$  : Espesor del domo (ladrillo)

- $k_1$ : Conductividad térmica del ladrillo.
- $\delta_2$ : Espesor de la placa de fondo.
- $k_2$ : Conductividad térmica del concreto.
- $\delta_a$ : Espesor del aislante.
- $k_a$ : Conductividad térmica del aislante.
- $r_1$ : Radio interior de la semiesfera.
- $r_2$ : Radio exterior de la semiesfera.

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = R \\ r_2 = R + \delta_1 \end{array} \right\} r_2 - r_1 = \delta_1$$

Las pérdidas conductivos de calor a través del domo esférico desde el interior a una temperatura  $T_d$  a la superficie a una temperatura  $T_{d,o}$  es:

$$\dot{Q}_{L,s} = \frac{2\pi k_1 r_1 r_2 (T_d - T_{d,o})}{\delta_1} \quad \text{Ec. (1-12)}$$

Las pérdidas de calor desde la superficie del domo esférico a la atmosfera son de naturaleza convectiva y radiativa, estas a la vez serán iguales por el tratamiento de un sistema liquido - vapor o gas en un sistema aislado. (KISHORE)

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{T_{superficie} - T_{alrededor}}{1/h_{rad} A_s}, \quad A_s = \pi R^2$$

$$\dot{Q}_{conv.} = \frac{T_{superficie} - T_{alrededor}}{1/h_{conv.} A_s}$$

Entonces la pérdida total de calor desde la superficie se define por la sumatoria de las pérdidas por convección y radiación:

$$\dot{Q}_{L,S} = \dot{Q}_{conv.} + \dot{Q}_{rad.} = A(h_{c,0} + h_{r,0})(T_{d,0} - T_a) \quad \text{Ec. (1-13)}$$

Dónde:

$h_{r,0}$  ,  $h_{c,0}$ : coeficientes de pérdidas de calor radiativo y convectivo del domo a la atmosfera.

$T_{d,0}$ : temperatura en el interior del invernadero.

La magnitud de  $h_{r,0}$  viene a ser la misma que la de  $h_r$ , pero  $h_{c,0}$  debe ser considerablemente igual que  $h_c$  por tratarse de flujos de calor a la atmosfera.

Para este efecto se tiene  $h_c = 4.4\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-2}$  y  $h_r = 4.65\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,  $h_r$ , es válido para rangos de temperatura encontradas en el digestor para una emisividad de 0.9 (Kishore, 1980)

$$h_{c,0} = 5.7 + 3.8v \quad \text{Ec. (1-14)}$$

Dónde:  $v$  = velocidad del viento

De las ecuaciones (1-11), (1-12), (1-13) pueden combinarse y se obtiene:

$$\dot{Q}_{L,S} = UA(T - T_a) \quad \text{Ec. (1-15)}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c + h_r + 2.2h_c\left(\frac{dp}{dT}\right)} + \frac{\delta_1}{4\pi k_1 r_1 r_2} + \frac{1}{h_{c,0} + h_{r,0}} \quad \text{Ec. (1-16)}$$

De la figura (1-11a).

$$\dot{Q}_{cg} = \dot{Q}_{cgf} + \dot{Q}_{cgl} = \frac{k_2}{\delta_2} A(T - T_g) + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} (T - T_g),$$

Dónde:

$$\dot{Q}_{cgf} = \frac{k_2}{\delta_2} A(T - T_g), \quad \dot{Q}_{cgl} = \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} (T - T_g)$$

(Usando el área de  $\frac{1}{4}$  de esfera)

$$\dot{Q}_{cg} = \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) (T - T_g) \quad \text{Ec. (1-17)}$$

$\dot{Q}_{cfl}$  : pérdidas de calor por conducción en el fondo del digestor.

$\dot{Q}_{cgl}$  : pérdidas de calor por conducción en los laterales del digestor.

$\dot{Q}_{cg}$  : pérdidas de calor por conducción en la base y paredes del digestor.

Las pérdidas totales de calor desde el digestor están determinados sumando las ecuaciones (1-5) y (1-17):

$$\dot{Q}_L = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) \quad \text{Ec. (1-18)}$$

Comparando con la ecuación (1-4) se tiene:

SIN CALENTAMIENTO EXTERNO  $\dot{Q}_{ext} = 0$

$$\dot{m} C_p (T_m - T) = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) \quad \text{Ec. (1-19)}$$

CON CALENTAMIENTO EXTERNO

$$\dot{Q}_{ext} = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) - \dot{m} C_p (T_m - T) \quad \text{Ec. (1-20)}$$

Despejando T de la ecuación (1-19) podemos escribir la siguiente relación.

$$T = aT_m + bT_a + cT_g = T_e \quad \text{Ec. (1-21)}$$

T = T<sub>e</sub>. Temperatura de equilibrio, resultante al mezclar agua caliente con materia orgánica.

Dónde:

$$a = \frac{\dot{m} C_p}{(UA)_{eff}} \quad \text{Ec. (1-22)}$$

$$b = \frac{UA}{(UA)_{eff}} \quad \text{Ec. (1-23)}$$

$$c = \frac{\left( \frac{k_2 A}{d_2} + \frac{p k_1 r_1 r_2}{d_1} \right)}{(UA)_{eff}} \quad \text{Ec. (1-24)}$$

$$(UA)_{eff} = \dot{m} C_p + UA + \frac{k_2 A}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \quad \text{Ec. (1-25)}$$

La ecuación (1-19), en conjunción con las ecuaciones (1-20) y (1-25) puede escribirse como:

$$\dot{Q}_{ext.} = (UA)_{eff} (T - T_e) \quad \text{Ec. (1-26)}$$

De la ecuación (1-10) podemos despejar la siguiente expresión para utilizar con facilidad.

$$\left( \frac{dp}{dT} \right) = \frac{p(T) - p(T_d)}{T - T_d} \quad \text{Ec. (1-27)}$$

Para efectos de análisis y evaluación, a continuación se presentan algunos de estos valores:

---

Ec. (1-27): *Análisis de transferencia de calor en biodigestores (V.V.N. KISHORE).*

Tabla. (1-8): parámetros de transferencia de calor

PARÁMETROS	VALORES
Conductividad térmica del ladrillo $k_1$	0.49W/mk
Conductividad térmica del concreto $k_2$	1.40W/mk
Flujo del material de carga $\dot{m}$	89kg/día
Coefficiente de transferencia de calor por convección $h_c$	4.4 W/m <sup>2</sup> k
Coefficiente de transferencia de calor por radiación $h_r$	4.65W/m <sup>2</sup> k
Emisividad del domo (ladrillo-Tabla anexo) $e$	0.9
Coefficiente de transferencia de calor por convección a la atmosfera $h_{c,0}$	4.4 W/m <sup>2</sup> k
Coefficiente de transferencia de calor por radiación a la atmosfera $h_{r,0}$	4.65W/m <sup>2</sup> k
Calor específico de la lechada $C_p$	4.2kJ/kg°K

Fuente: (V.N.N. KISHORE)

Tomando en cuenta la ecuación (1-21) y remplazando los valores calculados en la tabla (1-9) se tiene:

$$T = 0.01352T_m + 0.7473T_a + 0.1891T_g \quad \text{Ec. (1-28)}$$

TABLA (1-8).  $C_p$ : calor específico de la lechada = al calor del agua (KISHORE).

Tabla. (1-9): Valores de los parámetros de transferencia de calor en el digestor

Radio interior de la semiesfera	$r_1$	1.40m
Radio exterior de la semiesfera	$r_2$	1.55m
Espesor del domo (ladrillo)	$\delta_1$	0.15m
Espesor del concreto en la base	$\delta_2$	0.25m
Espesor del aislante	$\delta_a$	0.05m
Conductividad térmica del aislante	$k_a$	0.02W/mk
Área de la semiesfera A		6.83m <sup>2</sup>
UA		255.1W/°C
$\dot{m}C_p$		4.326W/°C
$\frac{k_2 A}{\delta_2}$		38.248W/°C
$\frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1}$		22.269W/°C
$(UA)_{eff}$		319.943W/°C
a		0.01352
b		0.7473
c		0.1891

Fuente: (propia)

### 1.8.1. EFECTO DEL CALENTAMIENTO DE LA LECHADA

La temperatura de la lechada dentro del digestor es T puede ser calculado en la ecuación (1-28), nosotros asumimos que  $T_a = T_g$  y variar la temperatura en el interior del invernadero  $T_a$  como parámetro.

Ahora escribiremos la ecuación (1-28) con las condiciones dadas.

$$T = 0.01352T_m + 0.946T_a \quad \text{Ec. (1-29)}$$

Despejando  $T_m$ :

$$T_m = 73.96T - 16.71T_a$$

Haciendo el análisis para temperaturas ambientales  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$  se tiene:

$$\begin{aligned}
 T_m &= 73.96T - 167.137, \text{ para } T_a = 10^\circ\text{C} \\
 T_m &= 73.96T - 250.71, \text{ para } T_a = 15^\circ\text{C} \\
 T_m &= 73.96T - 334.274, \text{ para } T_a = 20^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \quad (*)$$

### 1.8.2. EFECTO DEL AISLAMIENTO

Los requerimientos de calentamiento del digestor definitivamente deberían ser reducidos, aislando las diferentes partes del digestor. Los efectos de calentamiento del domo o cúpula pueden estudiarse adicionando un término  $\frac{\delta_a}{k_a}$  a la ecuación (1-18).

Correspondiente al aislante con un espesor de  $\delta_a = 5\text{cm}$  y  $k_a = 0,02\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ .

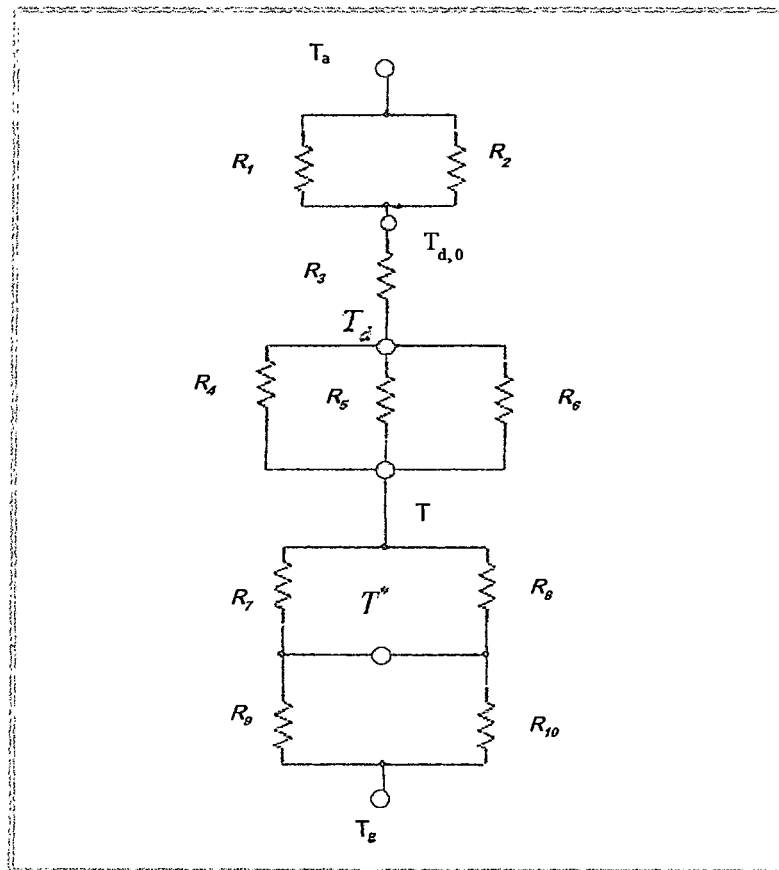


Figura. (1-14). Análisis térmico del digestor con aislamiento



De la ecuación (1-18) para este efecto, tomando en cuenta el aislamiento y considerando  $T = T^* = T_a$  se tiene:

$$\dot{Q}_{L,a} = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) + (T - T_g) \left( \frac{k_a \pi R^2}{\delta_a} + \frac{\pi k_a r_1 r_2}{\delta_a} \right)$$

Ec. (1-30)

Dónde:

$T^*$  es la temperatura en el concreto de la base del biodigestor

Ahora reemplazando la ecuación (1 - 30) en la ecuación (1-4) se tiene:

$$\dot{m} C_p (T_m - T) = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) + (T - T_g) \left( \frac{k_a \pi R^2}{\delta_a} + \frac{\pi k_a r_1 r_2}{\delta_a} \right)$$

Ec. (1-31)

Para el caso con calentamiento externo tenemos:

$$\dot{Q}_{ext} = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left[ \left( \frac{k_2}{\delta_2} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \pi R^2 + \pi r_1 r_2 \left( \frac{k_1}{\delta_1} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \right] - \dot{m} C_p (T_m - T)$$

Ec. (1-32)

Despejando T de la ecuación (1-31) se puede escribir:

$$T = aT_m + bT^* + cT_g$$

Ec. (1-33)

$$a = \frac{\dot{m} C_p}{(UA)_{eff}}$$

Ec. (1-34)

$$b = \frac{UA}{(UA)_{eff}}$$

Ec. (1-35)

$$c = \frac{\left[ \left( \frac{k_2}{\delta_2} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \pi R^2 + \pi r_1 r_2 \left( \frac{k_1}{\delta_1} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \right]}{(UA)_{eff}}$$

Ec. (1-36)

$$(UA)_{eff} = \dot{m} C_p + UA + \left[ \left( \frac{k_2}{\delta_2} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \pi R^2 + \pi r_1 r_2 \left( \frac{k_1}{\delta_1} + \frac{k_a}{\delta_a} \right) \right]$$

Ec. (1-37)

Reemplazando valores se obtiene:

$$a = 0.0134$$

$$b = 0.7902$$

$$c = 0.1963$$

$$(UA)_{eff} = 322.81 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Reescribiendo la ecuación (1-33)

$$T = 0.0134T_m + 0.7902T_a + 0.1963T_g$$

Haciendo el mismo análisis que en el caso anterior  $T_a = T_g$  se tiene:

$$T = 0.0134T_m + 0.9865T_a \quad \text{Ec. (1-38)}$$

Despejando  $T_m$ :

$$T_m = 15T - 19.19 T_a$$

Lo mismo para los casos de  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$

$$\left. \begin{array}{l} T_m = 15T - 191.9, \quad \text{para } T_a = 10^\circ\text{C} \\ T_m = 15T - 287.85, \quad \text{para } T_a = 15^\circ\text{C} \\ T_m = 15T - 383.8, \quad \text{para } T_a = 20^\circ\text{C} \end{array} \right\} (**)$$

Analizando las ecuaciones (\*) y (\*\*) obtendremos el comportamiento del sistema cuando se incrementa temperaturas, caso del calentamiento de la lechada. Los análisis del sistema de la ecuaciones (\*\*) nos permitirá observar el comportamiento térmico dentro del digestor con aislamiento térmico que es el objetivo de este presente trabajo.

### **1.8.3. EFECTO DE LA CALEFACCION DEL INVERNADERO**

El invernadero encima del biodigestor crea un microclima en el interior por consiguiente se incrementa las temperaturas de la superficie de la cúpula del biodigestor y del aire por encima de la cúpula, es de esperar un incremento de temperatura en el interior del digestor.

La figura (1-15) muestra esquemáticamente los procesos convectivo, radiativos y el análisis de resistencias, figura (1-16).

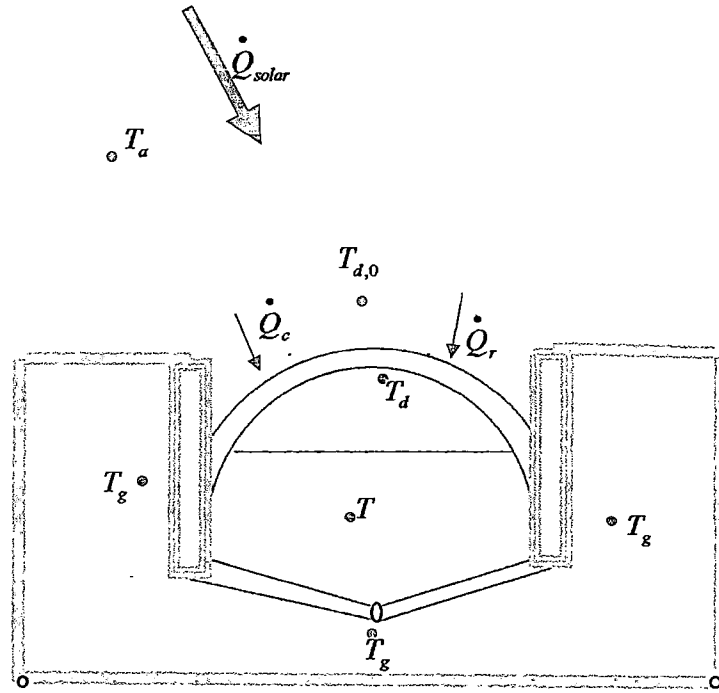


Figura (1-15): Análisis del efecto invernadero en el digestor  
Fuente: (propio)

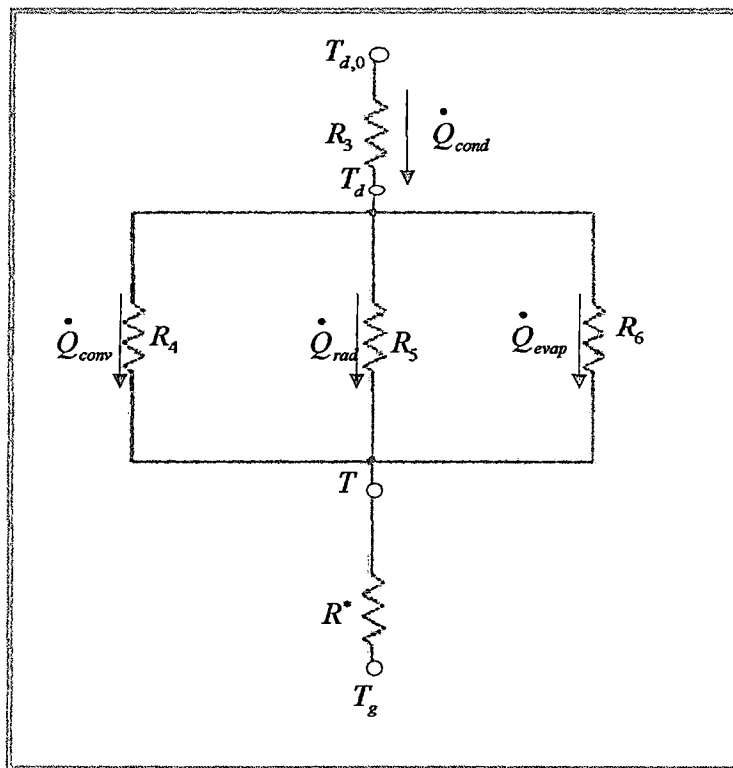


Figura (1-16): Análisis de resistencia térmica  
Fuente: (propio)

Como el efecto del invernadero es incrementar la temperatura en la superficie exterior del domo o cúpula entonces consideramos  $T_{d,0}$  (temperatura de la superficie exterior del domo) como una variable independiente en lugar de  $T_a$ . Reemplazando  $T_{d,0}$  en lugar de  $T_a$  en la ecuación (1-15) se tiene:

$$\dot{Q}_{L,s} = UA(T - T_{d,0}) \quad \text{Ec. (1-39)}$$

Dónde:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c + h_r + 2.2h_c \left(\frac{dp}{dT}\right)_T} + \frac{\delta_1}{\pi k_1 r_1 r_2} \rightarrow U = 10.379 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow UA = 70.89 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Si  $T_{d,0} > T$ , el calor se transfiere desde la superficie exterior  $T_{d,0}$  por conducción a través de la pared del domo, y de la superficie interior del domo ( $T_d$ ) a la superficie del barro o lechada esencialmente por radiación, convección y evaporación.

Usando la ecuación (1-25)

$$(UA)_{eff} = \dot{m} C_p + UA + \frac{k_2 A}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1}$$

Remplazando valores se tiene:

$$(UA)_{eff} = 135.733 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$a = \frac{\dot{m} C_p}{(UA)_{eff}} = 0.03187$$

$$b = \frac{UA}{(UA)_{eff}} = 0.52$$

$$c = \frac{\left(\frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{k_1 \pi r_1 r_2}{\delta_1}\right)}{(UA)_{eff}} = 0.446$$

$$T = 0.03187 T_m + 0.52 T_{d,0} + 0.446 T_g, \quad T_{d,0} > T.$$

Tomando en cuenta la condición.  $T_m = T_g = T_a$  se tiene:

$$T = 0.52 T_{d,0} + 0.477 T_a \quad \text{Ec. (1-40)}$$

## CAPITULO II

### DISEÑO, CONSTRUCCION, MATERIALES Y METODOS

#### 2.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO Y CARACTERISTICAS CLIMATICAS

**UBICACIÓN DEL PROYECTO:** Centro de Capacitación para el Desarrollo (CECADE) Qosqo Yachay Wasi

**Distrito:** Yaurisque, provincia de Paruro

**ALTITUD:** 3340m.s.n.m.

**TEMPERATURA MEDIA ANUAL:** 12.5°C

**HUMEDAD RELATIVA MEDIA ANUAL:** 60%

**PRECIPITACIÓN ANUAL:** 785mm H<sub>2</sub>O

**IRRADIACION MEDIA DIARIA:** 5.2 KWh/m<sup>2</sup> .día

#### 2.2. DISEÑO Y CONDICIONES

En el Capítulo I, se ha señalado que los problemas fundamentales en el trabajo eficiente de un biodigestor en zonas andinas, son:

- Las fallas estructurales que producen grietas en la base y paredes, perdiéndose líquidos y gases.
- La baja temperatura de la lechada que prolonga el proceso de conversión
- La falta de aislamiento en el fondo y paredes laterales, que facilitan las pérdidas por conducción y convección.

Con estas premisas, el diseño propone la mejora estructural del sistema, aislamiento en piso y paredes y la construcción de un invernadero sobre el sistema para mejorar la inercia térmica, y por consiguiente mejorar la conversión, producción de biogás y los otros sub productos.

Se ha tomado el modelo chino por su versatilidad, eficiencia, vida útil. La figura (2-1) muestra el prototipo experimental. El sistema consta de un digestor esférico de domo fijo, cuya base cónica y esférica se ubica a una profundidad de 2.60 m del nivel del

suelo, así mismo una cámara de entrada y carga y cámara de salida para los efluentes (biol), conectados con el digestor a través de tubos de PVC.

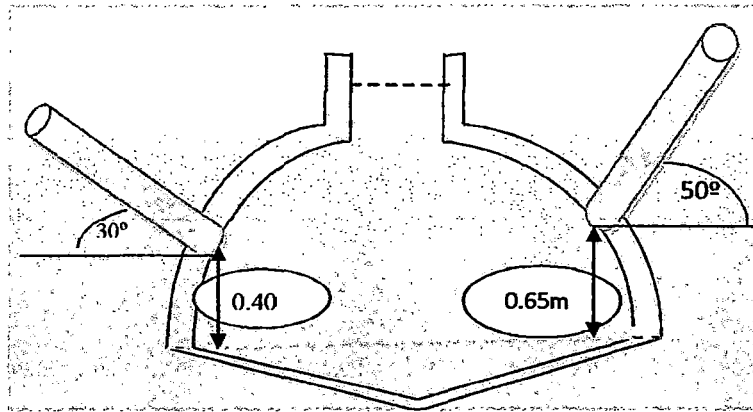


Figura. (2-1).Diseño de un digestor modelo chino mejorado para zonas andinas

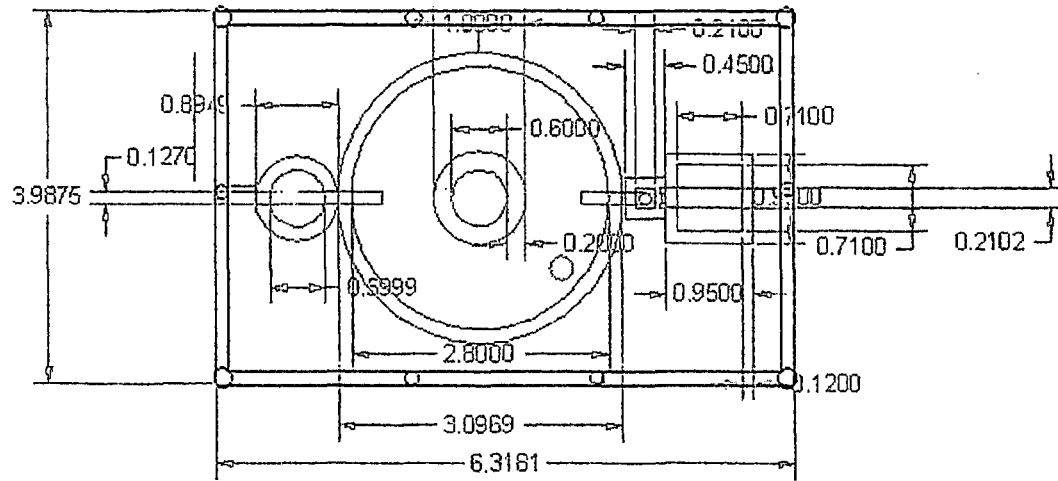
Fuente: (diseño propio)

Para el correcto funcionamiento del digestor, es necesario satisfacer las siguientes condiciones:

- a) Que con cada carga se produzca un efecto de pistón que provoque un flujo vertical. Esto se logra construyendo el pozo de carga a un nivel por encima del nivel del líquido dentro del digestor. Ver fig. (1-9a)
- b) Que haya poco depósito de lodos en el fondo del digestor. Esto se logra construyendo el piso en forma cónica.
- c) Que la temperatura interior sea mayor que la temperatura del ambiente. Se consigue construyendo un invernadero cobertor del digestor.
- d) Que los esfuerzos estructurales sean mínimos. Esto se consigue construyendo las paredes con refuerzos de fierro y de forma semiesférica.
- e) Que haya espacio disponible para almacenar la producción de biogás (que es continua) en horas en que no hay consumo. Esto se logra de dos modos:
  - (1) Creando un espacio dentro del digestor sobre el nivel de operación (equivalente al 15% de su volumen bruto); y (2) construyendo un depósito externo (que puede ser de tela o de plástico polietileno).

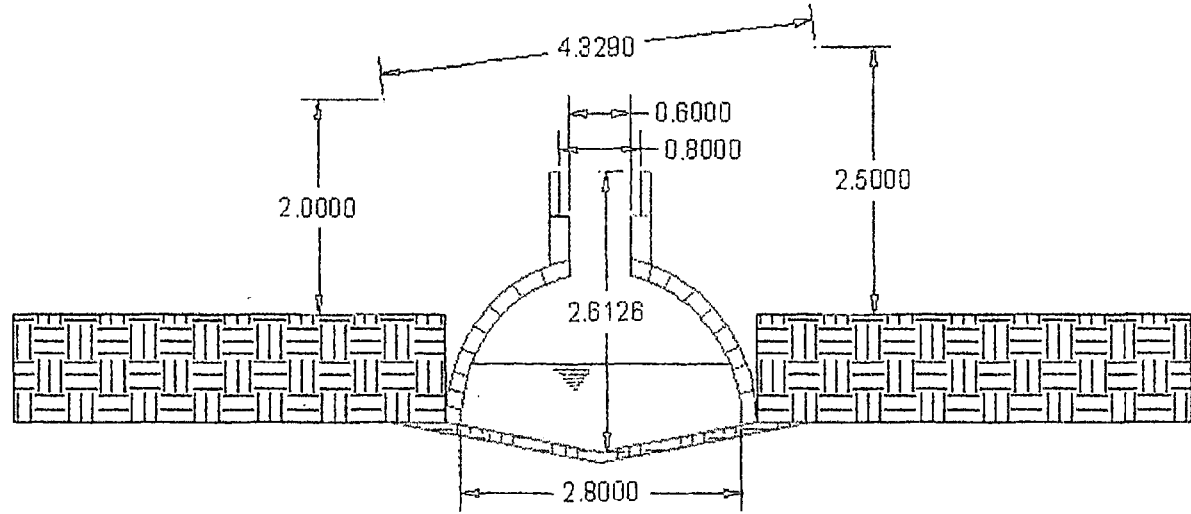
A continuación mostraremos los planos en planta, perfil y estructural del biodigestor.

PLANO EN PLANTA



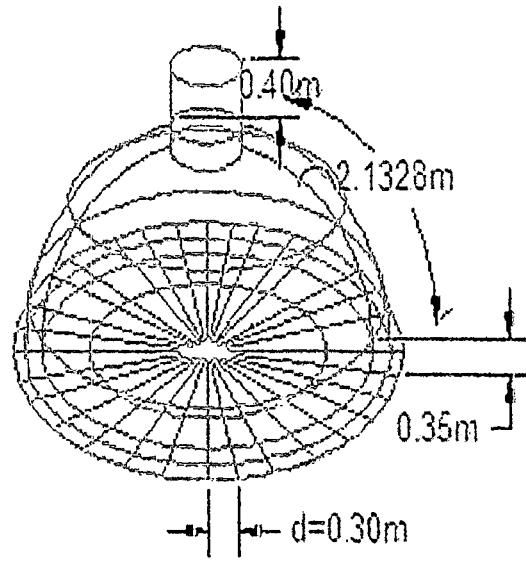
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO					
PLANO: BIODIGESTOR MODELO CHINO MEJORADO PARA ZONAS ANDINAS "VISTA EN PLANTA"					
BACH:			Fecha:		
FREDY ALMANZA MAMANI			Abril 2011		
LUGAR	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	ESCALA:	P-1
CECADE	YAUQUISQUE	PARURO	CUSCO	1:250	

PLANO PERFIL



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAJO DEL CUSCO				
PLANO: BIODIGESTOR MODELO CHINO MEJORADO PARA ZONAS ANDINAS "INVERNADERO"				
BACH:			Fecha:	
FREDY ALMANZA MAMAN I			Abril 2011	
LUGAR	DISTRITO	PROVINCIA	DEPARTAMENTO	ESCALA:
CE CADE	YURISQUE	PARURO	CUSCO	1:250
				P-2





UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO					
PLANO: ESTRUCTURA DEL BIODIGESTOR MODELO CHINO MEJORADO PARA ZONAS ANDINAS					
BACH. FREDY ALMANZA IV AMANI				FECHA ABRIL 2011	P-3
LUGAR CECADE	DISTRITO YAURISQUE	PROVINCIA PARURO	DEPARTAMENTO CUSCO	ESCALA 1:1	

### 2.3. DIMENSIONAMIENTO

La ubicación y dimensionamiento del digestor se sustenta en los siguientes factores:

- a. Terreno seco, sin filtraciones de agua.
- b. Volumen de materia orgánica disponible cerca del biodigestor.

El CECADE, tiene unidades productivas demostrativas: cuyero (100 unidades), conejera (60 unidades), ovinos (4 unidades) y restos orgánicos de chala de maíz y cebada, todo esto produce un volumen de materia orgánica de 469Kg/semana produciéndose 89Kg/día equivalente a  $0.089\text{m}^3/\text{día}$ . También cabe mencionar la crianza de ganados vacunos y chivos en toda la zona de Yaurisque que facilitan usar el estiércol de estos animales. Como es un biodigestor de carga continua se requerirán 300Kg de materia orgánica cada semana lo cual se tiene suficiencia de materia orgánica para la producción de gas diario.

Teniendo en cuenta el tiempo de retención  $TR = 65$  días, y el volumen de carga diaria  $0.089\text{m}^3/\text{día}$  determinaremos el volumen del biodigestor en donde:

$$\text{Volumen necesario} = 0.089\text{m}^3/\text{día} * 65 \text{ días} = 5.8\text{m}^3$$

El volumen total del biodigestor calculado es  $6.43\text{m}^3$

#### CALCULO DEL VOLUMEN DEL DIGESTOR

Tiempo de retención  **$TR = 65$  días**

Volumen del digestor  **$V_D = 6\text{m}^3$**

Radio de la semiesfera:  **$r = 1.40\text{m}$**

Altura del cono:  **$h_c = 0.26\text{m}$**

Radio del cono:  **$r = 1.40\text{m}$**

$$\text{Volumen de la semiesfera: } V_e = \frac{2}{3} \pi r^3 = 5.575\text{m}^3$$

$$\text{Volumen de la base cónica: } V_c = \frac{1}{3} \pi r^2 h_c = 0.575\text{m}^3$$

Aparte de  $v_e$  y  $v_c$  también tendremos un pequeño volumen en el cuello cilíndrico de la salida de biogás  $v_{cil}$  donde se usara la mitad de volumen de este cilindro como almacenamiento de biogás.

$$\frac{1}{2} V_{cil.} = \frac{\pi r^2 h_{cil}}{2} = 0.113\text{m}^3$$

Ahora tendremos el volumen total del interior del sistema  $V_T$ .

Dónde:

$$V_T = v_e + v_c + v_{cil} = 5.575\text{m}^3 + 0.575\text{m}^3 + 0.113\text{m}^3 = 6.43\text{m}^3$$

Calcularemos el volumen de carga diaria usando la siguiente relación.

$$\text{Volumen de carga diaria} = V_T / TR = 6.43\text{m}^3 / 65\text{días} = 0.096\text{m}^3/\text{día} \sim 96\text{kg}/\text{día}$$

Volumen que ocupara el biogás será el área sombreada:  $V_g = \frac{1}{3}\pi h^2(3r-h) + \frac{1}{2}V_{cil}$

$$V_g = 0.96\text{m}^3 + 0.113\text{m}^3 = 1.2\text{m}^3$$

El dimensionamiento del digestor consta de los siguientes valores:

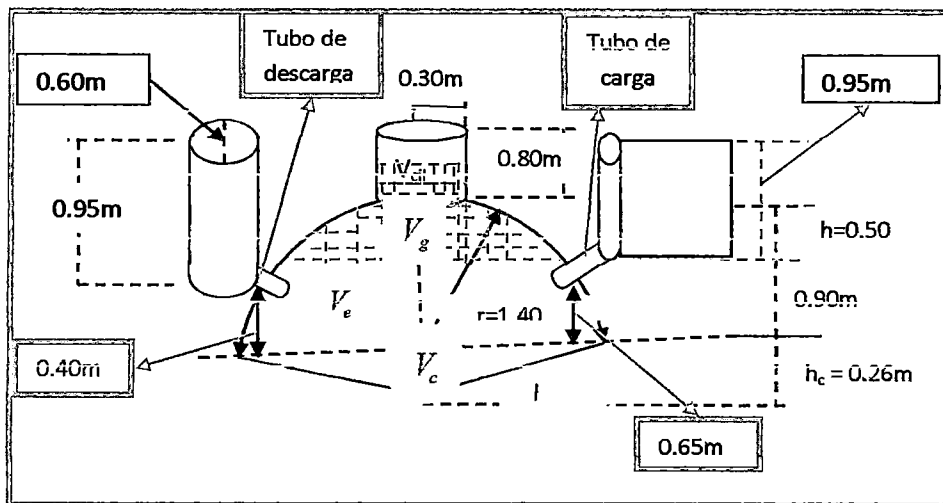


Figura (2-2). Esquema del dimensionamiento del digestor

Fuente: (propio)

Tabla. (2-1) Dimensiones del esquema del digestor

Volumen del digestor	6m <sup>3</sup>
Radio interior r <sub>1</sub>	1.40m
Radio exterior r <sub>2</sub>	1.55m
Espesor del domo δ <sub>1</sub>	0.15m
Espesor de la placa de fondo δ <sub>2</sub>	0.25m
Espesor del aislante δ <sub>a</sub>	0.05m
Volumen de gas V <sub>g</sub>	1.2m <sup>3</sup>
Tiempo de retención TR	65 días
Altura de la base cónica h	0.26m
Altura del tubo de carga	0.65m
Altura del tubo de descarga	0.40
Volumen de la semiesfera V <sub>e</sub>	5.575m <sup>3</sup>
Volumen de carga diaria	96kg/día = 0.096m <sup>3</sup> /día
Volumen de pozo de carga	0.85m <sup>3</sup>
Volumen del pozo descarga	0.31m <sup>3</sup>

Fuente:(propio)

## 2.4. HERRAMIENTAS

Las herramientas a usarse son herramientas de construcción como:

Pala, pico, plomada, nivel de mano, combillo, badilejos, cantillon giratorio de 1.60m de radio, escalera, carretilla, la herramienta más importante es el cantillon que es un radio giratorio la cual dará la forma esférica a la pared.

A continuación podemos observar el cantillon en la figura:

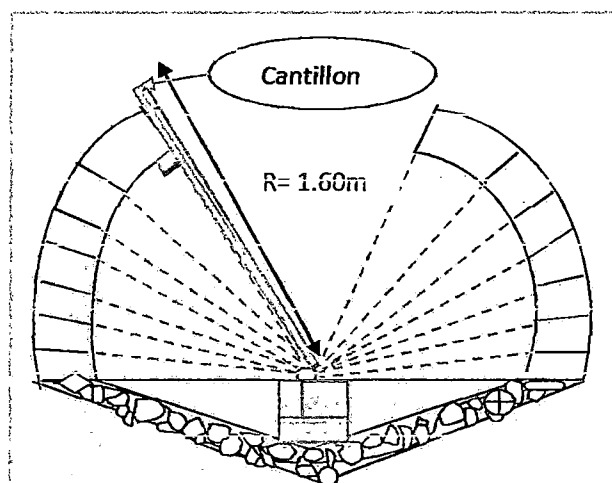


Figura. (2-3). Cantillon giratorio  
fuente: (propio)

## 2.5. MATERIALES

Tabla. (2-2): Materiales de construcción

VOLUMEN DEL PROTOTIPO: $6m^3$	
MATERIALES	CANTIDAD
Alambrón	50 kilos
Cemento	30 bolsas
Arena	3 cubos
Piedra	1 cubo
Plástico polietileno	$24.50m^2$
Palos de eucalipto de diferentes tamaños	20 unidades
Ladrillos mecanizados de 12 huecos	700 unidades
Tubo pvc de 6" de 5m de largo	1 unidades
Tubos pvc de 1/2" de 6m de largo	3 unidades
Impermeabilizante	2 baldes
Arcilla	10 kilogramos
Polietileno expandido	$12m*3m*0.6m$
Equipos	8 unidades

Fuente: (datos propios)

## 2.6. CONSTRUCCION

### 2.6.1. PLACA DE FONDO

El peso del muro del digestor carga sobre el borde de la placa de fondo (solado), la placa de fondo reparte el peso sobre el terreno de cimentación.

Cuanto más grande sea la superficie de cimentación menos se asienta la construcción.

Cuanto más parejo sea la carga, más parejo es el asentamiento. Cuanto más parejo sea el asentamiento, menor es el peligro de agrietamiento.

Un casco rígido reparte mejor el peso que una placa plana. El peso del cieno de fermentación presiona de manera uniforme sobre el terreno se cimentación.

En la construcción de la placa de fondo se emplea materiales locales y lo más importante es el uso del polietileno y el polietileno expandido que permitirá aislar el contacto del suelo con el digestor para poder obtener una temperatura adecuada para el funcionamiento del sistema en condiciones anaeróbicas. Los materiales a usar son:

- Piedras del mismo tamaño con relleno de mortero de cemento y solado de cemento y alambrones de construcción para la rigidez.
- Mampostería de ladrillo con solado de cemento, concreto.

Un enmallado de alambón (armadura en forma de malla) sobre el solado refuerza la capacidad de carga de la placa. Este refuerzo es de suma importancia en terrenos donde la cimentación no es firme y mucho mejor en suelos arcillosos y lodosos.

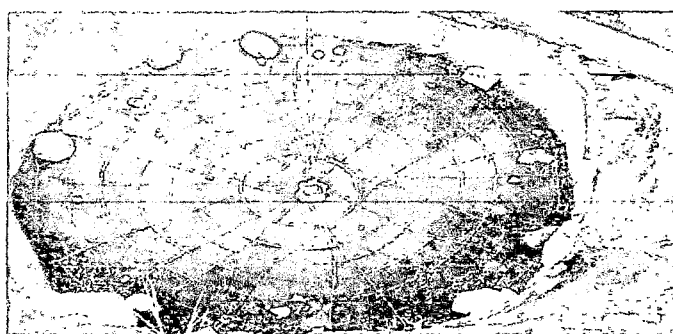


Imagen (2-1). Placa de fondo

Fuente:(propio)

### 2.6.2. MAMPOSTERIA

Se utiliza el cantillon giratorio con un radio equivalente al de la esfera que servirá como guía para elevar el casco esférico sin deformaciones.

Una vez que las paredes alcanzan una curvatura inclinada los ladrillos colocados tienden a caerse por gravedad para ello se coloca contrapesas para evitar la caída de ladrillos y concreto.

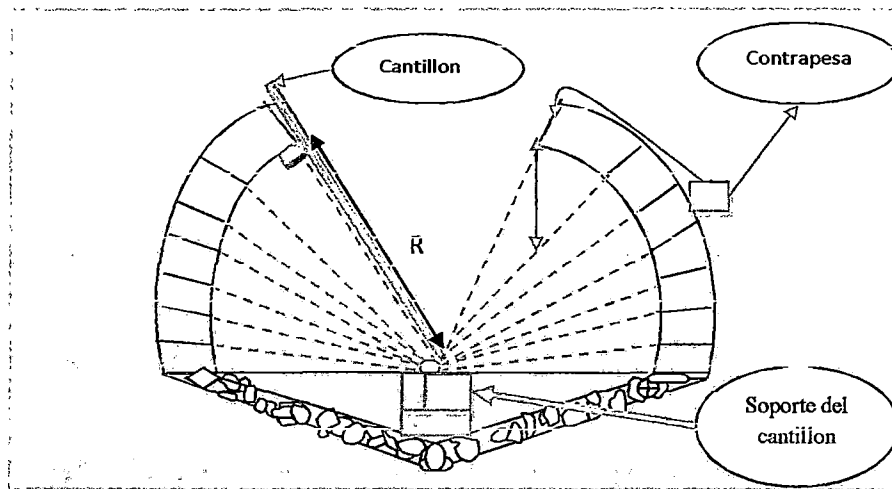


Figura. (2-4): Construcción de la mampostería

Fuente: *(propio)*

### 2.6.3. DEPOSITOS DE CARGA Y DESCARGA

El depósito de carga es una poza de 0.95m\*0.95m\*0.55m que posee una compuerta con la cual se cierra para preparar el material de carga disolviendo con agua y posteriormente tiene una caja de control para observar el ingreso del material al biodigestor.

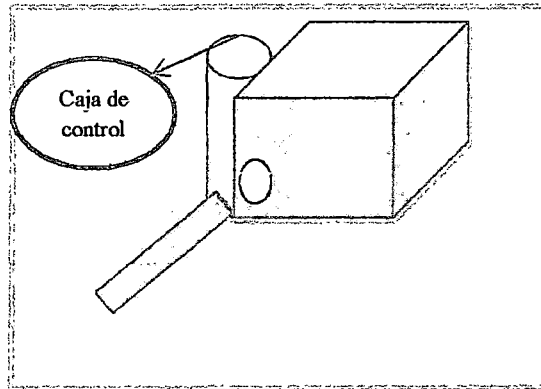


Figura. (2-5): Depósito de carga  
Fuente:(*propio*)

El depósito de descarga o pozo de compensación es un depósito de forma cilíndrica en el cual se deposita el biol

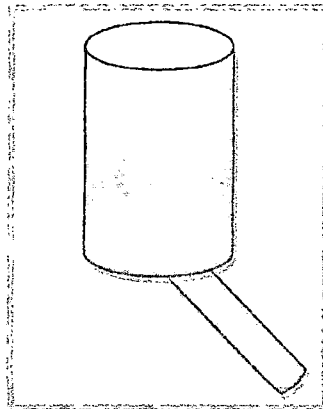


Figura. (2-6). Depósito de descarga  
Fuente:(*propio*)

#### 2.6.4. REVESTIMIENTO.

Es uno de los trabajos más cuidadosos a realizarse, para garantizar una completa hermeticidad y evitar las fugas de líquido y gases por los agrietamientos y poros, para ello se recomienda preparar un buen mortero 3:1 con un impermeabilizante de fraguado, este trabajo deberá realizarse en una sola jornada de trabajo hasta completar el revestido de las paredes interiores.



### **2.6.5. TAPA, SELLO DE AGUA Y CONEXIONES AUXILIARES**

La tapa es construida de concreto con reforzamiento de fierro, con un espesor de 12cm y 60cm de diámetro en el cual se coloca 2 asas y un tubo de 1/2pulg de metal en la parte central por 60cm de longitud roscado en uno de sus extremos para hacer las conexiones de biogás.

El sello de agua tiene una función de gran importancia ya que esta permite observar la fuga de gas por la tapa. Una vez colocada la tapa de concreto se prosigue sellar con arcilla y piedras de canto rodado para taponear todos los poros del concreto y en seguida se llena con agua hasta una altura de 20cm esto garantiza cualquier fuga de biogás.

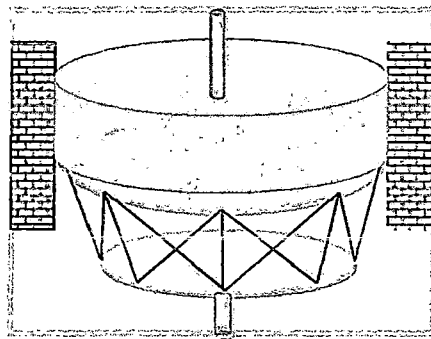


Figura (2-7). Tapa del digestor y sello de agua  
Fuente: *(propio)*

En la salida de biogás se coloca una trampa de vapor de agua el en cual se quedara el vapor de agua que es expulsado del digestor, durante la producción de gas, esta instalación es importante porque el vapor de agua al llenarse en la tubería, puede tapar la salida de gas.

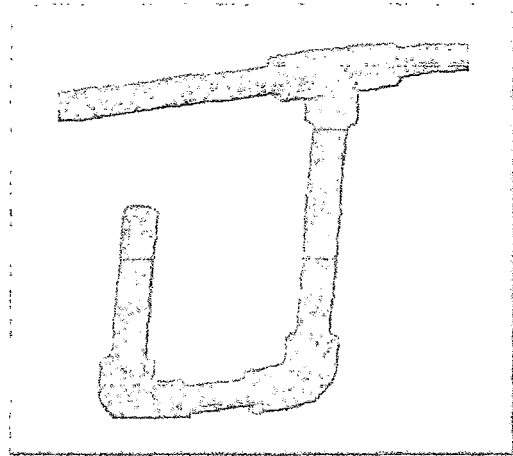


Figura. (2-8): trampa de vapor de agua

## 2.7. INSTALACION DE SENSORES

Los sensores de temperatura son instalados durante la construcción en el biodigestor para facilitar la operación de equipos y evitar dificultades al momento de tomar los datos requeridos ya que el biodigestor es un sistema cerrado, sólido e impermeable.

Cuando la evaluación es en vacío sin invernadero se utilizaran los siguientes sensores instalados; T, T<sub>a</sub>, T<sub>g</sub>. Ver figura (2-8)

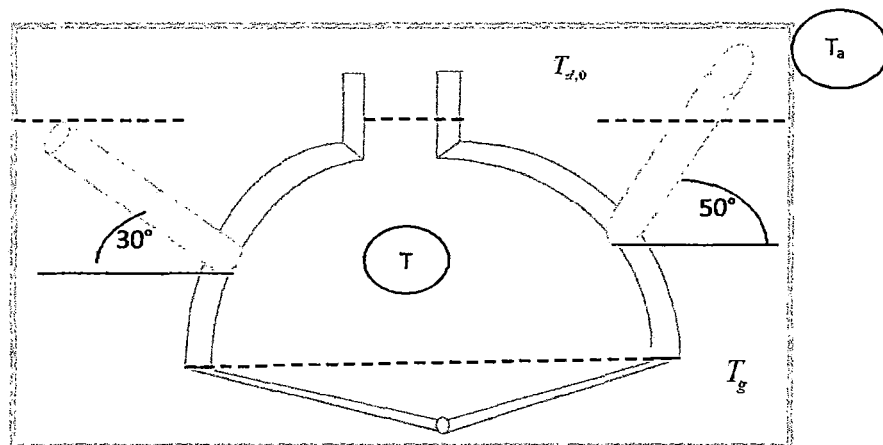


Figura (2-9). Instalación de sensores  
Fuente: (propio)

Dónde:

T: Temperatura en el interior del digestor vacío

T<sub>a</sub>: Temperatura en el exterior del digestor (ambiente)

T<sub>g</sub>: Temperatura en el suelo

Para la evaluación del digestor en vacío con invernadero se usaran los siguientes sensores; de la figura (2-8)

T: Temperatura en el interior del digestor vacío

T<sub>a</sub>: Temperatura en el exterior del invernadero (ambiente)

T<sub>d,0</sub> : temperatura en el interior del invernadero

T<sub>g</sub> = Temperatura en el suelo

Para evaluar el digestor cargado con agua sin invernadero se tomaran en cuenta los siguientes sensores instalados; T, T<sub>d</sub>, T<sub>g</sub>, T<sub>a</sub>. Ver figura (2-9).

Para evaluar el digestor cargado con agua y con invernadero se utilizaran todos los sensores de la figura (2-9).

Los mismos sensores de la figura (2-9) serán utilizados para evaluar el digestor ya cargado con material orgánico para su respectiva evaluación.

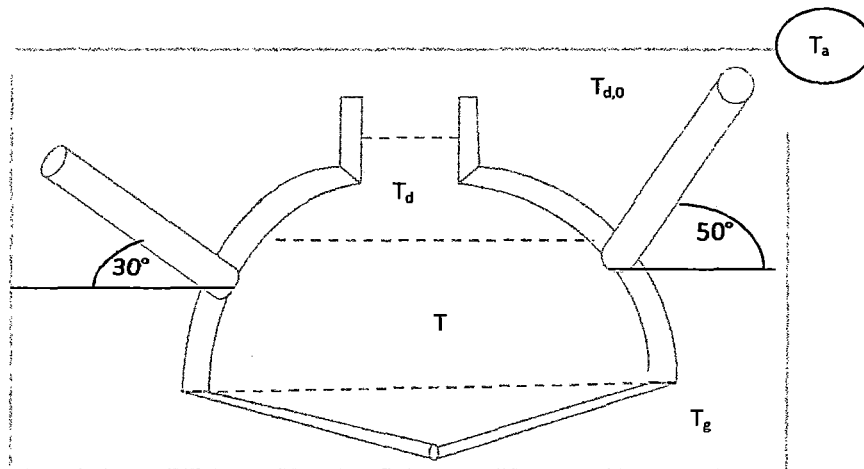


Figura (2-10) Sensores ubicados en la evaluación del digestor.

Fuente: (propio)

Dónde:

$T_a$ : Temperatura en el exterior del invernadero.

$T_{d,0}$ : Temperatura en el interior del invernadero.

T: Temperatura del agua.

$T_d$ : Temperatura del aire por encima del agua.

$T_g$ : Temperatura del suelo.

## **2.8. INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DE MEDIDA**

### **a. MULTIMETRO DIGITAL YF-3220**

Este instrumento es utilizado para medir la resistencia térmica de los termos resistencias instalados en el lodo y en el gas, desde el momento de la construcción en el biodigestor.

### **b. HIGROTHERMOMETRO DIGITAL**

Medidor digital para indicación de temperatura interna y externa, así como para determinar la humedad atmosférica. Con función Mín/Máx y señal acústica que se activa si la temperatura externa llega a cero o a grados menores, posibilidad de conmutación entre °C/°F, interruptor, ojal de suspensión y base abatible para emplazamiento en posición oblicua.

Rangos de medida:

· Temperatura (interna): 0° C – 50° C / 32° F – 122° F

Temperatura (externa): -50° C – 70° C / -58° F – 158° F

Humedad atmosférica: 20% - 99%

Resolución: 0,1° C/F, 1%

Precisión (temp.): ± 1° C / ± 2° F

Precisión (humedad): ± 3%

### **c. RADIOMETRO**

Mide la energía solar (irradiación e irradiancia), dentro como fuera del invernadero.

#### **d. TERMOMETROS**

Termómetro de mercurio: termómetro manual analógico de varilla que mide la temperatura con una sensibilidad de 0 a 100°C.

Termómetro digital portátil WT-10: Instrumento con entradas a termocupla e incluye multímetro.

Estos instrumentos se utilizan para medir la temperatura del suelo, temperatura en el exterior del invernadero y dentro del invernadero.

#### **e. PH-METRO pHep HANNA**

Es un instrumento digital que consta de un bulbo el cual es sumergido en el material para determinar el pH y al mismo tiempo la temperatura que se encuentra el material en el instante.

#### **f. TERMORESISTENCIAS PT-100**

La medición de temperaturas con termo resistencias, está basada en la propiedad que poseen todos los conductores de variar su resistencia en función de la temperatura. Esta propiedad es más o menos acentuada dependiendo de cada material en particular.

Este tipo de termo resistencias mide temperaturas entre -200 a 850°C

#### **g. TERMOCUPLAS Cu-Constantan**

Son instrumentos instalados en el suelo y en las paredes del biodigestor para controlar la variación térmica en el sistema. Estos instrumentos son contruidos haciendo una aleación cobre-constantan. Los rangos de temperatura pueden detectarse de -250 a 300°C con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$

## **h. MANOMETRO**

Este instrumento es manual consta de una manguera transparente en forma de U colocada en un papel milimetrado, que determinara la presión en la salida del biogás y en el depósito de biogás.

## **2.9. INSTALACION DEL INVERNADERO**

El invernadero se instala cubriendo toda el área de la instalación del digestor, y tiene las siguientes dimensiones y características:

Área de terreno base: 23 m<sup>2</sup> (7.8 x 3m)

A una sola agua

Techo inclinado mirando al NE

Estructura: palo rollizo de eucalipto

Cubierta: Polietileno térmico estabilizado de 200 micras

Una puerta de acceso hacia al este

A continuación se muestra el diagrama e imagen del invernadero instalado.

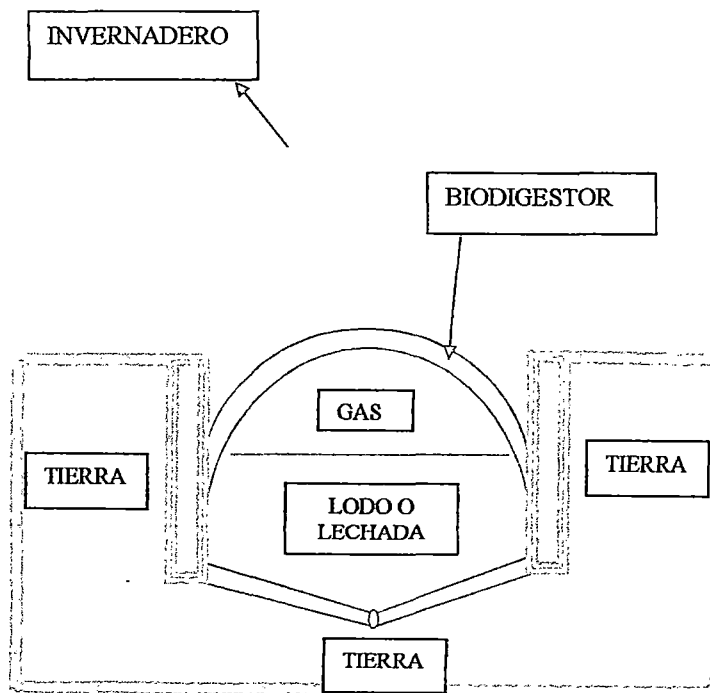


Figura. (2-11) Esquema del invernadero

Fuente: (propio)

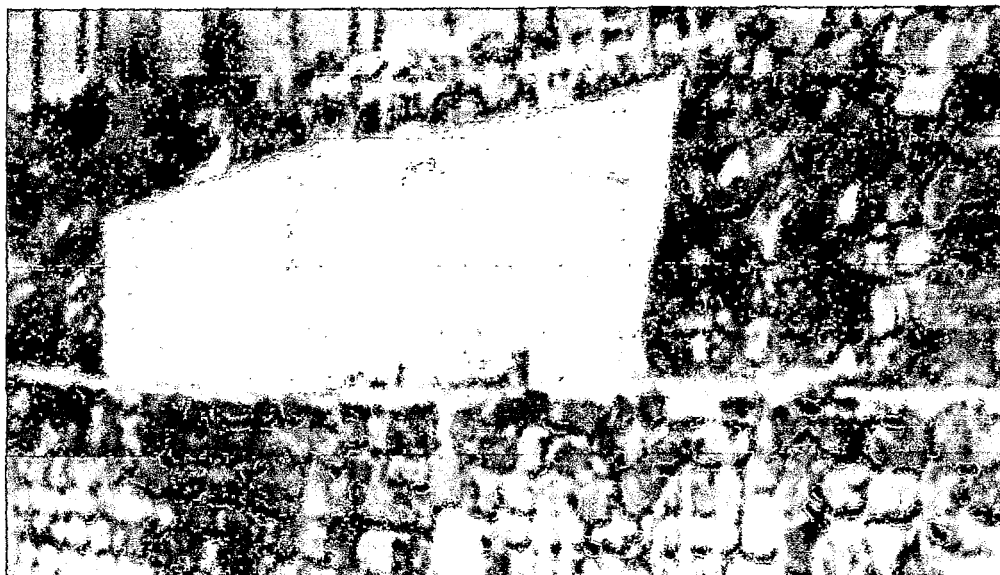


Imagen (2-2) Instalación del invernadero

Fuente: *(propio)*

## 2.10. DEFINICION DEL MATERIAL ORGANICO

La materia orgánica a utilizarse en esta primera carga es estiércol de chivo mezclado con paja de trigo, hecho por el cual la crianza de chivos y el cultivo de trigo en la zona son abundantes, lo cual nos facilita contar con la materia disponible para la carga diaria.

Tabla. (2-3): Materia orgánica utilizado y proporciones

CARGA	MATERIAL DE FERMENTACION	CANTIDAD (Kg)	NEZCLA MATERIAL/AGUA
primera carga	estiércol de chivo y ovejas	300	1/3
	paja de trigo	60	
segunda carga	estiércol vacuno con chala de cebada	220	1/1

Fuente: *(datos propios)*

### **CAPITULO III**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIONES**

##### **3.1.- PRUEBA DE HERMETICIDAD DEL DIGESTOR.**

Una vez terminada la construcción, se hace la prueba de hermeticidad llenando completamente el biodigestor con agua. Esta prueba permite observar las grietas o fracturas por donde se filtra el agua y el gas, una vez detectada las grietas o fracturas se vacía el agua y se procede a resanar las fisuras hasta comprobar la hermeticidad del sistema. Luego de esta prueba se prosigue con las evaluaciones correspondientes.

##### **3.2. ANALISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

Para conocer el funcionamiento del sistema, aplicaremos las formulas sobre *transferencia de calor desarrolladas en el capítulo I (Sección 1.8)* para conocer el orden de magnitud en cada caso y replicarlas luego con los datos reales medidos experimentalmente.

##### **3.2.1. EFECTO DEL CALENTAMIENTO DE LA LECHADA O LODO EN UN SISTEMA AISLADO TERMICAMENTE.**

En la sección (1.8.1) Y (1.8.2), del Capítulo 1, se ha deducido a partir de valores teóricos, las ecuaciones (\*) y (\*\*), que la transcribimos a continuación:

$$T = 0.0566T_m + 0.946T_a \quad (1-29)$$

Despejando  $T_m$ :

$$T_m = 17.66T - 16.71T_a$$

Haciendo el análisis para temperaturas ambientales  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$  se tiene:



$$\left. \begin{aligned} T_m &= 17.66T - 167.137, \text{ para } T_a = 10^\circ\text{C} \\ T_m &= 17.66T - 250.71, \text{ para } T_a = 15^\circ\text{C} \\ T_m &= 17.66T - 334.274, \text{ para } T_a = 20^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} (*)$$

Y la ecuación (1-38)

$$T = 0.0134T_m + 0.9865T_a \quad \text{Ec. (1-38)}$$

Despejando  $T_m$ :

$$T_m = 15T - 19.19 T_a$$

Lo mismo para los casos de  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$

$$\left. \begin{aligned} T_m &= 15T - 191.9, \text{ para } T_a = 10^\circ\text{C} \\ T_m &= 15T - 287.85, \text{ para } T_a = 15^\circ\text{C} \\ T_m &= 15T - 383.8, \text{ para } T_a = 20^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} (**)$$

Estos dos sistemas de ecuaciones (\*) y (\*\*) se han determinado para expresar el comportamiento del sistema para diferentes temperaturas ambientales  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$ , en los diferentes casos como el efecto del calentamiento de la lechada con agua caliente y el aislamiento del digestor en la base y paredes laterales a continuación se muestra una gráfica en el que explicaremos la utilidad de estos sistemas de ecuaciones.

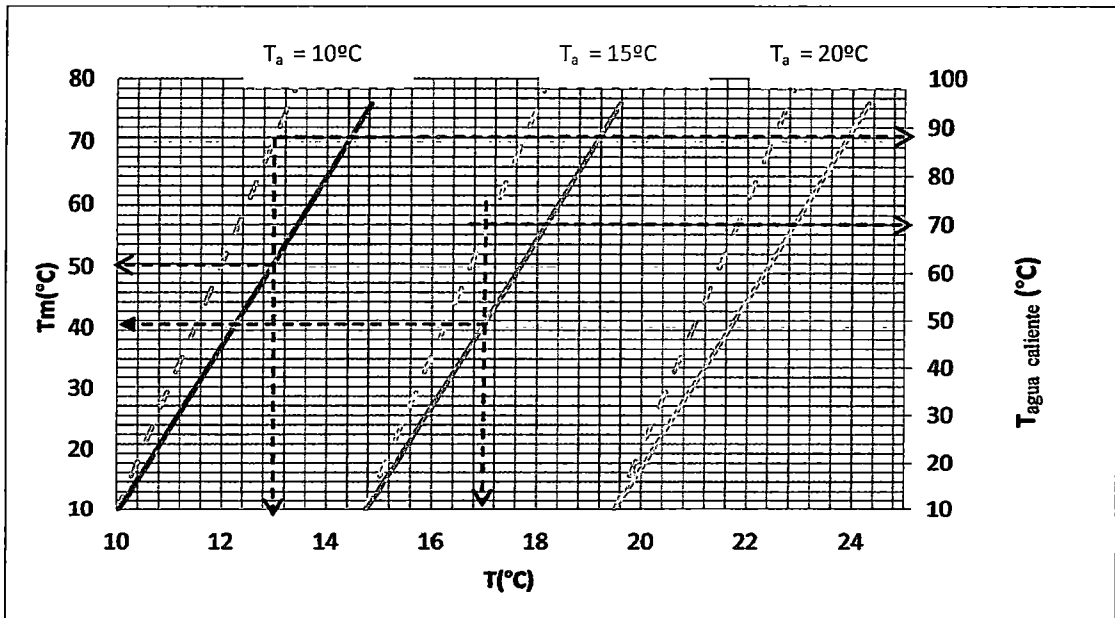


Grafico (3-1): Balance térmico de un digestor modelo chino mejorado para zonas andinas

LEYENDA: - - - - Temperatura de agua caliente para la mezcla

— Temperatura de la mezcla en el interior del digestor aislado

Estas curvas nos permiten realizar los siguientes análisis y discusiones:

**PRIMER CASO:** En el grafico (3-1) supongamos que el agua caliente está a  $70^{\circ}\text{C}$  (proveniente de una terma solar) es utilizada para preparar la mezcla o lechada de una planta de biogás de  $6\text{m}^3$ . El promedio de la temperatura ambiente para un clima típico de primavera en las zonas andinas es  $13^{\circ}\text{C}$ . Partiendo desde los  $70^{\circ}\text{C}$  sobre el eje vertical ( $T_{\text{agua caliente}}$ ) trazamos una línea horizontal que interseca la línea punteada  $T_a = 15^{\circ}\text{C}$ . Desde este punto de intersección trazamos una línea vertical hasta intersecar la línea sólida  $T_a = 15^{\circ}\text{C}$  y continuamos hasta intersecar al eje X.

La primera intersección da la temperatura de preparación de la lechada o lodo como  $40^{\circ}\text{C}$ , y la segunda intersección da la temperatura en el digestor como  $17^{\circ}\text{C}$ .

**SEGUNDO CASO:** supóngase que una planta es instalada en un lugar donde la temperatura ambiente es  $10^{\circ}\text{C}$  y que se requiere mantener a  $13^{\circ}\text{C}$  por intercambio de calor.

El procedimiento es inverso, iniciando desde el punto 13°C sobre el eje X encontramos que la temperatura requerida de la lechada o mezcla es 50°C y las temperaturas de agua caliente deben estar como 88°C.

**RESULTADO:** El efecto de usar agua caliente proveniente de una terma solar ayuda a incrementar la temperatura del lodo en el interior del digestor aislado térmicamente.

Para una temperatura ambiente de 10°C se necesita mezclar con agua caliente de 80°C aproximadamente para obtener 13 a 15°C. También dependerá de la temperatura del material.

### 3.2.2. EFECTO DE LA CALEFACCION DEL INVERNADERO

Para este análisis tomamos las ecuaciones desarrolladas en el acápite (1.8.3) del capítulo I

De la ecuación (1-40)

$$T = 0.52T_{d,0} + 0.477T_a \quad \text{Ec. (1-40)}$$

En esta ecuación analizaremos el efecto del invernadero variando la temperatura ambiente  $T_a = 10, 15$  y  $20^\circ\text{C}$  mostrados en la siguiente figura.

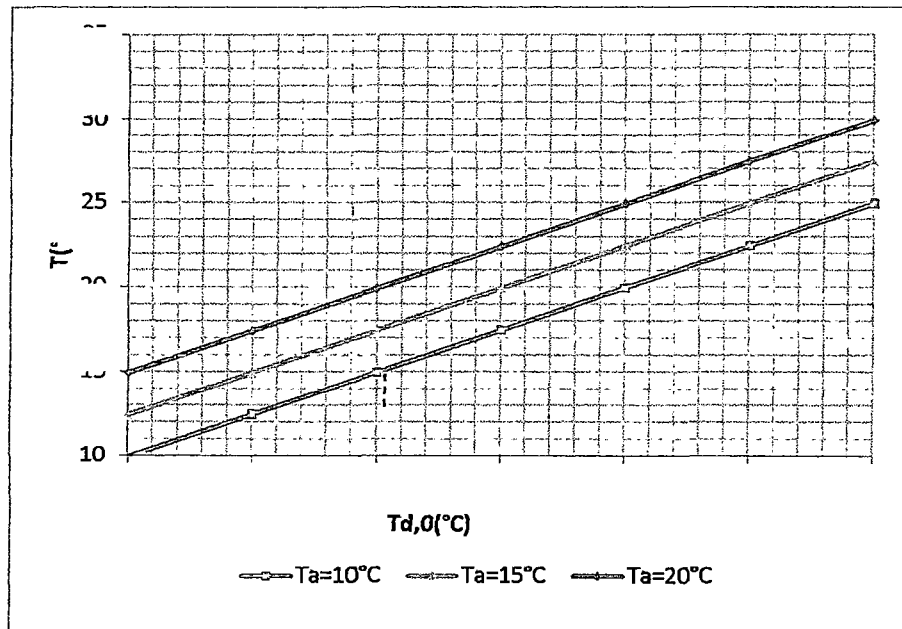


Grafico (3-2): Influencia del invernadero en un digestor modelo chino mejorado para zonas andinas

En el gráfico (3-2) si consideramos una temperatura ambiente  $T_a = 10^\circ\text{C}$  y un incremento promedio de  $20^\circ\text{C}$  en la superficie del domo ( $T_{d,0}$ ) o cúpula debido al invernadero, la temperatura en el digestor es  $15^\circ\text{C}$ , es decir que hay un incremento de  $5^\circ\text{C}$  en la temperatura de la lechada.

RESULTADO: para un incremento de  $10^\circ\text{C}$  en la superficie exterior del domo del biodigestor ( $T_{d,0}$ ) por encima de la temperatura ambiente el correspondiente incremento de la temperatura de la lechada del biodigestor es de alrededor de  $5^\circ\text{C}$ .

### 3.2.3. EFECTO DEL AISLAMIENTO

El aislamiento del fondo y paredes laterales del biodigestor deben ser estudiados para ver su efecto con relación al valor de la temperatura de la mezcla o lechada  $T$ .

Para  $T > T_g$ .

Considerando las temperaturas promedio durante la evaluación del biodigestor se tiene:

$$T = 17.2^\circ\text{C}$$

$$T_d = 20^\circ\text{C}$$

$$T_{d,0} = 20.75^\circ\text{C}$$

$$T_a = 12.5^\circ\text{C}$$

$$T_g = 11.37^\circ\text{C}$$

$$T_m = 15.5^\circ\text{C}$$

Las pérdidas de calor a las afueras del digestor desde la temperatura  $T$  hacia el suelo es por conducción, desde el fondo y lados laterales del digestor está dado por la ecuación (1-17). Y usando los valores de la tabla (1-8) se tiene:

#### a) SIN AISLAMIENTO.

$$\dot{Q}_{cg} = \left( \frac{k_2 A}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) (T - T_g) \quad \text{Ec. (1-17).}$$

Remplazando valores se tiene:

$$\dot{Q}_{cg} = 46(17.2 - 11.37)(W) = 268.18W \quad \text{Ec. (3-1)}$$

### **b) CON AISLAMIENTO.**

Calculando las resistencias térmicas en el fondo y paredes laterales de biodigestor con aislamiento resulta:

#### **POR EL PISO**

$$R' = R_2 + R_a = \frac{\delta_2}{k_2 A} + \frac{\delta_a}{k_a A} = 0.1689^\circ \text{C/W}$$

#### **POR LA PAREDES LATERALES.**

$$R'' = R_1 + R_a = \frac{\delta_1}{\pi k_1 r_1 r_2} + \frac{\delta_a}{\pi k_a r_1 r_2} = 0.1920^\circ \text{C/W}$$

Dónde:

$R_1$  = resistencia térmica del ladrillo

$R_2$  = resistencia térmica del concreto en la base del digestor

$R_a$  = resistencia térmica del aislante

Las pérdidas de calor totales por el piso y paredes laterales serán:

$$\dot{Q}_{cg} = (T - T_s) \left( \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \right) = 11(17.2 - 11.37)(W) = 64.13W \quad \text{Ec. (3-2)}$$

#### **RESULTADO:**

Comparando las ecuaciones (3-1) y (3-2) podemos apreciar que el aislamiento reduce las pérdidas por conducción en 204W

## **FLUJOS DE CALOR SUMINISTRADOS AL BIODIGESTOR**

### **A. POR EFECTO DEL INVERNADERO**

De la ecuación (1-39), y reemplazando valores se tiene:

$$\dot{Q}_{L,s} = UA(T - T_{a,0}) = 413.28W$$

### **B. POR LA MEZCLA DE LA LECHADA CON AGUA CALIENTE**

De la ecuación (1-20) del capítulo I  
Se tiene:

$$\dot{Q}_{ext} = UA(T - T_a) + (T - T_g) \left( \frac{k_2 \pi R^2}{\delta_2} + \frac{\pi k_1 r_1 r_2}{\delta_1} \right) - \dot{m} C_p (T_m - T) = 1565.134W$$

## **FLUJO DE CLOR TOTAL SUMINISTRADO AL BIODIGESTOR**

$$\dot{Q}_{T1} = \dot{Q}_{LS} + \dot{Q}_{Ext.} = 1978.414W$$

## **PERDIDAS DE CALOR EN EL BIODIGESTOR**

### **A. PERDIDAS DE CALOR EN LA SUPERFICIE DEL BIODIGESTOR**

De la ecuación (1-11) reemplazando valores se tiene:

$$\dot{Q}_{L,s} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r + \dot{Q}_e = 371.735W$$

### **B. PERDIDAS DE CALOR EN LA BASE Y PAREDES**

Usando la ecuación (1-17) y reemplazando valores se tiene:

$$\dot{Q}_{cg} = (T - T_g) \left( \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \right) = 11(17.2 - 11.37)(W) = 64.13W$$

### **C. PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCION EN EL DOMO**

De la ecuación (1-12) reemplazando valores se tiene:

$$\dot{Q}_{LS} = \dot{Q}_{cond} = \frac{2\pi k_1 r_1 r_2 (T_d - T_{d0})}{\delta_1} = 33.404W$$

### **PERIDAS TOTALES DE CALOR EN EL BIODIGESTOR**

$$\dot{Q}_{T2} = \dot{Q}_{LS} + \dot{Q}_{cg} + \dot{Q}_{cond} = 469.269W$$

### **FLUJO DE CALOR UTIL PARA EL BIODIGESTOR**

$$\dot{Q}_U = \dot{Q}_{T2} - \dot{Q}_{T1} = 1509.141W$$

### **EFICIENCIA DEL SISTEMA**

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{\dot{Q}_{suministrado}} * 100\% = \frac{\dot{Q}_U}{\dot{Q}_{T1}} = \frac{1509.14}{1978.41} * 100\% = 67\%$$

### **3.3.- EVALUACION DEL DIGESTOR EN VACIO SIN INVERNADERO**

Se evaluó la temperatura en el interior del digestor en función de la temperatura exterior o temperatura ambiente. De la figura (2-9) utilizaremos los sensores  $T_g$  del suelo,  $T_a$  del ambiente y  $T$  temperatura en el interior del digestor sin carga y otros parámetros ambientales como energía solar y humedad relativa.

FECHA DE EVALUACION: del 10 marzo al 10 de abril 2010

Evaluación del digestor en vacío sin invernadero en los mes de marzo – abril

Tabla. (3-1): Datos evaluados del digestor en vacío sin invernadero. Valores medios diarios

DIA	T <sub>a</sub> (°C)	HR (%)	T(°C)	T <sub>g</sub> (°c)	I (W/m <sup>2</sup> )
10/03/2010	9	85	10	12	1100
12	9.5	83	17	11	1030
14	11.5	81	18	12	1125
16	13	85	16	12	1000
18	13.5	86	14	12	1050
20	15	87	21	12	1025
22	11	85	19	12	1000
24	12	86	18	12	1010
26	13.5	87	22	12	900
28	11.5	82	16	13	1000
30	13.5	88	15	13	925
2/04/2010	14	82	18	13	1010
4	12.25	81	17	13	925
6	12.65	80	14	13	900
8	13.25	85	13	12	950
10	13.75	84	13	12	900

LEYENDA: T<sub>a</sub> (temperatura en el exterior del invernadero), HR (humedad relativa), T (temperatura en el interior del digestor vacío), T<sub>g</sub> (temperatura del suelo alrededor del digestor), I (irradiancia w/m<sup>2</sup>).



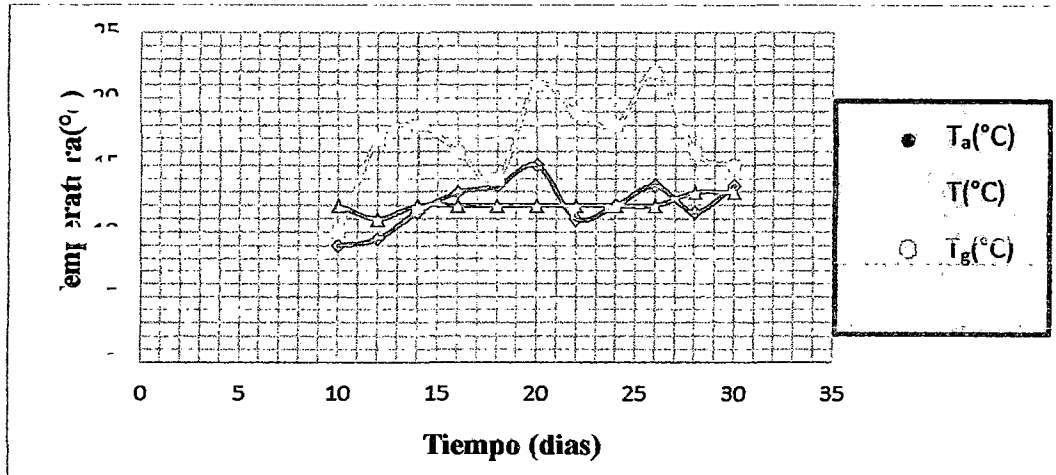


Gráfico. (3-3): Curvas de temperaturas del digestor en vacío sin invernadero

**Discusión. A:** En el gráfico (3-3) observamos que el aire dentro del sistema se calienta y se enfría a medida que la temperatura exterior sube o baja, pero no se mantiene constante, mientras que la temperatura del suelo se mantiene constante en todo momento.

### 3.4.- EVALUACION DEL DIGESTOR EN VACIO CON INVERNADERO

Evaluación del digestor en vacío con invernadero en los meses de abril – mayo-

En esta evaluación se toma en cuenta las temperaturas  $T_a$  fuera del invernadero,  $T_{a,0}$  dentro del invernadero,  $T$  en el interior del digestor,  $T_g$  temperatura en los alrededores del digestor.

Tabla. (3-2): Datos evaluados en vacío con invernadero. Valores medios diarios

tiempo( días)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>d,0</sub> (°C)	HR (%)	T(°C)	T <sub>g</sub> (°C)	I(W/m <sup>2</sup> )
10/04/2010	12	12.4	58	15	12	900
12	14	16.6	70	16	12	1000
14	13	20.7	73	17	14	925
16	11.8	25	75	18	13	1010
18	12.8	27.8	71	15	10	925
20	13	28.7	68	14	14	900
22	12	26.6	59	15	13	950
24	16	25.1	47	18	12	900
26	12.7	18.4	42	17	15	1100
28	13.2	24.8	48	19	15	1030
30	10.4	21.8	51	21	14	1125
2/05/2010	14.3	24	52	16	13	1000
4	12.8	29.5	66	16	12	1050
6	11.4	27.1	65	16.2	13	1025
8	12	19.5	50	16.2	14	1000
10	13.6	19	42	16	12	1010

LEYENDA: T<sub>a</sub> (temperatura en el exterior del invernadero), T<sub>d,0</sub>(temperatura en el interior del invernadero), HR(humedad relativa), T(temperatura en el interior del digestor vacío), T<sub>g</sub> (temperatura del suelo alrededor del digestor), I (irradiancia W/m<sup>2</sup>).

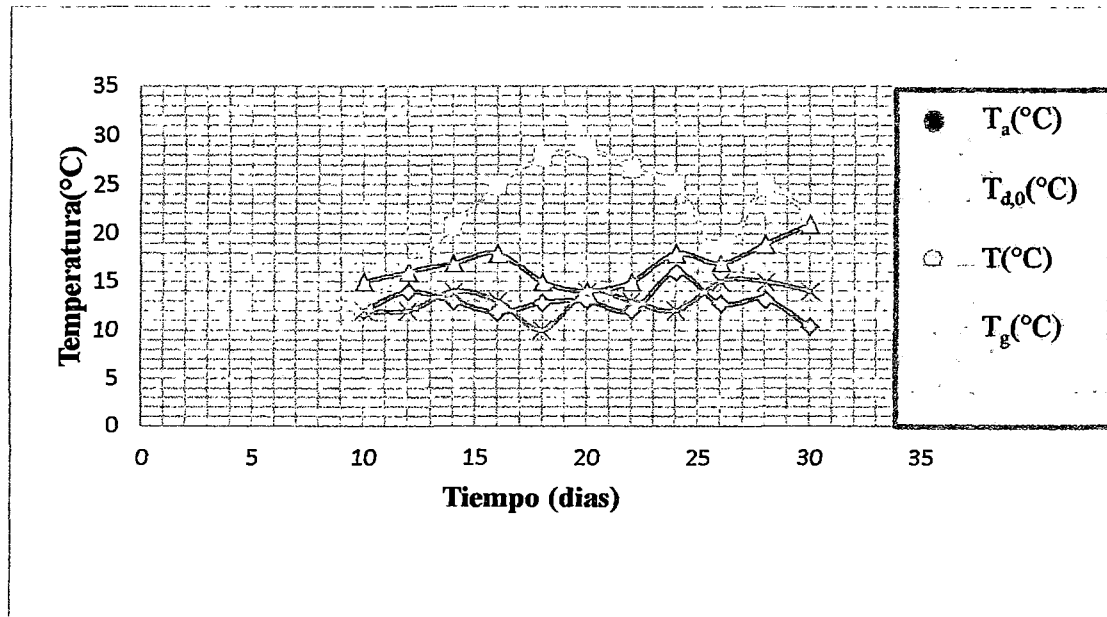


Gráfico. (3-4): Curvas de temperaturas del digestor en vacío con invernadero

**Discusión. B:** El gráfico (3-4) observamos que la temperatura en el interior del invernadero es superior a la temperatura exterior en 10°C aproximadamente, lo cual hace que la temperatura en el digestor aumente en forma ascendente y se mantenga constante. La temperatura en el suelo se mantiene constante superando los rangos de temperatura del caso anterior, mostrándose un incremento por el efecto invernadero.

### 3.5. EVALUACION DEL DIGESTOR CARGADO CON AGUA SIN INVERNADERO

La figura (2-10) muestra los sensores instalados para la evaluación de temperaturas medias diarias en el digestor, analizaremos los parámetros sin invernadero: temperatura en el exterior del invernadero o del ambiente  $T_a$ , temperatura del agua  $T$ , temperatura del aire o gas por encima del agua  $T_d$  y la temperatura del suelo  $T_g$ . También se miden los parámetros ambientales como Irradiancia y humedad relativa.

Tabla (3-3): Datos evaluados del digestor con carga de agua sin invernadero. (Valores medios diarios)

Tiempo(días)	T <sub>a</sub> (°c)	T(°c)	T <sub>d</sub> (°c)	T <sub>g</sub> (°c)	I(W/m <sup>2</sup> )	HR.(%)
14/05/2010	15,6	10	11	12	319,5	65,5
16	15,6	10	12	12	363,75	56,5
18	12,2	10	12	12	327,5	56
20	12	10	13	12	172,75	65
22	12,4	10	14	12	339,75	60
24	12,5	10	14	12	377,75	53,5
26	12,2	10	13	12	331	58,75
28	13,5	9	14	12	341,75	56,25
30	13,5	9	13	11	333	54
02/06/2010	10,8	9	12	12	318,25	57
4	10,4	9	13	11	273,75	71,75
6	12	11	13	11	348,75	56,5
8	12,3	11	12	12	357,25	60,75
10	12,7	11	12	11	303	50,25
12	12,6	11	13	11	397	47,75
14	15,2	10	13	11	440	50,2

LEYENDA: T<sub>a</sub>(temperatura en el exterior del invernadero), T (temperatura del agua cargada en el digestor), T<sub>d</sub> (temperatura del vapor de agua o gas), T<sub>g</sub> (temperatura del suelo alrededor del digestor), I (irradiación W/m<sup>2</sup>), HR (humedad relativa).

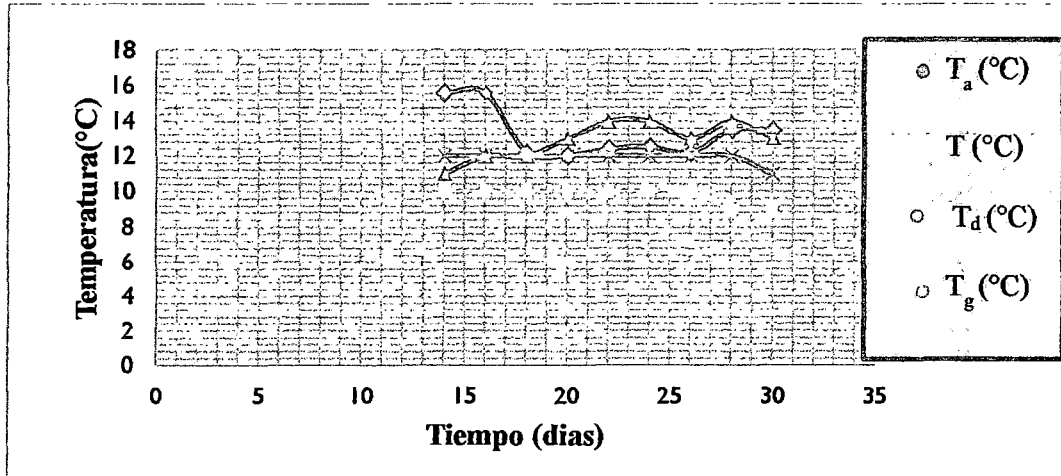


Gráfico. (3-5): Curvas de temperaturas del digestor con carga de agua sin invernadero

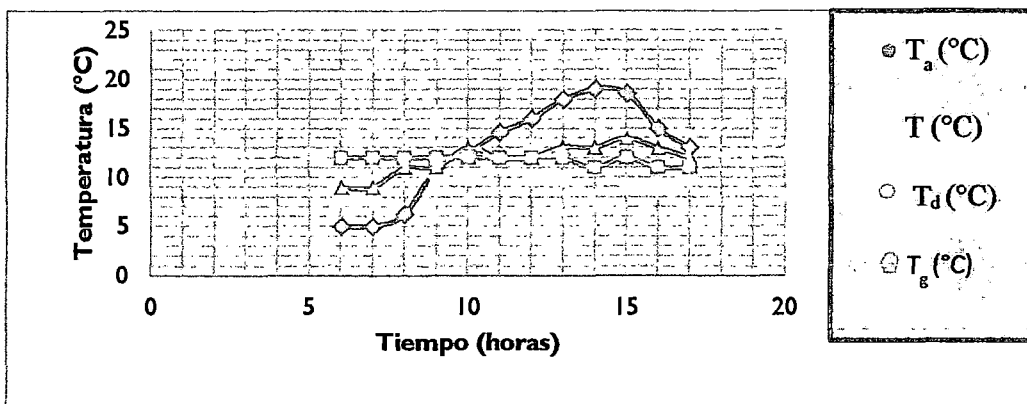


Gráfico. (3-5a): Evaluación con carga de agua, sin invernadero (datos diarios)

**Discusión. C:** si observamos el grafico (3-5) vemos que la temperatura en el agua T es menor a todas las temperaturas medidas y se mantiene constante, mientras que la temperatura en el gas o aire T<sub>d</sub> varía de acuerdo a la temperatura exterior T<sub>a</sub>, así mismo la temperatura del suelo T<sub>g</sub> se mantiene constante sin aumento alguno. Este análisis nos indica que si utilizaríamos el digestor sin invernadero y sin calentar la lechada o lodo, tendríamos estas temperaturas, lo cual no son apropiadas para su funcionamiento.

Si observamos los datos de un día (3-5a) en cada hora vemos que las temperaturas ambientales varían desde 5°C en horas de la mañana llegando hasta una temperatura de 19°C en horas de sol. Esto hace que las temperaturas en el interior del digestor cambien pero no se mantiene constante. Debido a que no cuenta con un invernadero para estabilizar ese aumento de temperatura.

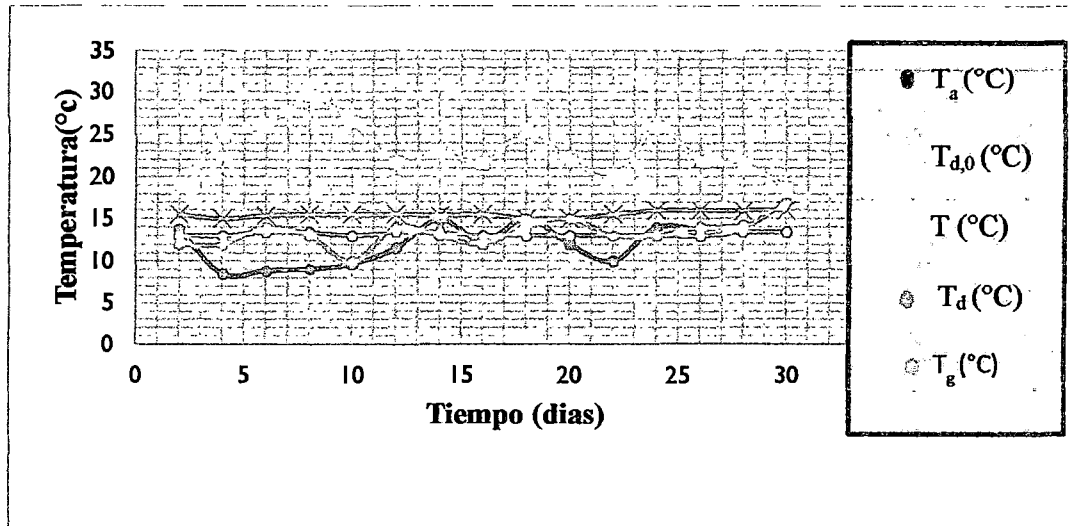
### 3.6. EVALUACION DEL DIGESTOR CARGADO CON AGUA Y CON INVERNADERO INSTALADO

De acuerdo a la figura (2-10) se evalúa con los sensores instalados incluyendo el invernadero y se tienen los siguientes datos experimentales. Junio 2010

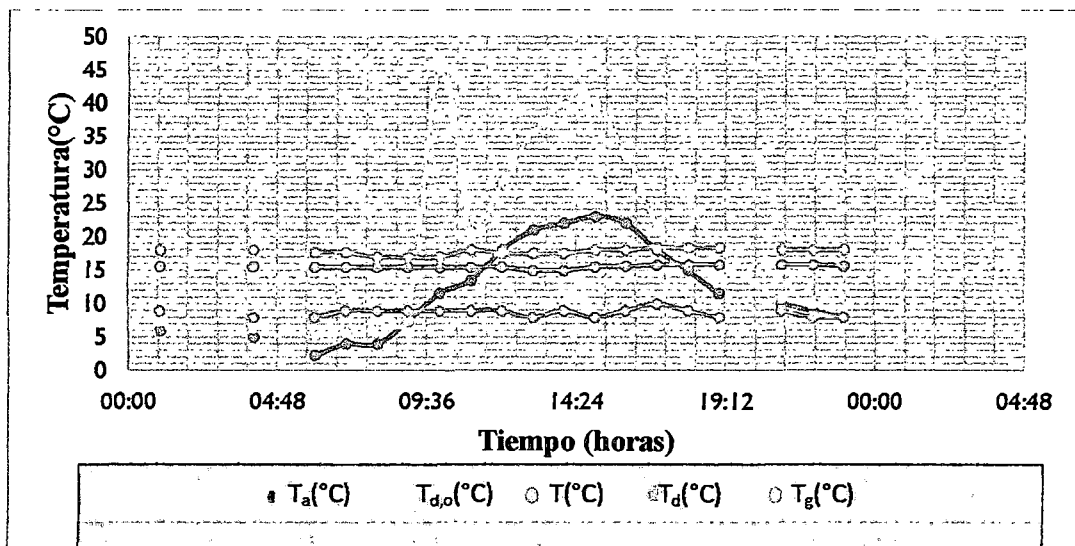
Tabla. (3.4): Datos evaluados del digestor con carga de agua, con invernadero (evolución de temperatura medias diarias)

Tiempo(días)	Ta(° c)	T <sub>d0</sub> (°C)	T(° c)	T <sub>d</sub> (° c)	T <sub>g</sub> (° c)	I(W/m <sup>2</sup> )	HR (%)
2/06/2010	12	19.2	13	15.5	12	500	74
4	13.8	24.7	13	15	12	596	69
6	8.5	26	13.4	15.4	14	616	74
8	8.9	29.5	13.4	15.5	13	92	69
10	9.1	26.4	13	15.5	10	101	65
12	9.7	21.7	13.4	15.5	14	168	65
14	11.6	22.8	13.4	15.4	13	300	58
16	14.9	21.6	13	15.5	12	402	50
18	12.3	25.3	13	15	14	501	44
20	15	22	13	15	15	589	43
22	12	20.1	13	15.5	13	716	40
24	10	25.9	13	16	13	780	41
26	14	21.9	13	16	14	799	37
28	13.8	21.6	13.4	16	14	337	42
30	14.2	18.7	13.4	16	17	249	41

LEYENDA: T<sub>a</sub> (temperatura en el exterior del invernadero), T<sub>d0</sub> (temperatura en el interior del invernadero), T(temperatura del agua cargada en el digestor), T<sub>d</sub>(temperatura del vapor de agua o gas), T<sub>g</sub>(temperatura del suelo alrededor del digestor), I (irradiancia W/m<sup>2</sup>), HR(humedad relativa).



**GRAFICO. (3-6):** Evolución de temperaturas diarias en el digester con carga de agua, con invernadero



**GRAFICO (3-6a):** Evaluación del digester con carga de agua (evolución diaria)

**Discusión. D:** Del grafico (3-6) la temperatura dentro del invernadero es superior a las demás temperaturas, por lo tanto la temperatura en el digester tiene un incremento considerable. Si observamos las temperaturas en un día, grafico (3-6a), las temperaturas en el interior del digester se mantienen constantes mostrando un incremento a los datos

tomados sin invernadero en el caso anterior. Esto determina que cuando cargamos el lodo a una determinada temperatura esta se mantendrá constante, por el mismo hecho de que el sistema está aislado en condiciones favorables como para mantener una temperatura de carga. Este análisis es determinante para utilizar un digestor de este tipo, lo cual funcionara sin duda alguna con las características mostradas.

### **3.7. EVALUACION DE LA PRIMERA CARGA**

La primera carga se realizó a inicios del mes de julio del año 2010 utilizando, materia orgánica estiércol de chivo y paja de trigo (seco), haciendo la mezcla con agua caliente a 57°C de temperatura, obteniéndose finalmente una temperatura de la mezcla 15°C

Material utilizado: Estiércol de chivo seco desmenuzado (300kg), con paja de trigo seco picado (60 kg).

Volumen total de carga : 4209 litros

Temperatura de agua caliente : 57°C

Temperatura de la mezcla : 15°C

Relación de mezcla material - agua : 1/3 para material seco.



**TABLA. (3-5):** Parámetros ambientales medidos en promedios semanales

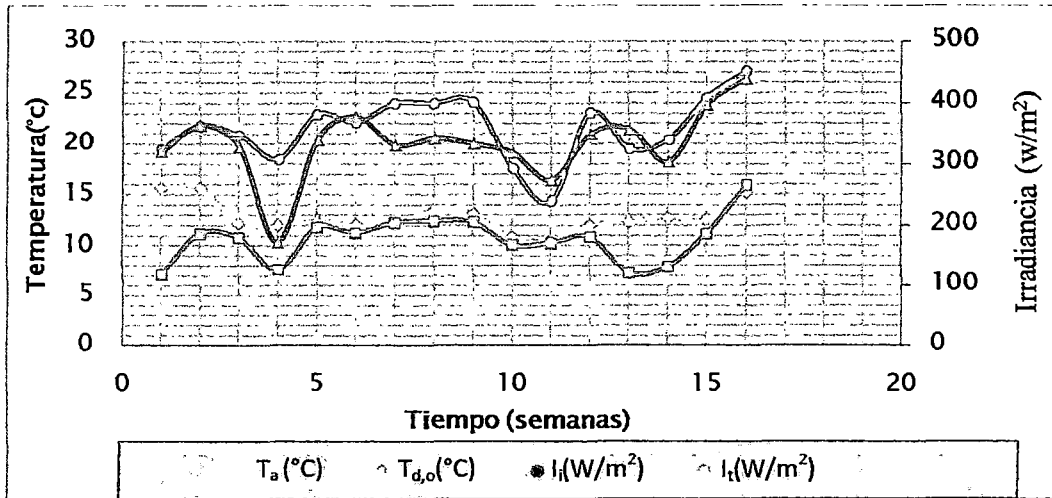
PARAMETROS AMBIENTALES JULIO - OCTUBRE						
tiempo(semanas)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>d,0</sub> (°C)	HR <sub>in</sub> (%)	I <sub>i</sub> (W/m <sup>2</sup> )	I <sub>t</sub> (W/m <sup>2</sup> )	H (KWh/m <sup>2</sup> )
1	15.675	19.525	65.5	319.5	118.5	4.51
2	15.675	21.8	56.5	363.75	186.75	4.67
3	12.25	20.85	56	327.5	180	5.06
4	12	18.5	65	172.75	126.75	5.39
5	12.45	22.9	60	339.75	196.75	5.66
6	12.125	22.125	53.5	377.75	188.5	5.93
7	12.2	23.975	58.75	331	205	5.94
8	13.5	24	56.25	341.75	207.25	5.94
9	13.125	24.125	54	333	206	4.88
10	10.875	17.575	57	318.25	168.25	3.63
11	10.45	14.375	71.75	273.75	171.25	5.113
12	12	23.075	56.5	348.75	180.75	4.41
13	12.375	19.475	60.75	357.25	121.25	4.09
14	12.75	20.4	50.25	303	131.5	4.15
15	12.625	24.525	47.75	397	187.25	4.3
16	15.21	27.12	50.17	440	265.17	4.55

LEYENDA: T<sub>a</sub> (temperatura exterior del digestor); T<sub>d,0</sub>(temperatura en el interior del digestor); HR<sub>in</sub>(humedad relativa en el interior del invernadero); I<sub>i</sub> (Irradiancia incidente); I<sub>t</sub> (Irradiancia transmitido); H (irradiación).

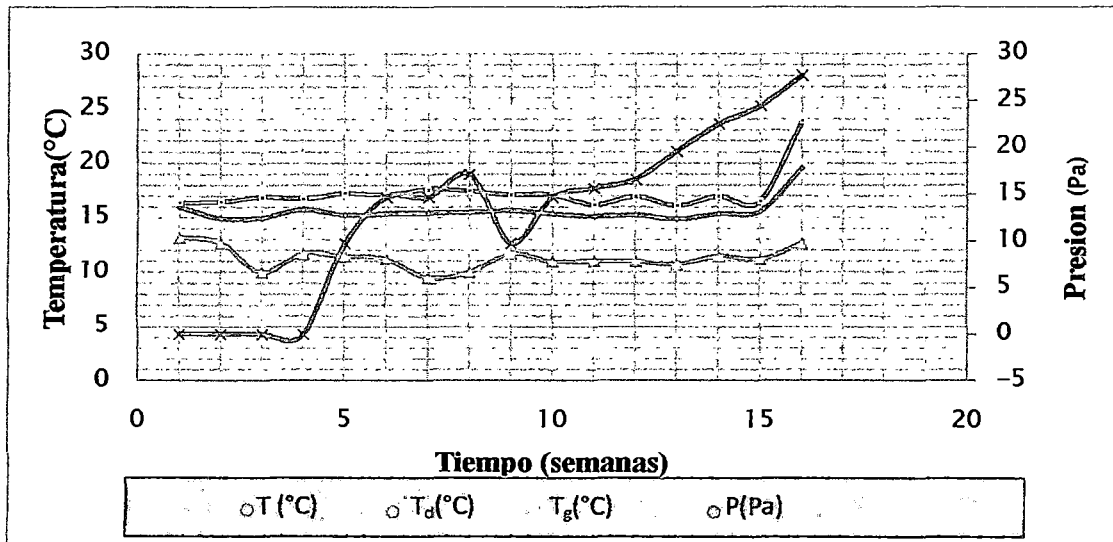
**TABLA. (3-6):** Parámetros en el digestor medidos en promedios semanales

PARAMETROS DEL DIGESTOR JULIO – OCTUBRE					
tiempo(semanas)	T(°C)	T <sub>d</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°C)	P(mm.H <sub>2</sub> O)	P(P <sub>a</sub> )
1	16	16.375	13.25	0	0
2	14.95	16.475	12.75	0	0
3	15	16.9	10	0	0
4	15.75	16.775	11.75	0	0
5	15.25	17.25	11.5	1	9.8
6	15.375	17.125	11.25	1.5	14.7
7	15.45	17.625	9.5	1.5	14.7
8	15.5	17.475	10	1.75	17.15
9	15.65	17.125	11.75	1	9.8
10	15.375	17.125	11	1.5	14.7
11	15.125	16.2	11	1.6	15.68
12	15.25	16.95	11	1.7	16.66
13	14.875	16.125	10.75	2	19.6
14	15.375	16.975	11.5	2.3	22.54
15	15.625	16.525	11.25	2.5	24.5
16	19.55	23.89	12.75	2.83	27.734

LEYENDA: T (temperatura en el lodo o lechada); T<sub>d</sub>(temperatura en el gas); T<sub>g</sub>(temperatura en el suelo); P(mmH<sub>2</sub>O) (presión en mm de agua); P(p<sub>a</sub>) (presión en pascales).



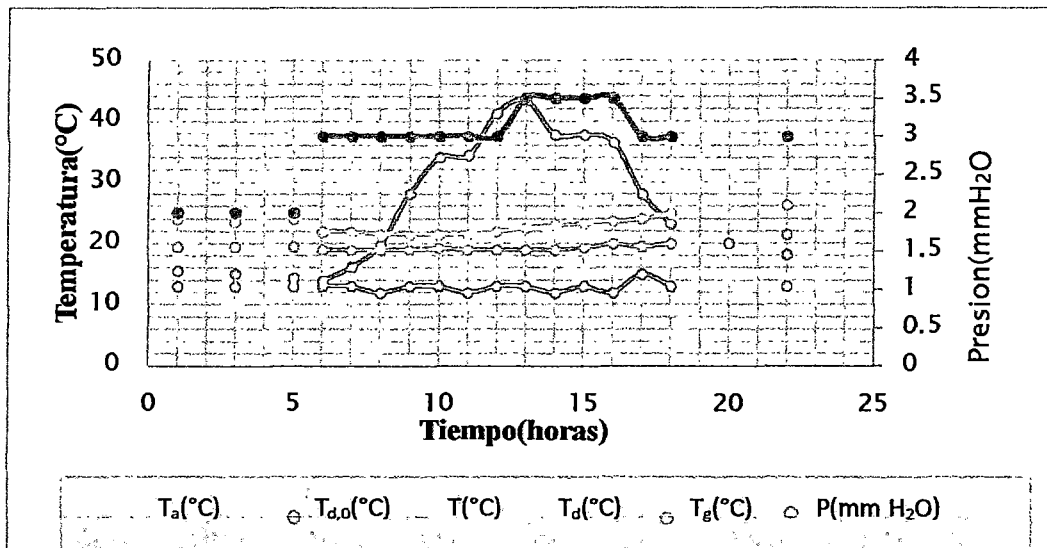
**GRAFICO. (3-7):** evolución de los parámetros ambientales en promedios semanales



**GRAFICO. (3-8):** Evolución de temperaturas en el digestor (promedios semanales)

**Discusión. E:** El gráfico (3-7) muestra los parámetros ambientales que determinan el comportamiento térmico del digestor, la temperatura en el exterior  $T_a$ , así como en el interior  $T_{d,o}$ , del invernadero, la irradiancia incidente y transmitida. En particular, la temperatura en el interior del invernadero es fundamental para garantizar que las temperaturas en el lodo, gas y el suelo (gráfico 3-8) sean suficientes, para que el digestor funcione correctamente. Este propósito ha sido concretado con éxito tal como se evaluado teóricamente en la gráfica (3-2) produciéndose un aumento de temperatura en el sistema de 5 a 7°C por el efecto invernadero y el calentamiento de la lechada, ya

que se consiguió elevar la temperatura equilibradamente en el lodo, en el gas y en el suelo como se observa en el grafico (3-7). Un caso particular podemos observar el análisis del digestor en un día soleado. Ver gráfico (3-8a), en este grafico observamos claramente que la temperatura en el interior del invernadero  $T_{d,0}$  es superior llegando a una temperatura por encima de los  $40^{\circ}\text{C}$ , lo cual eleva la temperatura en el lodo  $T$  hasta una temperatura apreciable de  $20^{\circ}\text{C}$  y esta se mantiene constante, de la misma forma las temperaturas en el gas  $T_d$  y en el suelo  $T_g$  se mantienen constantes mostrando un incremento progresivo.



**GRAFICO (3-8a).** Evolución de temperaturas en el digestor en un día

### 3.8. EVALUACION DE LA SEGUNDA CARGA

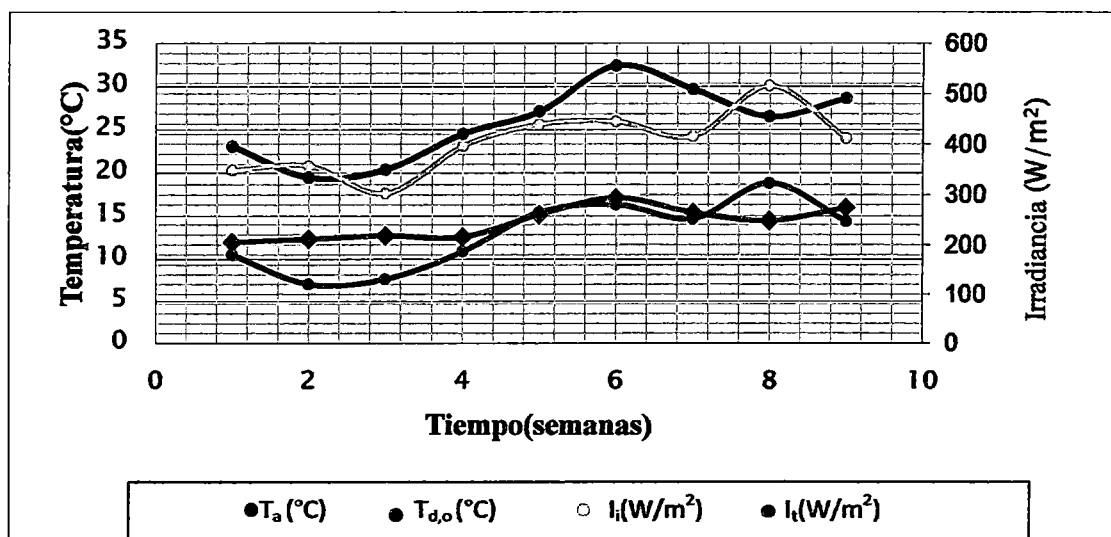
La segunda carga se realizó en el mes de noviembre año 2010 utilizando, materia orgánica estiércol de vacuno fresco haciendo la mezcla con agua precalentada, obteniendo se una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ . Este proceso se realizó sin descargar la carga anterior, una vez que ya no se produjo gas. Esto implica que cuando se quiere aplicar otra carga con otro material diferente, se tiene que esperar que el material anterior deje de producir gas dejando de cargar continuamente durante 20 días y en seguida aplicar otro tipo de material orgánico.

Material utilizado : Estiércol vacuno fresco (120kg).  
 Volumen total de carga : 220 litros  
 Temperatura de agua caliente : 58°C  
 Temperatura de la mezcla : 15°C  
 Relación de mezcla material - agua : 1/1 para material fresco

**TABLA. (3-7):** Parámetros ambientales de la segunda carga tomados en promedios semanales

PARÁMETROS DEL AMBIENTE NOVIEMBRE-DICIEMBRE						
tiempo(semanas)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>d,0</sub> (°C)	HR <sub>in</sub> (%)	Ii(W/m <sup>2</sup> )	It(W/m <sup>2</sup> )	H (KWh/m <sup>2</sup> )
1	12	23.075	56.5	348.75	180.75	4.41
2	12.375	19.475	60.75	357.25	121.25	4.09
3	12.75	20.4	50.25	303	131.5	4.15
4	12.625	24.525	47.75	397	187.25	4.3
5	15.21	27.12	50.17	440	265.17	4.55
6	17.17	32.43	42.17	445.33	280.83	5.15
7	15.44	29.7	49.25	416	252.625	5.9
8	14.5	26.55	49.5	516	323.5	5.35
9	16	28.65	46.5	412	247	4.75

**LEYENDA:** T<sub>a</sub> (Temperatura en el exterior del invernadero); T<sub>d,0</sub> (temperatura en el interior del invernadero); HR<sub>in</sub> (humedad relativa en el interior del invernadero); Ii (Irradiancia incidente); It (Irradiancia transmitida); H (irradiación).

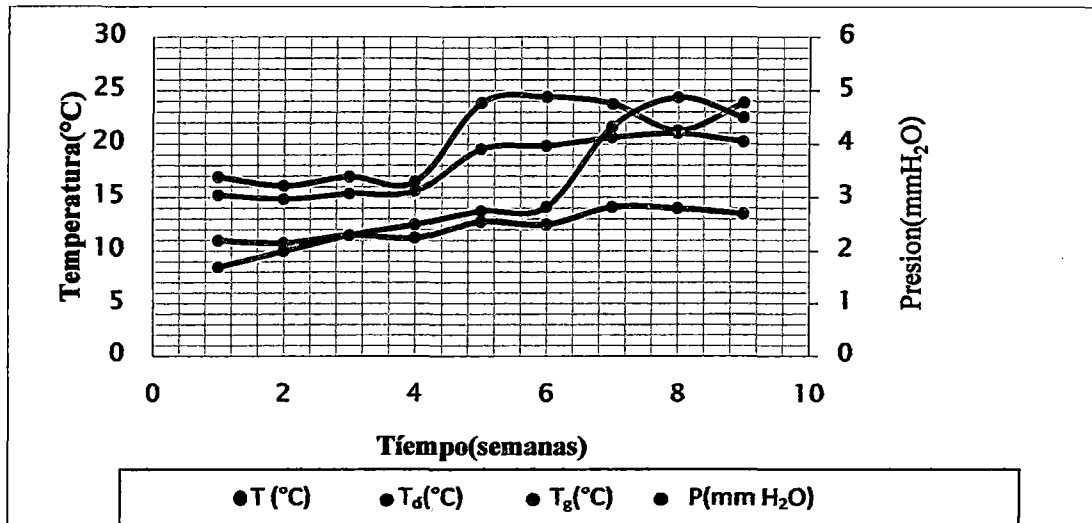


**GRAFICO. (3-9): Evolución de los parámetros ambientales medidos en promedios semanales**

**TABLA. (3-8): Parámetros del digestor evaluados en la segunda carga (promedios semanales)**

PARÁMETROS DEL DIGESTOR NOVIEMBRE-DICIEMBRE				
tiempo(semanas)	T(°C)	T <sub>d</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°C)	P(mm.H <sub>2</sub> O)
1	15.25	16.95	11	1.7
2	14.875	16.125	10.75	2
3	15.375	16.975	11.5	2.3
4	15.625	16.525	11.25	2.5
5	19.55	23.89	12.75	2.75
6	19.87	24.43	12.5	2.83
7	20.625	23.7875	14.125	4.33
8	21	21.3	14	4.875
9	20.27	23.9	13.5	4.5

**LEYENDA:** T (temperatura en el lodo o lechada); T<sub>d</sub> (temperatura en el gas); T<sub>g</sub> (temperatura del suelo); P (presión del gas).



**GRAFICO. (3-10): Evolución de las temperaturas en el digestor en la segunda carga.**

**Discusión. H:** en la segunda carga los parámetros continúan en evolución porque el digestor ya estaba preparado con la anterior carga, como podemos observar las temperaturas en el lodo, en el gas y en el suelo han aumentado con relación a los parámetros ambientales mostrados en el grafico (3-10). La temperatura el en lodo en las primeras semanas bordea los 15°C y a partir de la quinta semana se observa un aumento llegando hasta una temperatura de 22°C

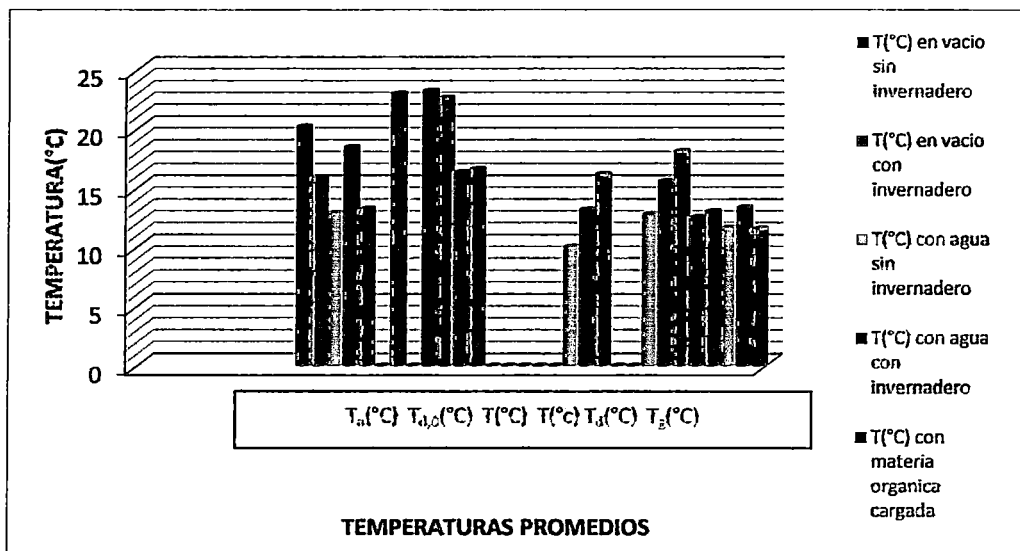
### **3.9. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE LA EVALUACION DEL DIGESTOR**

Tomando en cuenta las diferentes etapas de evaluación nuestro principal parámetro es la temperatura, por lo cual se evaluara la evolución de este parámetro. Así sabremos que valió la pena diseñar un prototipo con los objetivos mencionados, para este efecto tomaremos los promedios globales de temperaturas en las diferentes etapas. Ver Gráfico. [3-11]

**TABLA. (3-9):** Evolución de temperaturas durante la evaluación del digestor (promedios generales)

EVOLUCION DE LA TEMPERATURA						
TEMPERATURAS	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>d,0</sub> (°C)	T(°C)	T'(°C)	T <sub>d</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°C)
T(°C) en vacío sin invernadero	20.2	0	16.3	0	0	12.5
T(°C) en vacío con invernadero	15.8	22.9	17	0	0	13
T(°C) con agua sin invernadero	12.8	0	0	10	12.8	11.6
T(°C) con agua con invernadero	18.4	23.2	0	13.2	16	13.
T(°C) con materia orgánica cargada	13.2	22.6	0	16.3	18.2	14

**LEYENDA:** T<sub>a</sub>(temperatura en el exterior del invernadero), T<sub>d,0</sub> (temperatura en el interior del invernadero). T'(temperatura en el interior del digestor en vacío). T(temperatura del lodo o lechada), T<sub>d</sub>(temperatura del gas), T<sub>g</sub>(temperatura del suelo alrededor del digestor).



**GRAFICO (3-11):** Evolución de temperaturas durante la evaluación del digestor (promedios generales).



**Discusión. F:** la evolución de la temperatura es notable en el digestor por efectos del invernadero y aislamiento del sistema por el suelo y paredes como podemos observar el gráfico (3-11). La temperatura en el exterior del invernadero  $T_a$  es la temperatura del ambiente, el cual influirá en el sistema cuando el análisis se efectúa usando el invernadero, como podemos observar la evolución de la temperatura en el lodo  $T$ , cuando está cargado con agua sin invernadero alcanza una temperatura de  $10^\circ\text{C}$ , mientras que cuando usamos el invernadero podemos ver que la temperatura ha aumentado hasta una temperatura de  $13.6^\circ\text{C}$ .

Así mismo observamos la evolución de la temperatura cuando el digestor está cargado con materia orgánica obteniéndose una temperatura en el lodo de  $16^\circ\text{C}$  que será constante en todo el proceso de producción del biogás.

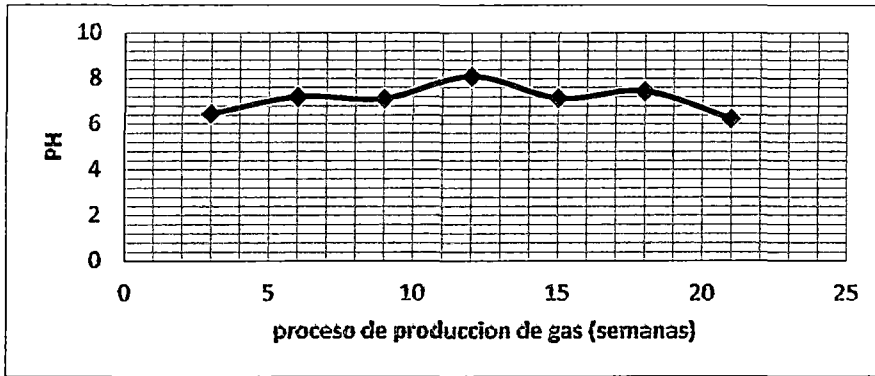
### 3.10 EVOLUCIÓN DEL PH

El pH es un parámetro muy importante que determina la acidez del material en descomposición, este parámetro debe ser controlado en un rango de 6.8 a 7.8 caso contrario la producción de metano disminuirá o será nula en el digestor.

**TABLA. (3-10):** Evolución del pH durante la producción de gas en la primera y segunda carga

tiempo (semanas)	PH	T( $^\circ\text{C}$ )
3	6.47	17.3
6	7.21	16.1
9	7.13	15.7
12	8.1	14.1
15	7.15	17.4
18	7.45	17.1
21	6.24	17.1

**LEYENDA:** pH (acidez o alcalinidad del material orgánico en descomposición), T( $^\circ\text{C}$ ) (temperatura registrada por el pH-metro)



**GRAFICO (3-12):** Evolución del pH durante la producción de gas.

**Discusión. G:** El pH es un parámetro fundamental el cual se tiene que cuidar en el rango establecido. el cual puede determinar la formación de metano. Como se puede observar el grafico (3-8). el rango de pH varía entre 6.24 a 7.8. el cual es óptimo para el normal funcionamiento de un digestor.

### 3.11 PRODUCCION DE BIOGAS Y BIOABONO

Cuando el régimen de fermentación dentro del digestor va se ha estabilizado. lo que ocurre luego de unos 65 días después de completada la primera carga. se inicia la producción de biogás (que se quema con una llama azul válida) y de bioabono (que puede aplicarse directamente en los suelos de cultivo. diluido si así conviene).

La producción de gas por día se calcula utilizando el depósito de almacenamiento de biogás que tiene un volumen de  $1.6m^3$ . que es llenado en tres días de este dato calculamos cuantos metros cúbicos de gas se produce al día. En nuestro digestor medimos la producción de  $0.53m^3$  de gas por día.

#### 3.11.1 PRODUCCION DEL BIOL.

El biol se forma durante el tiempo de retención de la materia orgánica y es expulsado con la producción de gas y es proporcional al volumen de carga diaria. una vez que se efectúa la carga el biol es expulsado por la presión interior. La producción del biol se mide por el volumen de carga produciéndose 10 litros aproximadamente en cada carga.

### 3.12. ANALISIS ECONOMICO

Se debe tener en cuenta que para montar un digestor, los costos depende básicamente de la tecnología que se use en él, así como también de los requerimientos de producción, teniendo presente que la implementación de un digestor no constituye un gasto, sino una inversión que traerá a mediano y largo plazo grandes beneficios económicos y ambientales a la población.

Los costos de los materiales se basaron en precios de nuestro medio.

#### 3.12.1 COSTOS DE MATERIALES

Los costos de los materiales son uno de los factores determinantes en la aplicación de los digestores y por tal razón se realizó el diseño con el objetivo optimizar el uso de materiales para evitar altos costos a los inversionistas del proyecto.

TABLA. (3-11): materiales y costos

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNIT (S/.)	PRECIO TOTAL (S/.)
Alambrón	50 kilos	3.5	175
Cemento	30 bolsas	22	660
Arena	3 cubos	50	150
Piedra	1 cubos	50	50
Plástico polietileno	24.50m <sup>2</sup>	12	294
Palos de eucalipto de diferentes tamaños	20 unidades	10	200
Ladrillo mecanizado de 12 huecos	700 unidades	0.3	210
Tubo pvc de 6" de 5m de largo	1 unidad	90	90
Tubo pvc de 1/2" de 6m de largo	3 unidades	12	36
Impermeabilizante	2 baldes	20	40
Arcilla	10 kilogramos	1	10
Polietileno expandido	12m*3m*0.6m	5	60
Equipos	8 tipos	50	400
<b>TOTAL</b>			<b>2375</b>

En esta tabla constan materiales necesarios para la construcción del digestor.

### 3.12.2. COSTOS DE MANO DE OBRA.

En la construcción del digestor están implicadas personas con conocimientos en obras civiles y albañilería especialistas en reservorios de agua.

**TABLA. (3-12): mano de obra**

DESCRIPCION	PERSONAS	PRESCIO UNIT. S/. PERSONAL- DIA	Nº DIAS	PRECIO TOTAL S/.
CONSTRUCCION DEL DIGESTOR	2	30	24	720
CONSTRUCCION DE LOS DEPOSITOS DE CARGA Y DESCARGA	2	30	7	210
<b>TOTAL</b>				<b>930</b>

**TABLA. (3-13): inversión inicial**

DESCRIPCION	VALOR (S/.)
COSTO DE MATERIALES EQUIPOS	2375
COSTO DE MANO DE OBRA	930
<b>TOTAL (S/.)</b>	<b>3305</b>

Estos valores fueron adquiridos a la fecha de estudio de este proyecto y por lo tanto para futuros estudios se deberán considerar la variación de los precios de materiales y mano de obra

### **3.12.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA**

Los beneficios directos del uso de la digestión pueden ser estimados en base al uso del biogás, como una fuente alternativa a energías no renovables, y a la aplicación del efluente como una sustitución de nutrientes aportados por fertilizantes químicos.

El valor comercial del biogás como fuente de energía será estimado en su equivalente en valor energético de un combustible fósil que puede ser reemplazado por el uso de biogás. Un combustible comúnmente utilizado en zonas rurales es el diesel o también puede ser el GLP.

El valor neto en calorías de  $1\text{m}^3$  de biogás equivale a la energía emitida por la combustión de 0.55 litros de diesel. Así, la producción anual es de  $193.45\text{m}^3$  de biogás ( $0.53\text{ m}^3/\text{ día}$ ) equivale a 106.39 Litros de diesel respectivamente. El valor comercial de un litro de diesel en Perú es de s/.3.50. Calculando la cantidad de biogás por su equivalente energético en diesel por su valor comercial, los beneficios directos derivados de la combustión de biogás ascienden a s/. 372.365 anuales.

Referente al valor económico del efluente, el precio por nutriente es calculado en base al valor comercial por kilo de cada nutriente de los fertilizantes químicos. El valor económico anual del efluente se obtiene mediante el análisis del contenido nutricional del material, multiplicado por el precio comercial por kilo de nutrientes como N (Urea al 50% de N), P ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y K ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Los valores comerciales de estos productos son; s/. 135 los 50 kg Urea, s/. 139 los 50 kg P y s/. 160 por el contenido de 50 kg de K. Para una producción anual de  $193.45\text{ m}^3$  de biogás ( $0.53\text{m}^3/\text{ día}$ ) se obtiene 26.32 Kg de N con un valor de s/. 71.064, 15 Kg de P con un valor de s/. 41.7 y 27.23 Kg de K con un valor de s/. 87.136.

**TABLA. (3-14): beneficios directos por el uso del biodigestor en un año**

BENEFICIOS	VALOR
<b>A. BIOGAS COMO COMBUSTIBLE</b>	
a. Producción de biogás (m <sup>3</sup> /año)	193.45
b. Equivalente neto a la combustión de combustible fósil (Litros diesel)	106.39
c. Precio comercial por unidad de combustible fósil (soles/Lt)	3.50
d. ahorro total anual por el uso de biogás (b*c) soles	372.365
<b>B. EFLUENTE COMO FERTILIZANTE</b>	
e. Nitrógeno (soles/año)	71.064
f. Fosforo (soles/año)	41.7
g. Potasio (soles/año)	87.136
h. Ahorro total anual por el uso del efluente (e+f+g) (soles)	199.9
<b>C. BENEFICIOS DIRECTOS TOTALES AL AÑO (d+h) s/.</b>	<b>572.265</b>

#### **3.12.4. BENEFICIOS DEL USO DE DIGESTOR EN UN PERIODO DE 20 AÑOS**

Los Beneficios Económicos Totales para el digestor se estimaron para un período de 20 años. Es importante recalcar que se consideró un descuento anual del 5 % en la ecuación de interés compuesto para encontrar el valor futuro. El descuento es una técnica aplicada para evaluar proyectos cuyos costos y beneficios varían a través del tiempo.

$$VF = VA*(1+i)^n$$

**VF:** Valor futuro

**VA:** Valor anual o inicial.

**n:** Número de anualidad o periodo.

**i:** Descuento anual

**TABLA. (3.15): beneficios económicos totales (s/.) derivados de la aplicación de un digester con una producción de biogás de 0.53m<sup>3</sup>/día.**

BENEFICIOS	AÑOS						
	0	1	2	5	10	15	20
VALOR DE BIOGAS	372.365	390.98	410.55	475.25	606.56	774.12	987.99
VALOR DEL EFLUENTE	199.9	209.89	220.39	255.13	325.62	415.58	530.39
BENEFICIOS TOTALES (SOLES)	572.265	600.87	630.94	730.38	932.18	1189.7	1518.38
COSTOS							
MATERIALES Y EQUIPOS	2375	0	0	0	0	0	0
MANO DE OBRA	930	0	0	0	0	0	0
COSTOS TOTALES (SOLES)	3305	0	0	0	0	0	0
BENEFICIOS NETOS POR AÑO (SOLES)	-2732.735	600.87	630.94	730.38	932.18	1189.7	1518.38

Estas tablas muestran los diversos beneficios a través de los años de la tecnología de la digestión y pueden sugerir su implementación como fuente de combustible y bioabono.

En términos económicos los beneficios que presenta la utilización del biodigestor significa un ahorro en el primer año de s/. 572.265 para una producción de 0.5 m<sup>3</sup> de biogás por día, considerando que en menos de 4 años se podrá recuperar la inversión inicial

## CONCLUSIONES.

1. El reforzamiento estructural del fondo y paredes del biodigestor con fierro corrugado de 1/8", mejora su comportamiento estructural ante situaciones de deslizamientos, hundimientos y sismos.
2. Las cargas calientes al inicio del proceso: mezcla de agua caliente (de una terma solar) y materia orgánica incrementa la temperatura de la lechada entre 1 a 7°C.
3. El empleo de orines de ganado u otros insumos activan temporalmente las reacciones químicas del biodigestor pero no incrementan significativamente la temperatura de la lechada.
4. El efecto del aislamiento del fondo y paredes del digestor reducen las pérdidas de calor en 204W aproximadamente comparado a un sistema sin aislamiento.
5. El efecto del invernadero sobre el biodigestor incrementa la temperatura de la lechada (T) en aproximadamente 5°C, tal como aparece en los cálculos teóricos en el grafico (3-2) y demostrados experimentalmente en la tabla (3-8)
6. El tiempo de conversión de biodigestor y producción de biogas en un biodigestor mejorado estructuralmente, con aislamiento e invernadero oscila entre 60 a 65 días en una altitud de 3340 m.s.n.m.
7. La producción anual de biogás se estima en 193.45m<sup>3</sup> por año produciéndose 0.53m<sup>3</sup> de biogás por día.
8. La producción de biol se estima en 10 litros diarios, así mismo la producción del bioabono se estima en 300kg por cada descarga.
9. La inversión inicial es relativamente alta, pero la vida útil de 20 años hace que la recuperación del Capital sea de 4 a 5 Años, los costos de mantenimiento y producción son relativamente bajos.



## RECOMENDACIONES.

- ✓ Tener mucho criterio en la construcción del domo del digestor, ya que esta es la parte principal donde se produce fisuras y grietas.
- ✓ Fijar la base del cantillón desde el comienzo hasta la culminación de la construcción del domo, sin cambiar de posición o moverlo ya que esta define la forma esférica sin deformaciones.
- ✓ Usar agua caliente para preparar la mezcla del material de carga para aumentar la temperatura en el digestor.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] biodigestores de bajo costo para climas andinos. VI congreso brasilero de agroecología: - Poggio, Davide. Instituto para una alternativa agraria (IAA) cusco-Perú.
- Paiva Prado, Mrgot. GIA, universidad nacional san Antonio abab del Cusco, Perú
- Ferrer , Ivet. GRECDH, Velo, Eric. GRECDH. Universidad politécnica de Catalunya, España
- [2] Difusión de la tecnología del biogás en Colombia: Proyecto CVC GTZ OEKOTOP
- [3] Manual nº 3 como construir un biodigestor: Energía desarrollo y vida (EDEVI)
- [4] Biogás: información general. Instituto centroamericano de investigación y tecnología industrial (ICAITI)
- [5] Taller Práctico sobre Bioenergía 3 de agosto de 2006, Monterrey N.L México: ING. JAIME LUIS SALDAÑA MÉNDEZ)
- [6] Instituto de Investigaciones Eléctricas de México, 1980
- [7] Análisis de Fourier: HWEI P. HSU
- [8] Física para ciencia y tecnología: PAUL A. TIPLER
- [9] Introducción a la termodinámica: JORGE A. RODRIGUES
- [10] A Heat – transfer Analisis of Fixed-Dome Biogas Plants: V. V. N. KISHORE (Instituto de investigación, 232 JorBagh new delhi 110003, India)
- [11] Ingeniería térmica de fluidos: Pedro Fernández Diez
- [12] Serway. Physics for Scientists and Engineers Sears, Z & Y. Física Universitaria
- [13] Evaluación del potencial de desarrollo de las energías renovables y su participación en el balance nacional de energía: Rafael L. Espinoza P. (CER UNI)
- [14] Web: INTERNET
- [14.1] <http://www.minem.gob.pe>
- [14.2] <http://www.mailxmail.com/curso-agua-sinerchia-3/energia-eolica-peru-1-3>
- [14.3] [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/elctricidad/2001\\_potenc\\_disponibl\\_ener\\_eolica.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/elctricidad/2001_potenc_disponibl_ener_eolica.pdf)

[14.4][http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia\\_solar.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia_solar.pdf)

[14.5][http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia\\_geotermica.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/energia_geotermica.pdf)

[14.6] [www.vaxasoftware.com/indexes.html](http://www.vaxasoftware.com/indexes.html)

[14.7]

([http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/2001\\_potenc\\_disponibl\\_ener\\_eolica.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/atlas/electricidad/2001_potenc_disponibl_ener_eolica.pdf))

# ANEXOS

**ANEXO 1:  
PROPIEDADES FISICAS DE LOS DIFERENTES MATERIALES DE  
CONSTRUCCION**

MATERIAL	Temperatura (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kg°K)	K (W/m°k)
Amianto	20	383	816	0.113
Ladrillo común	20	1800		0.38-0.52
Asfalto	20	2120		0.74 - 0.76
Ladrillo hueco	20			0.49
Baquelita	20	1270		0.233
Arcilla refractaria a 1330°C	500 – 800 – 1100	2000	0.96	1.04-1.07-1.09
Arcilla refractaria cocida a 1450°C	500 – 800 – 1100	2300	0.96	1.28-1.37-1.4
Arcilla (48.7%humedad)	20	1545	880	1.260
Hormigón (seco)	20	500	837	1.128
Corcho (tableros)	20	120	1880	0.042
Corcho (expandido)	20	120		0.036
Tierra arcillosa (28% de humedad )	20	1500		1.510
Tierra arenosa (8% de humedad)	20	1500		1.050
Fibra de vidrio	20	220		0.035
Lana de vidrio	20	100 – 200		0.036-0.040
Hielo (0°C)	20	913	1830	2.220
Yeso	20	1800		0.814
Corteza de pino	20	342		0.080
Mortero de cemento	20			0.02
Poliestireno	20	1050		0.157
Ladrillo de mampostería	20	1700	837	0.658

REFERENCIA: [11] Pedro Fernández Díez

### CONDUCTIVIDADES TERMICAS

Sustancia	k (W/m <sup>2</sup> K)
Aluminio	205.0
Latón	109.0
Cobre	385.0
Plomo	34.7
Mercurio	8.3
Plata	406.0
Acero	50.2
Ladrillo aislante	0.15
Ladrillo rojo	0.6
Hormigón	0.8
Corcho	0.04
Fieltro	0.04
Fibra de vidrio	0.04
Vidrio	0.8
Hielo	1.6
Lana mineral	0.04
Espuma depolietileno	0.01
Madera	0.12 - 0.04
Aire	0.024
Argón	0.016
Helio	0.14
Hidrógeno	0.14

REFERENCIA: [12] Serway. Physics for Scientists and Engineers  
Sears, Z & Y. Física Universitaria

**PRESION DE VAPOR DE AGUA A VARIAS TEMPERATURAS**

<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg	<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg	<i>T</i> °C	<i>P</i> mmHg
-15	1,436	38	49,692	91	546,05
-14	1,560	39	52,442	92	566,99
-13	1,691	40	55,324	93	588,60
-12	1,834	41	58,345	94	610,90
-11	1,987	42	61,504	95	633,90
-10	2,149	43	64,80	96	657,62
-9	2,326	44	68,26	97	682,07
-8	2,514	45	71,882	98	707,27
-7	2,715	46	75,65	99	733,24
-6	2,931	47	79,60	100	760,00
-5	3,163	48	83,71	101	787,57
-4	3,410	49	88,02	102	815,86
-3	3,673	50	92,511	103	845,12
-2	3,956	51	97,20	104	875,06
-1	4,258	52	102,09	105	906,07
0	4,579	53	107,20	106	937,92
1	4,926	54	112,51	107	970,60
2	5,294	55	118,04	108	1 004,42
3	5,685	56	123,80	109	1 038,92
4	6,101	57	129,82	110	1074,56
5	6,543	58	136,08	111	1111,20
6	7,013	59	142,60	112	1148,74
7	7,513	60	149,38	113	1187,42
8	8,045	61	156,43	114	1227,25
9	8,609	62	163,77	115	1267,98
10	9,209	63	171,38	120	1 489,14
11	9,844	64	179,31	125	1 740,93
12	10,518	65	187,54	130	2 026,10
13	11,231	66	196,09	135	2 347,26
14	11,987	67	204,96	140	2 710,92
15	12,788	68	214,17	145	3 116,76
16	13,634	69	223,73	150	3 570,48
17	14,530	70	233,71	175	6 694,08
18	15,477	71	243,9	200	11 659,16
19	16,477	72	254,6	225	19 123,12
20	17,535	73	265,7	250	29 817,84
21	18,650	74	277,2	275	44 580,84
22	19,827	75	289,10	300	64 432,8
23	21,068	76	301,4	325	90 447,6
24	22,377	77	314,1	350	124 001,6
25	23,756	78	327,3	360	139 893,2
26	25,209	79	341,0	365	148 519,2
27	26,739	80	355,11	366	150 320,4
28	28,349	81	369,7	367	152 129,2
29	30,043	82	384,9	368	153 960,8
30	31,824	83	400,6	369	155 815,2
31	33,695	84	416,8	370	157 692,4
32	35,663	85	433,62	371	159 594,8
33	37,729	86	450,9	372	161 507,6
34	39,898	87	468,7	373	163 468,4
35	42,175	88	487,1	374	165 467,2
36	44,563	89	506,1	374,11	165 808,0
37	47,067	90	525,76		

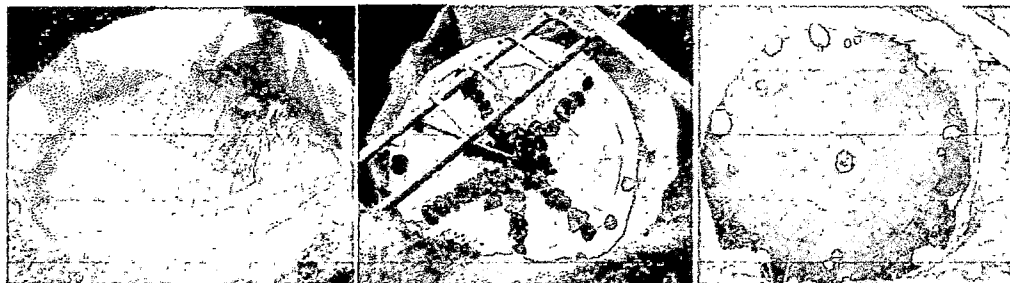
REFERENCIA: [4.6] [www.vaxasoft.com/indexes.html](http://www.vaxasoft.com/indexes.html)

<b>VALORES DE EMISIVIDAD DE MATERIALES COMUNES</b>	
<b><i>Material</i></b>	<b><i>Emisividad</i></b>
<b>Aluminio, pulido</b>	<b>0,05</b>
<b>Aluminio, superficie rugosa</b>	<b>0,07</b>
<b>Aluminio, muy oxidado</b>	<b>0,25</b>
<b>Placa de amianto</b>	<b>0,96</b>
<b>Tela de amianto</b>	<b>0,78</b>
<b>Papel de amianto</b>	<b>0,94</b>
<b>Pizarra de amianto</b>	<b>0,96</b>
<b>Latón, mate, deslustrado</b>	<b>0,22</b>
<b>Latón, pulido</b>	<b>0,03</b>
<b>Ladrillo, común</b>	<b>0,85</b>
<b>Ladrillo, vidriado, basto</b>	<b>0,85</b>
<b>Ladrillo, refractario, basto</b>	<b>0,94</b>
<b>Bronce, poroso, basto</b>	<b>0,55</b>
<b>Bronce, pulido</b>	<b>0,1</b>
<b>Carbón, purificado</b>	<b>0,8</b>
<b>Hierro fundido, fundición esbozada</b>	<b>0,81</b>
<b>Hierro fundido, pulido</b>	<b>0,21</b>
<b>Carbón, en polvo</b>	<b>0,96</b>
<b>Cromo, pulido</b>	<b>0,1</b>
<b>Arcilla, cocida</b>	<b>0,91</b>
<b>Hormigón</b>	<b>0,54</b>
<b>Cobre, pulido,</b>	<b>0,01</b>
<b>Cobre, bruñido comercial</b>	<b>0,07</b>
<b>Cobre, oxidado</b>	<b>0,65</b>
<b>Cobre, negro oxidado</b>	<b>0,88</b>
<b>Cinta aislante, plástico negro</b>	<b>0,95</b>

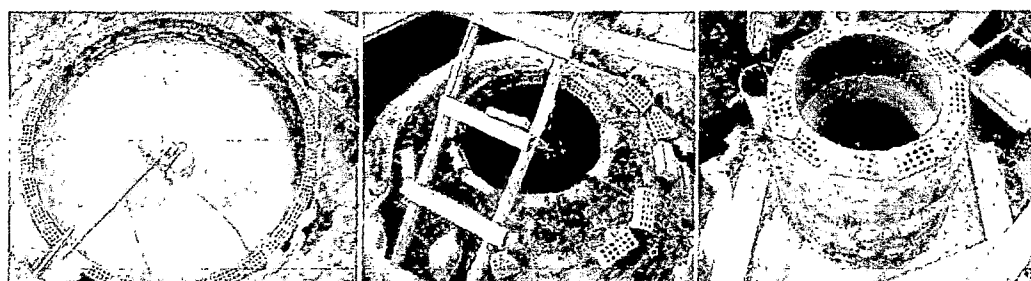
Referencia: [11] Pedro Fernández Díez



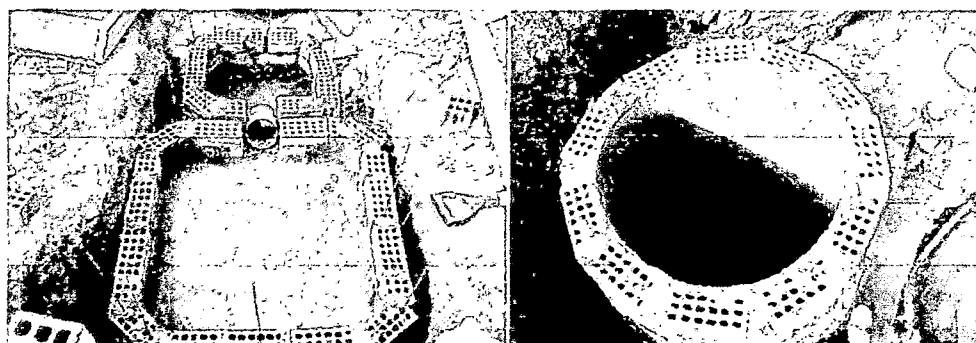
**ANEXO N° 2: FOTOS**



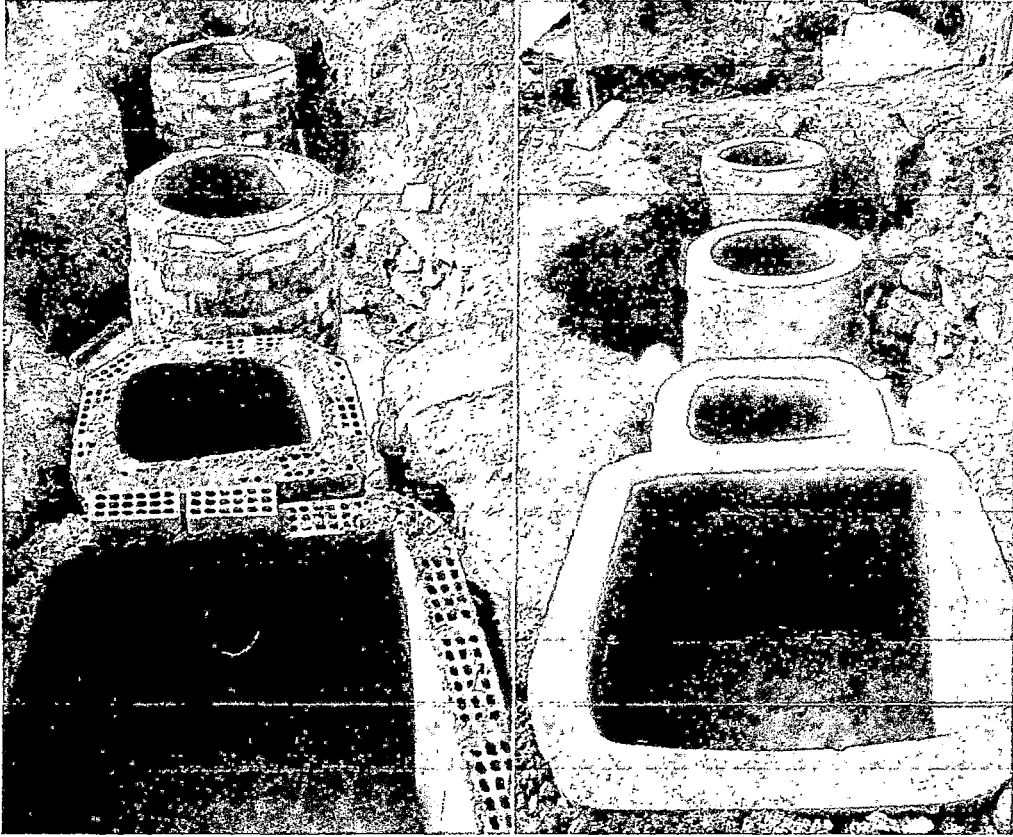
**Construcción de la placa de fondo y aislamiento térmico**



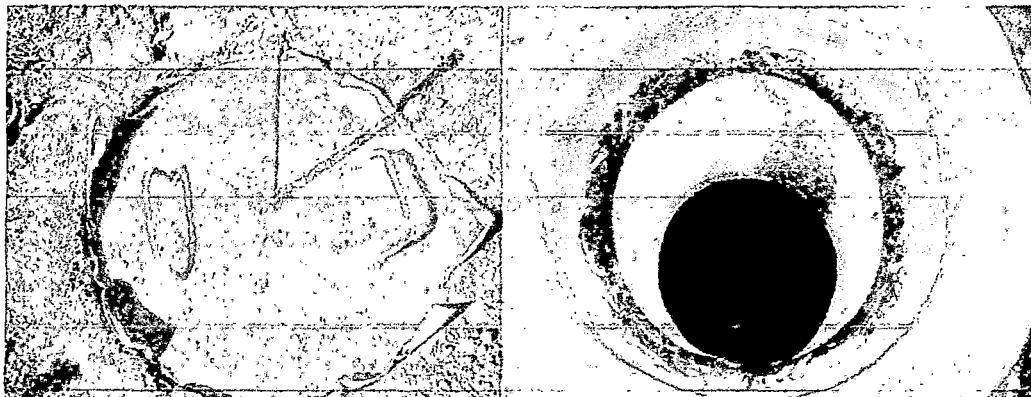
**Construcción del domo esférico**



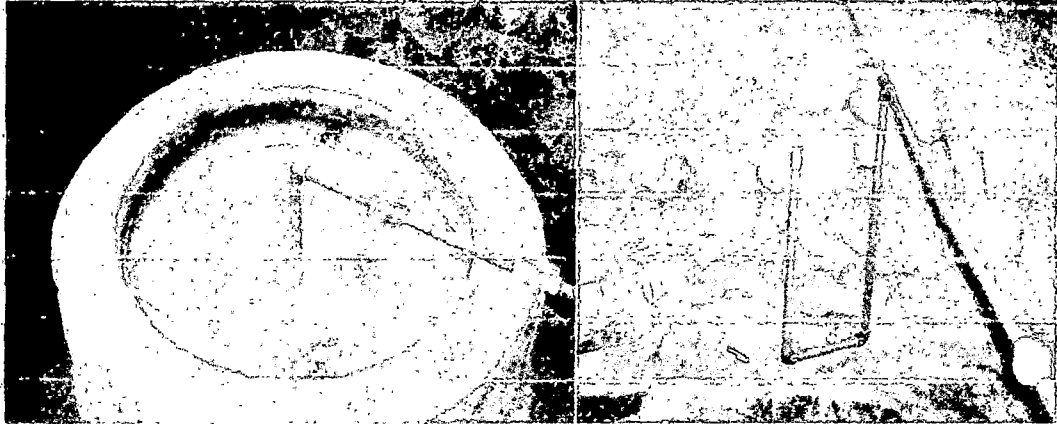
**Pozos de carga y descarga**



Planta de biogás completa

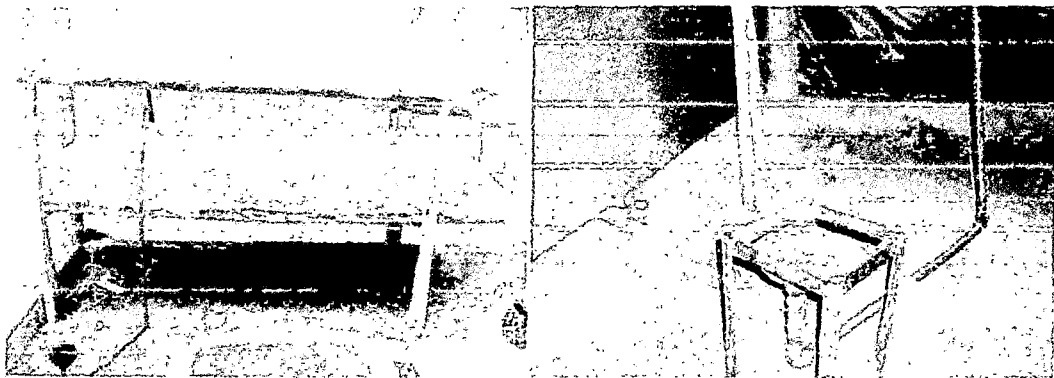


Construcción de la tapa y salida de gas



**Sello de agua en la salida de biogás**

**Trampa de vapor de agua**



**Depósito de biogás**

**Encendido del biogás**