



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Medioambiente

Ingeniería Ambiental

**ANÁLISIS TÉCNICO DE LA FACTIBILIDAD DE GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR
DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN EL CENTRO INTEGRAL DE
ATENCIÓN AL ESTUDIANTE UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

CLAUDIA ANDREA GONZÁLEZ VÁSQUEZ

PROFESOR GUÍA: MARÍA LORENA ÁLVAREZ SÁNCHEZ

Junio de 2023, Valparaíso

RESUMEN

En Chile una persona genera 1,19 kilos de residuos diariamente, donde el 58% corresponde a residuos orgánicos (ENRO, Chile 2040) teniendo como destino final rellenos sanitarios y vertederos en una mezcla con residuos inorgánicos, no siendo gestionados de forma tal que permita el aprovechamiento de su potencial energético.

El último censo realizado en el país en el año 2017 indica en sus resultados que la población efectivamente censada llegó a un total de 17.574.003 personas. Basándose en el censo se estima que diariamente la población chilena genera aproximadamente 20.913 toneladas de residuos, considerando que la tasa de crecimiento demográfico del país es de 0,9% cambio anual (Banco Mundial, 2020), por lo cual en la actualidad la cantidad de residuos es mayor y se proyecta un aumento dado el modelo actual de consumo y producción lineal, adquisición y el cambio de los patrones de consumo y estilos de vida, asociadas a las decisiones que se toman diariamente respecto a la manera en que la población se alimenta, vive, se transporta, compra y se dedica al ocio.

Al gestionar la materia orgánica se disminuye los Gases de Efecto Invernadero (GEI) generados en los rellenos sanitarios y vertederos; además, Chile se encuentra comprometido con la disminución de los GEI en diversos tratados.

La tasa de valorización de los residuos orgánicos hasta el año 2020 era inferior al 1% del total de toneladas generadas cada año.

En los hogares, establecimientos gastronómicos y casinos, o en donde se ofrece un servicio de alimentación, se generan en gran cantidad residuos orgánicos. En el presente trabajo, se analizó el caso del Casino del Centro Integral de Alimentación al Estudiante (CIAE) de la Universidad de Valparaíso. Se cuantificaron y tipificaron los residuos orgánicos generados diariamente durante dos semanas.

Se programó una marcha experimental la que se inició con la preparación del inóculo comprobando la presencia de gran cantidad de bacterias Gram positivas. Luego se realizó la preparación del sustrato para la digestión anaerobia la que se mantuvo durante 31 días, contabilizando la cantidad de biogás producido.

Basado en los resultados obtenidos, se realizó el prediseño de un biodigestor para poder gestionar los residuos del edificio y posterior utilización energética. Se concluyó que con la cantidad de residuos que genera este casino, la producción de biogás es muy baja siendo técnicamente posible pero económicamente inviable. Para obtener la producción necesaria de gas, se debe pensar en realizar pruebas exploratorias en un reactor continuo, al cual se añada biomasa y sustrato continuamente al biorreactor, eliminando simultáneamente igual volumen de caldo de fermentación.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	11
1.1	RESIDUOS EN CHILE.....	11
1.1.1	Residuos Sólidos Domiciliarios	12
1.1.2	Disposición final	13
1.2	VALORIZACIÓN	15
1.3	NORMATIVA APLICABLE	18
1.4	HERRAMIENTAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.....	22
1.5	TECNOLOGIAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS	23
1.5.1	Compostaje	23
1.5.2	Biodigestor	23
1.6	DIGESTIÓN ANAERÓBICA	25
1.6.1	Etapas de la digestión anaeróbica.....	26
1.6.1.1	Hidrólisis.....	27
1.6.1.2	Etapa fermentativa o acido génica.....	28
1.6.1.3	Etapa acetogénica	29
1.6.1.4	Etapa metanogénica.....	29
1.6.2	Taxonomía de bacterias metanogénicas.....	30
1.6.3	Productos finales de la digestión anaeróbica	32
1.6.4	Parámetros condicionantes de la digestión anaerobia.....	35
1.6.4.1	pH	36
1.6.4.2	Potencial redox.....	37
1.6.4.3	Nutrientes	37
1.6.4.4	Tóxicos inhibidores de la metanogénesis	37
1.6.4.5	Temperatura.....	38
1.6.4.6	Agitación/mezclado.....	41
1.6.4.7	Tiempo de retención y velocidad de carga orgánica.....	41
1.6.4.8	Materia seca	43
1.6.4.9	Materia orgánica seca	43
1.6.4.10	Relación de alcalinidad.....	44
1.7	Potencial bioquímico de metano	46
1.7.1	Inóculo.....	47

1.7.2	Materia prima	48
2	PROBLEMA	49
3	OBJETIVOS	51
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	51
3.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	51
4	METODOLOGÍA.....	52
4.1	CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS	52
4.2	GENERACIÓN DE BIOGÁS	53
4.2.1	Cámara de prueba de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)	53
4.2.1.1	Componentes de la cámara de prueba	54
4.2.1.2	Desplazamiento de líquido.....	56
4.2.1.3	Reactor	60
4.2.1.4	Monitoreo de parámetros de la cámara de prueba de BMP	62
4.2.1.4.1	Control de pH	62
4.2.1.4.2	Control de temperatura	63
4.2.1.4.3	Relación de alcalinidad.....	63
4.3	Estimación de la generación de gas metano mediante la aplicación del modelo del IPCC	65
4.2.2.1	Elementos de la descomposición de primer orden.....	67
4.2.2.2	Metano generado a partir del DDOCm descompuesto	68
4.2.2.3	Elección de factores y parámetros de emisión	69
4.4	DISEÑO ESTANQUE DEL BIODIGESTOR	73
4.3.1	Parámetros de diseño	74
4.3.2	Espesor del estanque	75
4.3.3	Cargas del estanque	76
4.3.4	Almacenamiento de biogás.....	80
4.3.5	Acondicionamiento del biogás para sulfuro de hidrógeno	81
4.3.6	Agitador.....	82
5	RESULTADOS	83
5.1	CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS	83
5.2	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE BMP	86
5.2.1	Resultados de producción de biogás.....	91
5.2.2	Nivel de pH	97
5.2.3	Relación de Alcalinidad	98

5.3	Producción de metano, modelo IPCC.....	99
5.4	DISEÑO DE BIODIGESTOR ANAEROBIO	106
5.4.1.	Diseño del estanque del biodigestor.....	107
5.4.2.	Selección de la bomba.....	107
5.4.3.	Agitador.....	109
6	DISCUSIÓN.....	110
7	CONCLUSIONES	112
8	REFERENCIAS.....	114
	ANEXOS	117
ANEXO 1	Pesa para la cuantificación de residuos	117
ANEXO 2	Estiércol bovino recolectado	118
ANEXO 3	Hola de cálculo de las dimensiones del biodigestor anaerobio	119
ANEXO 4	Hoja de cálculo del sistema de bombeo	122
ANEXO 5	Volumen de almacenamiento de biogás.....	126
ANEXO 6	Norma alemana VDI 4630	127
ANEXO 7	Funcionamiento de casino completamente con biogás	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Decreto 119.....	18
Tabla 1.2:	Ley 20.920	19
Tabla 1.1:	Decreto con Fuerza de Ley 725	20
Tabla 1.2:	Decreto con Fuerza de Ley 1	20
Tabla 1.3:	Características de bacterias metanogénicas típicas en digestores anaerobios	32
Tabla 1.4:	Características generales del biogás.	33
Tabla 1.5:	Consumo de biogás en diversas actividades	35
Tabla 1.6:	Parámetros más relevantes que van a determinar la digestión anaerobia	36
Tabla 1.7:	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	40
Tabla 1.8:	Valores empíricos y reglas para la evaluación de las relaciones FOS/TAC proporcionados por DEULA-Nienburg.	46
Tabla 4.1:	Registro cuantificación de residuos.	53
Tabla 4.2:	Características de baño termostático.	87
Tabla 4.3:	Factor de corrección de metano.	70
Tabla 4.4:	Valores del índice de generación de metano (k) por defecto.....	71
Tabla 4.5:	Valores de vida media ($t_{1/2}$) por defecto	72

Tabla 4.6:	Valores por defecto para contenidos de materia seca, DOC, total de carbono y fracción de carbono fósil.....	73
Tabla 5.1:	Identificación de los residuos orgánicos semana 1.....	84
Tabla 5.2:	Identificación de los residuos orgánicos semana 2.....	85
Tabla 5.3:	Características de los residuos.	89
Tabla 5.4:	Cantidad de residuo para reactores.....	89
Tabla 5.5:	Cascara de zanahoria triturada.	90
Tabla 5.6:	Producción diaria y acumulada de biogás.....	92
Tabla 5.7:	Producción diaria y acumulada de biogás en CNPT.	94
Tabla 5.8:	Producción diaria y acumulada de biogás en CNPT de la ODM	96
Tabla 5.9:	Resultados del Método de eliminación de desechos sólidos IPCC (2006).....	104
Tabla 5.10:	Dimensiones preliminares del biodigestor para CIAE.	107
Tabla 5.11:	Características de la bomba apropiada para los residuos generados en CIAE	108
Tabla 5.12:	Características de la bomba seleccionada	108
Tabla Anexo 1.	Características de la bomba seleccionada	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1:	Layout básico de la cámara de prueba para medir BMP.	54
Figura 4.2:	Esquema de sistema de medición de biogás.....	57
Figura 4.3:	Presiones presentes en el líquido de desplazamiento.....	58
Figura 4.4:	Curva de Presión de Vapor Verdadera.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4.5:	Esquema de sistema de medición de Metano.....	59
Figura 4.6:	Medidor de pH.....	62
Figura 4.7:	a) Termómetro infrarrojo, b) termohigrómetro.....	63
Figura 4.8:	Materiales para filtración al vacío.....	64
Figura 4.9:	Esquema de gasómetro de doble membrana sobre tanques (Top Mounted).....	80
Figura 5.1:	Generación de residuos orgánicos en CIAE, Valparaíso, 2022.....	84
Figura 5.2:	Ubicación geográfica de la obtención de estiércol bovino.....	86
Figura 5.3:	Montaje en laboratorio de prueba BMP.....	90
Figura 5.4:	Producción diaria de Biogás en CNPT.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.5:	Producción acumulada de Biogás en CNPT.....	95
Figura 5.7:	Ratio de Alcalinidad.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.8:	Esquema de entradas y salidas del biodigestor.....	106
Figura Anexo 1.	Pesa utilizada para la cuantificación de residuos.....	117
Figura Anexo 2.	Estado del estiércol bovino en su recolección.....	118
Figura Anexo 3.	Característica de la bomba elegida por medio del caudal 125.....	

LISTADO DE ACRONIMOS/SIGLAS

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

CIAE: Centro Integral de Atención al Estudiante

CNPT: Condiciones Normales de Presión y Temperatura

ENRO: Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)

MINSAL: Ministerio de Salud

MMA: Ministerio de Medio Ambiente

ODM: Materia Seca Orgánica (Organic Dry Matter)

RETC: Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes

RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios

RSM: Residuos Sólidos Municipales

SINADER: Sistema Nacional de Declaración de Residuos

SV: Sólidos Volátiles

VDI: Asociación Alemana de Ingenieros (Verein Deutscher Ingenieure)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 RESIDUOS EN CHILE

La Ley 20.920 (MMA, 2016) define los residuos como una “Sustancia u objeto que su generador desecha o tiene la intención u obligación de desechar de acuerdo a la normativa vigente”. En el año 2018 se generaron 19,6 millones de toneladas de residuos sólidos donde 8.177.448 toneladas corresponden a residuos municipales, según la información entregada por los municipios, con una población proyectada de 18.751.405 habitantes, lo que significa un promedio de 1,19 kilos al día por habitantes según el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), 2005-2018, MMA.

En la figura 1.1, se evidencia la cantidad de residuos sólidos generados en el año 2015 al 2018, en el año 2018 el 97 % corresponde a residuos no peligrosos; 53% de origen industrial, 42% municipales y 2% lodos de plantas de tratamiento.

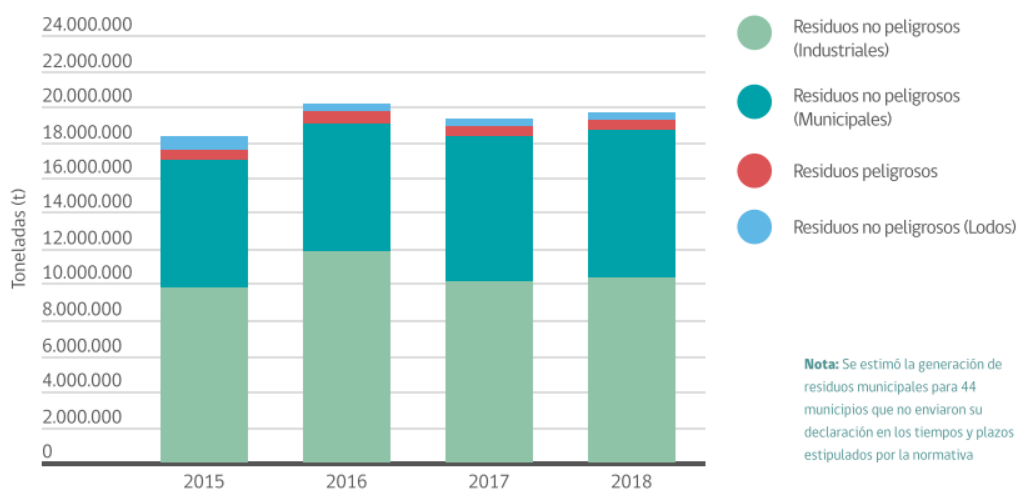


Figura 1.1: Generación de residuos a nivel nacional según origen, 2015-2018.
(Fuente: Capítulo 10, Residuos, Informe del Estado del Medio Ambiente, 2020)

1.1.1 Residuos Sólidos Domiciliarios

Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) son aquellos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos, aquellos similares a los generados en servicios e industrias, que no se produzcan como consecuencia de la actividad principal del servicio o industria (ENRO, 2020).

Los residuos generados producto del mantenimiento de parques y áreas verdes, aseo de ferias libres, pequeños comercios, hoteles, restaurantes y cafeterías se denominan Residuos Sólidos Municipales (RSM) que al igual que los RSD tienen su disposición final en rellenos sanitarios. En Chile, la gestión de residuos domiciliarios es responsabilidad de las municipalidades. En la figura 1.2 se expresan los porcentajes de los tipos de residuos generados como RSM.



Figura 1.2: Clasificación de los RSD.

(Fuente: ENRO Chile 2040, 2020)

el año 2020 se generaron casi 7,9 millones de toneladas de residuos municipales, con una población proyectada de poco más de 21 millones de habitantes, lo que implica que en promedio 1,03 kilos de residuos se genera al día por habitante. La generación de residuos municipales por habitante en la región de Valparaíso en el año 2020 correspondió a 1,15 kilos/día (Séptimo REMA, 2022).

1.1.2 Disposición final

El Decreto 189 establece “Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios” (MINSAL, 2008) define disposición final como “Procedimiento de eliminación de residuos sólidos mediante su depósito definitivo en el suelo”.

Entre los años 2015 y 2019 se genera un cambio en la disposición final de residuos no peligrosos. En 2015 el 50% de los residuos totales declarados en Sinader fueron enviados a eliminación a rellenos sanitarios y el 40% a vertederos. En el año 2019, los rellenos sanitarios recibieron el 63,2% y los vertederos descendieron al 8,8% del total de los residuos. El 28% restante de los residuos se distribuye en relleno de seguridad, monorelleno, depósito de cenizas, basurales, entre otros (Séptimo REMA 2022).

Por otro lado, en el año 2020 un 16,6% de los residuos depositados a nivel nacional fueron enviados a depósitos de cenizas, un 39,9% a otros destinos y un 1,5% a basurales (Séptimo REMA 2022).

A partir de lo declarado por los municipios, según el Informe del Estado del Medio Ambiente (2020) el tratamiento de los residuos domiciliarios, el 99% de estos va a disposición final; de este porcentaje el 79% es a rellenos sanitarios y un 13% a vertederos y en menor cantidad a basurales y sitios de

escombros de la construcción. Solo un 1% es enviado a algún tipo de valorización. En el gráfico de la figura 1.3 se especifican los tratamientos de disposición de los RSM por tipo.

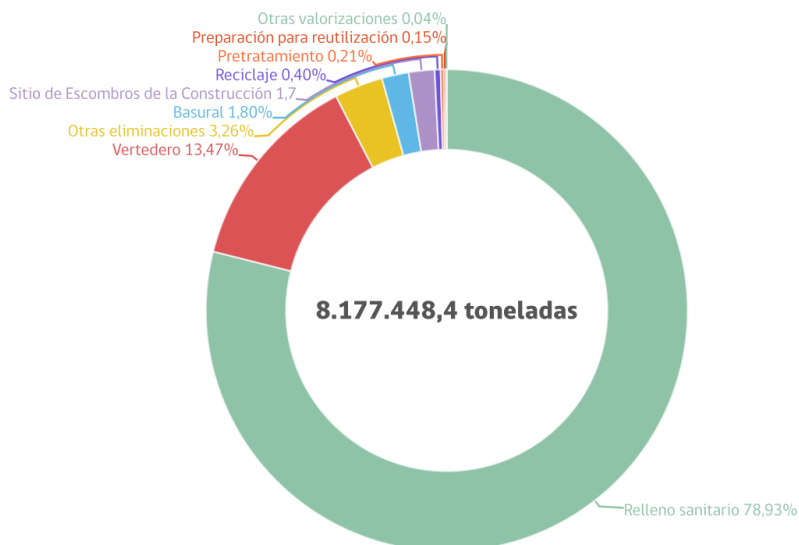


Figura 1.3: Disposición de Residuos Sólidos Municipales

(Fuente: Quinto REMA MMA, 2020)

Existían 124 sitios activos de disposición final en el año 2020 y solo el 30,6% corresponden a rellenos sanitarios (ENRO 2040, 2020). En los últimos años, se ha registrado una mayor escasez de lugares adecuados para la construcción de nuevos rellenos sanitarios, por los conflictos socioambientales que generan en el territorio. El promedio de vida útil de los rellenos sanitarios a nivel nacional es de 12 años, y la construcción de un nuevo relleno toma aproximadamente 10 años en materializarse.

En la región de Valparaíso el número de sitios de disposición final de RSD activos corresponde a 7, donde 2 son basurales, 3 a rellenos sanitarios y 2 a vertederos. La cantidad de toneladas de residuos en sitios de disposición en la región corresponde al 10,5% a nivel nacional, de las cuales 91,3% (745,027 toneladas) se disponen en rellenos sanitarios.

Los residuos sólidos que llegan a disposición final emiten el 4% de los GEI en Chile, donde la degradación anaeróbica a la que se ve expuesto el material orgánico es uno de los principales procesos que contribuyen a esto. Se estima que de evitarse la disposición de residuos orgánicos en vertederos y/o rellenos sanitarios, es posible reducir entre un 70-80% de las emisiones que actualmente generan.

La presente medida no contabiliza la mitigación de GEI que podría generarse mediante la disminución de la recolección y transporte, o el secuestro de carbono producido por la aplicación de compost en el suelo, lo cual, además, constituye una mejora del suelo y, por lo tanto, una medida de adaptación (Guía metodológica para orientar la transición hacia una economía circular a nivel municipal, 2023).

1.2 VALORIZACIÓN

Según la Ley 20.920 (MMA, 2016) valorización es un “Conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y, o el poder calorífico de los mismos. La valorización comprende la preparación para la reutilización, el reciclaje y la valorización energética”. En su Art. 4 se indica que todo residuo potencialmente valorizable deberá ser destinado a tal fin evitando su eliminación.

La valorización conlleva a una serie de potenciales beneficios ambientales, sociales y económicos. En el ámbito ambiental, se pueden obtener beneficios por la reducción de las emisiones de GEI, mejoras en el manejo de residuos, potencial de producir energía renovable. En relación con el ámbito social, nuevas y mejores condiciones para los recolectores(as) de residuos. En el sector económico, se tiene como beneficios la creación de nuevas fuentes de trabajo, reducción de costos asociado al manejo de residuos orgánicos en rellenos sanitarios, entre otros.

En la figura 1.4 se ilustra la evolución de la tasa nacional de valorización durante un período de cinco años. El año 2020, aproximadamente el 20% de los residuos fue recibido en instalaciones de valorización, lo cual corresponde a la tasa más baja de valorización final registrada en los últimos años (Séptimo REMA, 2022).

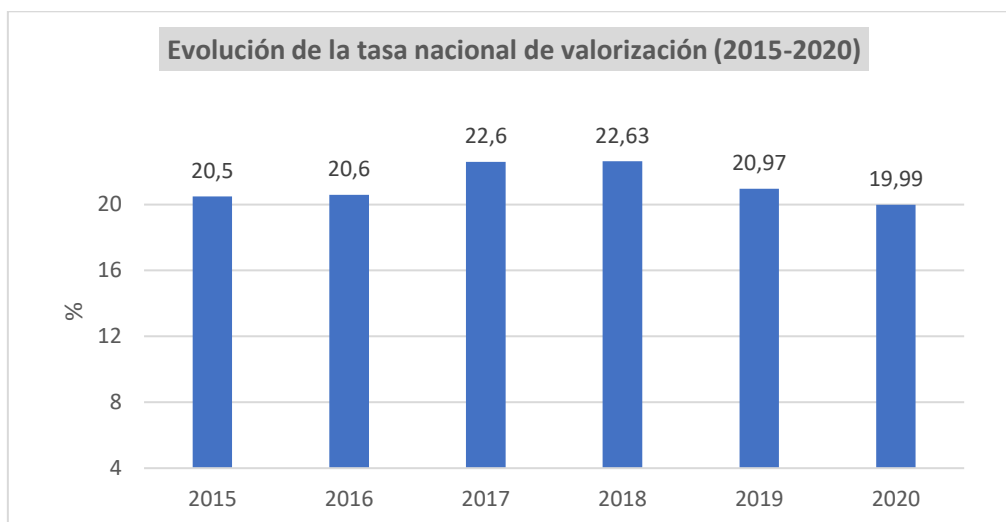


Figura 1.4: Evolución de la tasa nacional de valorización (2015-2020).

(Fuente: Séptimo REMA MMA,2022)

En el año 2020, la valorización de residuos no peligrosos fue llevada a cabo mediante la gestión de reciclaje, aproximadamente un 70%. En segundo lugar, un 11%, los residuos se adquirieron una segunda vida, lo que implica que se prepararon para la reutilización de ellos. En la figura 1.5 muestra con mayor precisión los diversos tipos de valorización que se realizaron durante el año 2020.

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS NO PELIGROSOS (%) (2020)

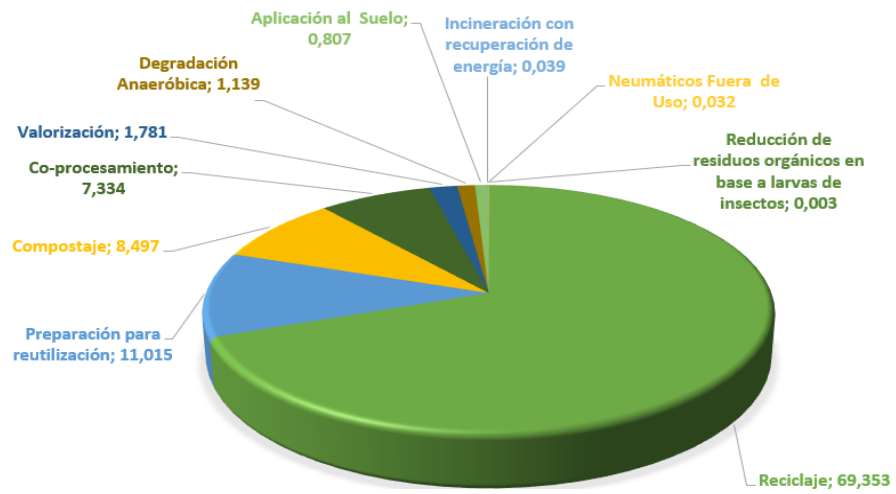


Figura 1.5: Valorización de residuos No Peligrosos.

(Fuente: Séptimo REMA MMA,2022)

1.3 NORMATIVA APLICABLE

A continuación; se menciona la normativa vinculada con la gestión de residuos orgánicos y la regulación en materia de biogás en el país.

Tabla 1.1: Decreto 119
(Fuente: <https://bcn.cl/2ofmn>)

Normativa	Decreto 119 Reglamento de seguridad de las plantas de biogás e introduce modificaciones al reglamento de instaladores de gas
Entidad	Ministerio de Energía
Promulgación	1 de septiembre de 2016
Publicación	2 de febrero de 2017
Versión	1 de julio de 2017
Alcance	Establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las plantas de biogás, en las etapas de diseño, construcción, operación, mantenimiento, inspección y término definitivo de operaciones, en las que se realizarán indistintamente las actividades de recepción, preparación y almacenamiento de sustrato; producción, almacenamiento, transferencia, tratamiento, suministro, uso o consumo de biogás, y demás actividades relacionadas, así como las obligaciones de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas actividades a objeto de desarrollarlas en forma segura.

Tabla 1.2: Ley 20.920

(Fuente: <https://bcn.cl/2f7b2>)

Normativa	Ley 20.920 Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productos y fomento al reciclaje
Entidad	Ministerio del Medio Ambiente
Promulgación	17 de mayo de 2016
Publicación	1 de junio de 2016
Versión	1 de junio de 2016
Alcance	<p>La ley tiene por objeto disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente.</p> <p>Art. 4 indica que todo residuo potencialmente valorizable deberá ser destinado a tal fin evitando su eliminación.</p> <p>Art. 5 indica que todo generador de residuos deberá entregarlos a un gestor autorizado para su tratamiento, de acuerdo con la normativa vigente, salvo que proceda a manejarlos por sí mismo en conformidad del artículo siguiente. El almacenamiento de tales residuos deberá igualmente cumplir con la normativa vigente.</p> <p>Art. 30 a fin de colaborar con el adecuado cumplimiento del objetivo de esta ley, las municipalidades en sus letras:</p> <p>d) Deberán incorporar en sus ordenanzas municipales la obligación de separar los residuos en origen y fomentar el reciclaje, cuando así lo determine el Decreto Supremo que establezca metas y otras obligaciones asociadas.</p> <p>e) Promoverán la educación ambiental de la población sobre la prevención en la generación de residuos y su valorización.</p>

Tabla 1.3: Decreto con Fuerza de Ley 725
(Fuente: <https://bcn.cl/3cgyi>)

Normativa	DFL 725 Codigo sanitario
Entidad	Ministerio de Salud Pública
Promulgación	11 de diciembre de 1967
Publicación	31 de enero de 1968
Versión	17 de marzo de 2023
Alcance	Art. 80 indica que corresponde al Servicio Nacional de Salud autorizar la instalación y vigilar el funcionamiento de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios de cualquier clase.

Tabla 1.4: Decreto con Fuerza de Ley 1
(Fuente: <https://bcn.cl/2gd2v>)

Normativa	DFL 1 Determina materias que requieren autorización sanitaria expresa
Entidad	Ministerio de Salud
Promulgación	8 de noviembre de 1989
Publicación	21 de febrero de 1990
Versión	21 de febrero de 1990
Alcance	De acuerdo con el artículo 1 de la norma, conforme a lo dispuesto en el artículo 7° del Código Sanitario requieren autorización sanitaria expresa: Instalación de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios de cualquier clase.

Tabla 1.5: Decreto 160
(Fuente: <https://bcn.cl/2gdwb>)

Normativa	Decreto 160 Aprueba reglamento de seguridad para las instalaciones y operaciones de producción y refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de combustibles líquidos.
Entidad	Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción.
Promulgación	26 de mayo de 2008
Publicación	7 de julio de 2009
Versión	27 de marzo de 2020
Alcance	Este reglamento establece los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplir las instalaciones de combustibles líquidos derivados del petróleo y biocombustibles, en adelante e indistintamente CL, y las operaciones asociadas a la producción, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y abastecimiento de CL que se realicen en tales instalaciones, así como las obligaciones de las personas naturales y jurídicas que intervienen en dichas operaciones, a objeto de desarrollar dichas actividades en forma segura, controlando el riesgo de manera tal que no constituyan peligro para las personas y/o cosas.
Alcance	<p>A este respecto, en cuanto a la seguridad para el almacenamiento de CL en tambores, el presente Decreto señala lo siguiente en su Capítulo 4:</p> <p>Artículo 161º.- Se entenderá por tambores a aquellos envases cuya capacidad está comprendida entre 20 y 227 L y podrán almacenarse en locales o recintos.</p> <p>Artículo 162º.- El local donde se almacena CL en tambores deberá ser de material incombustible, y no deberán existir fuentes de ignición. Además deberán contar con un sistema de ventilación mecánica que provea al menos 0,3 m³/min de aire de escape por cada metro cuadrado de piso, pero no inferior a 4 m³/min, o ventilación natural equivalente.</p> <p>Artículo 163º.- En caso que los tambores estén ubicados en recintos, se considerará un área de seguridad de 2 metros alrededor de los envases.</p> <p>Artículo 164º.- Tanto para los locales como para los recintos, deberá además considerarse lo siguiente:</p>

<p>a) Se tomarán las precauciones necesarias para evitar los derrames de combustible. En todo caso, debe disponerse de bandejas, o pretilas, o arena o drenajes adecuados para absorber los eventuales derrames. Se deberá controlar mensualmente la hermeticidad de los tambores y válvulas de servicio.</p> <p>b) Para los almacenamientos mayores de 227 L se deberá contar con, a lo menos, un extintor de polvo químico seco con un contenido mínimo de 10 Kg y capacidad de apague 40BC.</p> <p>c) Se contemplarán letreros de advertencias tales como "INFLAMABLE-NO FUMAR NI ENCENDER FUEGO", visibles a lo menos a 3 metros de distancia</p> <p>Por otra parte, en el artículo 300 se indica que las instalaciones de CL cuyo volumen total de almacenamiento sea inferior a 1.100 L no requerirán ser inscritas; no obstante deberán cumplir con las disposiciones en materia de seguridad que se indican en el presente reglamento.</p>
--

1.4 HERRAMIENTAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

Una de las herramientas de gestión ambiental en Chile es “La Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2020” presentada por el Ministerio de Medio Ambiente como una medida de mitigación y adaptación al cambio climático con el manejo de residuos orgánicos a través del uso de tecnologías para ser valorizados (lombricultura, compostaje, biodigestión, etc.) para evitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se generarían al ser depositados en rellenos sanitarios. Además, busca impulsar la economía circular, considerando que los residuos orgánicos son uno de los residuos que se generan en mayor porcentaje en las ciudades de Chile.

La ENRO se propone como meta pasar de un 1% a un 66% de valorización de los residuos orgánicos generados a nivel municipal al 2040. Por otra parte, se espera la disminución de la generación de residuos orgánicos. Existen diversas metas intermedias que presenta la estrategia al 2030 de las cuales se estaría abordando el “Contar con un 50% de las instituciones públicas separando en origen y valorizando los residuos orgánicos que generan”.

1.5 TECNOLOGIAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS ORGANICOS

1.5.1 Compostaje

Proceso de descomposición aeróbica de una mezcla de residuos orgánicos, gracias a la acción de microorganismos. Este proceso ocurre en presencia de humedad y oxígeno, generando elevadas temperaturas que permiten higienizar la mezcla, produciendo dióxido de carbono, agua y materia orgánica estabilizada (ENRO, 2020).

Según el Informe del Banco Mundial “Qué desperdicio 2.0”, a nivel mundial, solo el 5,5% de los residuos se compostan y en Chile sólo el 0,4% (MMA, 2018).

1.5.2 Biodigestor

Un biodigestor es un sistema natural que aprovecha la digestión anaerobia de las bacterias que habitan en un residuo, para transformar éste en dos subproductos: el biogás y el biol (CEPIS, 1996). El biogás es una mezcla gaseosa compuesto principalmente por metano (55-70%), el cual es el componente energético (Nuñez L., 2017).

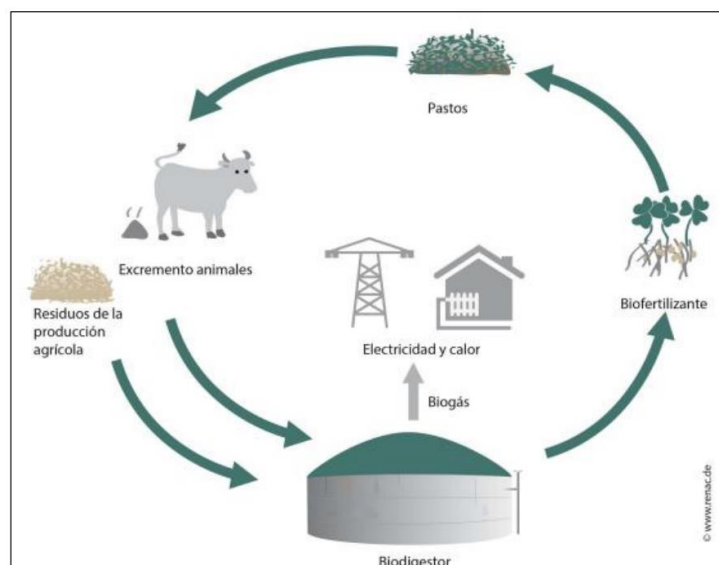


Figura 1.6: Ciclo del biogás de la materia orgánica.
(Fuente: Núñez L., 2017)

El Decreto 119 del Ministerio de Energía (2017) lo define como “Contenedor en el que se produce la degradación anaeróbica de la materia orgánica, conocido también como digestor, reactor o fermentador”, en el biodigestor se produce biogás, el cual se define en el Decreto como “Gas obtenido por procesos de digestión anaeróbica de materia orgánica, cuyos componentes principales son metano (CH_4), y dióxido de carbono (CO_2), con presencia de otros componentes tales como nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), ácido sulfhídrico (H_2S), vapor de agua y otros en menor proporción”.

Los biodigestores se pueden clasificar según la carga de materia la cual puede ser de tipo de flujo discontinuo, continuo o semidiscontinuo.

- Flujo tipo batch (o por lotes):
Este tipo de biodigestor reciben un único ingreso de materia prima al inicio del proceso; cuando termina la producción de biogás (fermentación) se vuelve a cargar con residuos frescos y se descarga el producto.
- Flujo continuo:
Son aquellos que se cargan de forma continua, es decir, se cargan grandes cantidades aproximadamente todos los días; esto permite que la producción de biogás sea de forma uniforme en el tiempo. Debido a esto, es comúnmente usado en aplicaciones industriales (Mariño, Rivera & Villanueva, 2021).
- Flujo semi-continuo:
Son más usados en zonas rurales, es alimentado inicialmente con una carga de materia prima; su carga puede ser diaria, pero en cantidades menores a la inicial permitiéndose así una producción constante de gas.

1.6 DIGESTIÓN ANAERÓBICA

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en ausencia de oxígeno en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás; mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (p.ej. H_2O_2). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles.

En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento de este (como ejemplo es el ácido sulfhídrico).

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación o respiración anaeróbicas dependiendo del tipo de aceptores de electrones. (FAO, 2011). La vía fermentativa en donde compuestos orgánicos como los ácidos y alcoholes, entre otros, sirven como aceptores finales de electrones (Corrales et. al, 2015).

Los digestores, también conocidos como biodigestores, son reactores cerrados que facilitan la digestión anaerobia proporcionando una atmósfera libre de oxígeno para los organismos responsables de dicho proceso (Diaz de Basurto, 2013).

1.6.1 Etapas de la digestión anaeróbica

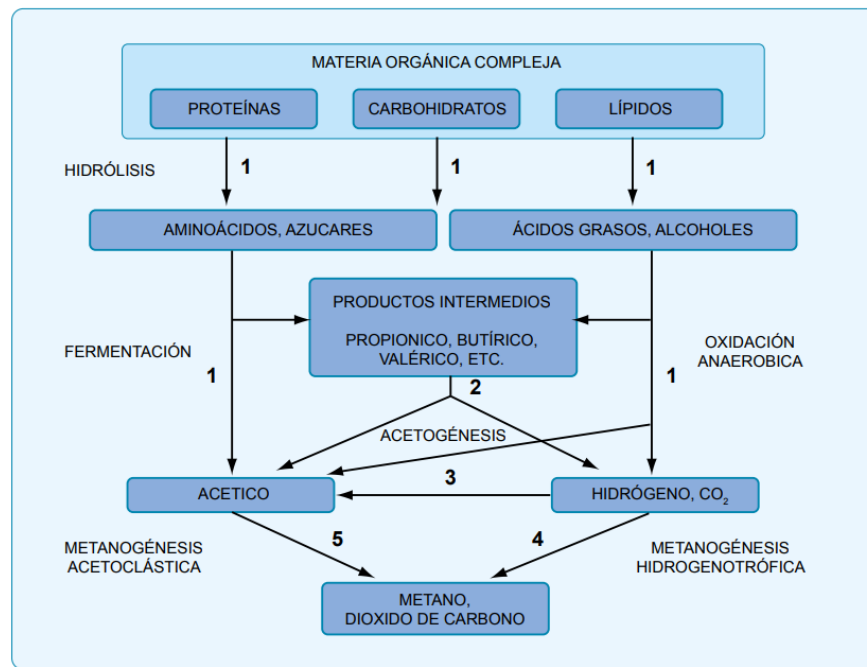
La digestión o fermentación anaeróbica es un proceso complejo el cual se caracteriza de varias etapas consecutivas, las cuales son reacciones bioquímicas que se diferencian por el proceso que se lleva a cabo para degradar el sustrato. Muchas de estas reacciones ocurren simultáneamente.

Las etapas de la fermentación del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica se dividen en cuatro etapas o fases:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica

3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

La figura 1.7 representa un esquema de las reacciones que ocurren en la digestión anaeróbica, siendo responsable distintas bacterias dependiendo de la etapa de descomposición.



(Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991).

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1.7: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos

(Fuente: Varnero M., 2011).

1.6.1.1 Hidrólisis

En esta etapa se inicia la degradación de sustratos orgánicos complejos como lípidos, proteínas, hidratos de carbono y compuestos inorgánicos. La hidrólisis de estas moléculas es llevada a cabo por la acción de enzimas (extracelulares) en moléculas solubles y fácilmente degradables. Los microorganismos encargados de esto son las bacterias hidrolíticas-acidogénicas.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso, el cual se incrementa al contener residuos con alto contenido de sólidos. Otros factores que afectan son a temperatura del proceso, tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato, tamaño de las partículas, pH, concentración de amonio (NH_4^+) y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

El sustrato orgánico como se menciona anteriormente estará compuesto por tres tipos de macromoléculas que son los hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas son fuentes de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas.

La degradación de los lípidos comienza con la ruptura de la grasa por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol (Varnero M., 2011).

1.6.1.2 Etapa fermentativa o ácido génica

Las moléculas orgánicas solubles resultantes de la etapa hidrolítica van ser transformados por la acción de microorganismos y bacteria fermentativas a través de un proceso de fermentación, dando como resultado ácido acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$), hidrogeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), y en menor cantidad productos intermedios como: alcoholes, ácidos grasos volátiles (cadena corta y ácido acético) y ácidos orgánicos que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La

importancia de la presencia de este grupo de bacterias no solo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, si no que, además eliminan traza del oxígeno disuelto del sistema

Las bacterias que intervienen son facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

1.6.1.3 Etapa acetogénica

Los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica van a ser transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose como principales productos hidrógeno (H_2), y acetato (CH_3COO^-) a partir de etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos orgánicos. Algunos de los productos de la etapa anterior pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético).

En esta etapa del proceso, las bacterias anaeróbicas han extraído la mayoría de alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos son ácidos volátiles sencillos, utilizados por las bacterias metanogénicas como sustrato en la etapa siguiente.

1.6.1.4 Etapa metanogénica

En la etapa final de la digestión anaerobia, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas actúa formando metano a partir de dos rutas principales, la primera es la acetoclásticas en la cual los microorganismos crecen principalmente en su sustrato (acetato) y la segunda es la hidrogenotrófica en donde los microorganismos crecen en sustratos como hidrogeno y dióxido de carbono. Su metabolismo

se caracteriza por integrar las vías biosintéticas y bioenergéticas para la producción de ATP, además en ausencia de hidrógeno, oxidan compuestos para la obtención de electrones (Corrales et. al, 2015).

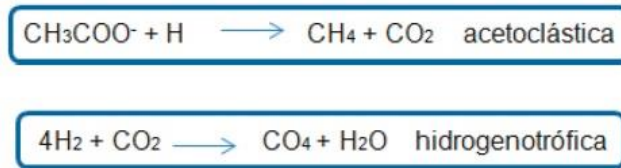


Figura 1.8: Rutas de obtención de metano

Fuente: (Corrales et. al, 2015)

Los productos finales son metano, dióxido de carbono y agua. El aporte de metano por la vía acetoclástica es del 70% al 73% y por la vía hidrogenotrófica es del 27 al 30%.

1.6.2 Taxonomía de bacterias metanogénicas

Los metanógenos son procariontes anaerobios que pertenecen al dominio *Archaea*. Tienen la capacidad de producir gas metano a través de la conversión de sustratos monocarbonados o con átomos de carbono unidos por un enlace covalente como el acetato, H₂, CO₂, formato, metanol y algunas metilaminas. Estas bacterias abundan en ambientes donde se encuentran aceptores de electrones tales como O₂, NO³⁻, Fe³⁺, y SO₄²⁻; los hábitats típicos son digestores anaerobios, sedimentos anóxicos, suelos de humedales y tractos gastrointestinales.

La metanogénesis tiene lugar mediante una serie exclusiva de reacciones en las que intervienen coenzimas (si se utiliza como sustrato CO₂ las coenzimas que participan son la metanofurano, coenzima

F420, coenzima M, un complejo enzimático reductasa metil-F430 y la coenzima B). Las reacciones para la producción de metano son fuertemente exoenergéticas, y la emplean como fuente de energía.

Las arqueas metanógenas se encuentran clasificadas en 6 órdenes basándose en la comparación de las secuencias del gen conservativo ARNr 16S (porcentaje de semejanza del gen) las cuales son Methanobacteriales, Methanococcales, Methanomicrobiales, Methanocellales, Methanosarcinales y Methanopyrales. Los ordenes están divididos en 13 familias, 31 géneros (García, 2014) y aproximadamente se han identificado 90 especies.

La fisiología de estas bacterias es diversa morfológicamente y la composición de la pared celular varía según la especie (puede estar formada de pseudomureína, metanocondroitina, proteínas, glicoproteínas o capa S) (Madigan et al., 2015). Morfológicamente, pueden ser bacilos cortos y largos, cocos con diferentes asociaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos existiendo tanto Gram positivos como Gram negativos dependiendo del sustrato sobre el que crecen, se pueden dividir en tres clases principales: los que usan un sustrato de tipo CO₂, las que utilizan un sustrato de tipo metilo y las que utilizan un sustrato de tipo acetato, a partir de los cuales obtienen energía por medio del proceso denominado metanogénesis (Corrales, 2015).

Dentro de cada familia e incluso hasta en cada género, se encuentran organismos con morfología diferente, por ejemplo, dentro de la familia Methanomicrobiaceae, existen metanógenas en forma de cocos, de espiral y de bastón (Van Kuyk et al., 1998). En la siguiente tabla se puede observar bacterias metanogénicas dependiendo del tipo de sustrato que utilizan para sus metabolismos, especificando las condiciones óptimas de crecimiento de pH y temperatura, además características como la morfología, presencia de movilidad (M: móvil; N: inmóvil) y tipo de Gram (positivo o negativo).

Tabla 1.6: Características de bacterias metanogénicas típicas en digestores anaerobios

(Fuente: Amani T. et al., 2010)

Substrates	Products	Typical species	Optimum growth conditions		Shape	Motility*	Gram reaction	
			pH	Temperature, °C				
Acetate	CH ₄ , CO ₂	<i>Methanotherx soehngeni</i>	7.4–7.8	35–40	Sheathed rod	N	–	
		<i>Methanosaeta concilii</i>	7.1–7.5	35–40	Sheathed rod	N	–	
H ₂ , CO ₂	CH ₄	<i>Methanosarcina acetivorans</i>	6.5–7.5	35–40	Cocoid	N	–	
		<i>Methanobacterium bryantii</i>	6.9–7.2	37–39	Rod	N	+	
		<i>M. thermoautotrophicum</i>	7.2–7.6	65–70 [†]	Rod	N	+	
		<i>M. alcaliphilum</i>	8.1–9.1 [‡]	37	Rod	N	–	
		<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	7.8–8.0	30–37	Cocobacillus	N	+	
		<i>Methanococcus jannaschii</i>	5.0–7.0	85 [§]	Irregular coccus	M	–	
		<i>Methanolacinia paynteri</i>	6.6–7.2	40	Irregular rod	N	–	
		<i>Methanospirillum hungatei</i>		30–37	Sheathed spiral	M	–	
		<i>Methanoplanus endosymbiosus</i>	6.6–7.2	40	Irregular disk	N	–	
		<i>M. olentangi</i>		30–40				
		<i>Methanothermus fervidus</i>	6.5	83 [§]	Rod	M	+	
		<i>Methanobacterium formicicum</i>	6.6–7.8	37–45	Rod	N	+	
		Formate, H ₂ , CO ₂	CH ₄ , CO ₂	<i>Methanobrevibacter smithii</i>	7.0	37–39	Rod	N
<i>M. ruminantium</i>	7.0			37–39	Occobacillus	N	+	
<i>Methanococcus voltae</i>	6.5–8.0			35–40	Irregular coccus	M	–	
<i>M. deltae</i>				37	Irregular coccus	N	–	
<i>M. maripaludis</i>	6.5–8.0			35–40	Irregular coccus	M	–	
<i>M. thermolithoautotrophicus</i>	6.5–8.0			65 [†]	Irregular coccus	M	–	
<i>Methanoplanus limicola</i>	7.0			40	Plate	M	–	
<i>Methanogenium cariaci</i>	6.2–6.6			20–25	Irregular coccus	N	–	
<i>M. marisnigri</i>	6.8–7.3			20–25	Irregular coccus	N	–	
<i>M. olentangi</i>				37	Irregular coccus	N	–	
<i>M. tatii</i>	7.0			37–40	Irregular coccus	N	–	
<i>M. thermophilicum</i>	6.5–7.2			55–60 [†]	Irregular coccus	N	–	
<i>M. bourgense</i>	6.3–6.8			35–42	Irregular coccus	N	–	
<i>Methanocorpusculum aggregans</i>	6.4–7.2	35–37	Irregular coccus	N	–			

1.6.3 Productos finales de la digestión anaeróbica

El proceso de digestión anaerobia tiene como productos biogás y bioabono en sistemas de alta carga orgánica y una mezcla completa el cual consiste en un efluente estabilizado.

El biogás es un gas combustible que se produce a partir de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos. Se compone de una mezcla gaseosa formada principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), además contiene otros gases en menor cantidad como H₂S, H₂ y NH₃. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. El potencial calorífico inferior del biogás es aproximadamente de 5250 kcal/m³, para una riqueza en metano de 60%. La tabla 1.4 describe propiedades generales que presenta el biogás

Tabla 1.1: Características generales del biogás.

(Fuente: Varnero M., 2011)

Composición	55-70% Metano (CH ₄) 30-45% Dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 – 6,5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0,6 – 0,65 litro de petróleo/ m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650- 750° C (con el contenido de metano mencionado)
Presión crítica	74-88 atm
Temperatura critica	-82,5 °C
Densidad normal	1,2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16,043 kg/kmol
Llama de combustión	Azul pálido
Capacidad calorífica promedio	5.342 kcal/m ³ (600 Btu/pie ³)

El bioabono o digestato es semi-líquido y es utilizado como fertilizante que contiene sales solubles que contiene nitrógeno, potasio, fósforo, calcio entre otros; también puede contener microorganismos como hongos micorrízicos, bacterias fijadoras de nitrógeno y agentes bioquímicos fisiológicamente activos como enzimas, ácidos húmicos y aminoácidos etc. Este abono es orgánico y reemplaza a los fertilizantes sintéticos, de esta manera se regresa a la tierra los nutrientes tomados por las plantas.

El producto final dependerá del tipo de tecnología aplicada y de las materias primas utilizadas para la digestión. El contenido de materia orgánica es menor al de las materias primas y esto se debe a que una parte se transforma en metano.

El biogás producido en el sistema de digester anaerobio tiene tres productos finales de uso comercial: calor, electricidad y biometano.

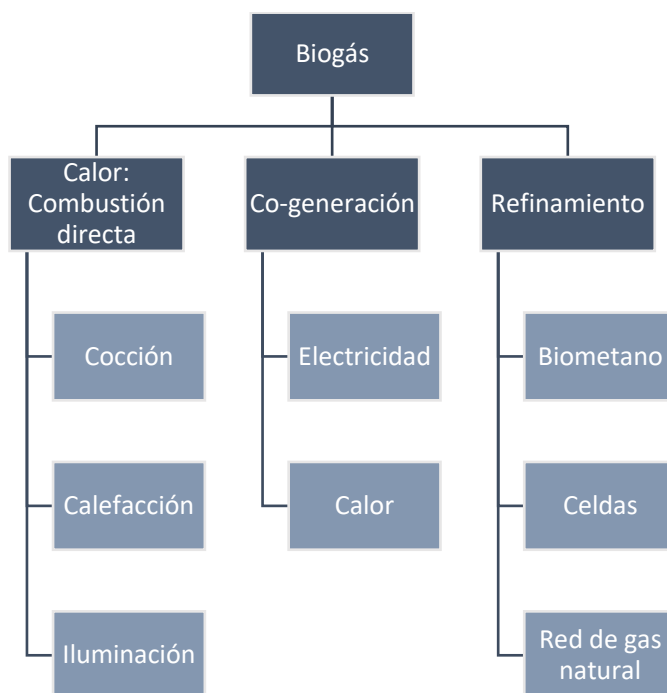


Figura 1.9: Conversión energética del biogás.

(Fuente: Núñez L., 2017).

La combustión directa es usada en cocinas, calderas, calefacción e iluminación. Algunas compañías queman el biogás sólo para obtener bonos de carbono como utilidades.

Para la co-generación, el biogás pasa por un proceso de purificación en el cual se elimina el sulfuro de hidrógeno, posteriormente el proceso de combustión se produce en motores de combustión interna. La co-generación se produce en motores de combustión interna y en microturbinas. Además de electricidad en esta vía se genera calor, el cual puede ser destinado para calentar el mismo biodigestor o algún proceso industrial.

La generación de energía térmica es el uso energético más sencillo que se le da al biogás. Los quemadores de biogás convencionales pueden ser utilizados para combustionar el gas si se cambia la relación aire-gas. Es necesario mantener niveles H₂S menores a 100 ppm y presiones de gas entre 8 y 25 mbar para correcta combustión del gas. La energía térmica en quemadores directos como suministro térmico en cocinas tiene una eficiencia usual del 90% (Carrasco J., 2015).

El consumo de biogás específico en diversas actividades se observan en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Consumo de biogás en diversas actividades
(Fuente: Arenas B.,2019)

	Característica	Cantidad	Unidad
Cocina	Quemador Ø 2"	0,320	m ³ /h
	Por persona/día	0,330	m ³ /día
	02 quemadores inyector Ø 2,0 "	0,500	m ³ /día
Horno	Cocina doméstica	0,440	m ³ /h
Refrigerador	Quemador inyector Ø 1,1"	0,077	m ³ /h
Motor	Ciclo Otto	0,450	m ³ /HP-h
Ducha a gas	Para baño	0,800	m ³
Incubadora	Espacio interno	0,600	m ³ /h
Campana de rayos infra-rojos	1.500 Kcal inyector Ø 2,0 ¹	0,162	m ³ /h
Calentamiento de agua	100°C	0,080	m ³ /t
Electricidad	1 kW/h	0,620	m ³ /h

1.6.4 Parámetros condicionantes de la digestión anaerobia

La digestión anaeróbica tiene como limitantes las condiciones en las que se desarrolla el proceso. Los parámetros de control más relevantes que tiene influencia en el proceso de forma general son de tipo

ambientales y operacionales, en la siguiente tabla se especifican cada uno de ellos. Parámetros más relevantes que van a determinar la digestión anaerobia

Fuente: (González A., 2014)

Parámetros ambientales	Parámetros operacionales
pH	Temperatura
Potencial redox	Agitación / mezclado
Nutrientes	Tiempo de retención
Tóxicos e inhibidores	Velocidad de carga orgánica

1.6.4.1 pH

El pH es fundamental para la actividad de los diversos microorganismos que participan en las etapas de la digestión anaeróbica, en donde:

- Microorganismos hidrolíticos pH entre 7,2 y 7,4
- Microorganismo acetogénicos pH entre 7 y 7,2
- Microorganismos metanogénicos pH entre 6,5 y 7,5

Para la mantención del pH es importante el equilibrio del sistema formado por las diversas formas de carbono inorgánico (dióxido de carbono, bicarbonato). Los residuos orgánicos complejos presentan uno de los pH más elevados, lo que les permite autorregular el pH en aquellas etapas que se genera una mayor concentración de ácidos. Si la regulación antes mencionada no ocurre se debe regular externamente el parámetro (una alcalinidad entre 2 y 3 g CaCO₃/L es suficiente para la regulación) (González A., 2014).

1.6.4.2 Potencial redox

El potencial redox es una medida de energía química de oxidación-reducción, se expresa en milivoltios (mV). En la digestión anaerobia es recomendable mantener un potencial redox entre -220 mV o -350 mV para asegurar el ambiente fuertemente reductor como condición favorable para el funcionamiento de las bacterias metanogénicas (Varnero M. ,2011).

1.6.4.3 Nutrientes

Los nutrientes son necesarios en los tratamientos biológicos debido que afectan al crecimiento de los microorganismos. Entre nutrientes necesarios se encuentran principalmente son el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), además de minerales trazas como calcio, potasio, azufre, sodio, magnesio y hierro, necesarios para la activación de enzimas para la metanogénesis.

La relación de C/N debe estar entre 15/1 y 45/1, con un valor recomendable de 30/1 (Elías et al., 2012).

1.6.4.4 Tóxicos inhibidores de la metanogénesis

En presencia de sustancias tóxicas en el sistema, el proceso de digestión anaeróbica es inhibido. Las sustancias tóxicas pueden provenir de la materia prima que entra al biodigestor o pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Las sustancias que pueden generar la inhibición son amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, de procedencia de la materia prima de entrada. En relación con la generación de productos, se encuentran sustancias como sulfuro, amoníaco y ácidos grasos volátiles (AGV), estos últimos pueden tener efectos adversos en el pH.

La producción de AGV en relación con el pH puede elevar la concentración de las especies no ionizadas o no disociadas, con un efecto celular interno, ya que estas migran con mayor facilidad a través de la membrana celular, funcionan como ácidos débiles amortiguadores manteniendo el pH más bajo. Asimismo, también pueden ejercer un efecto inhibitorio con el pH sobre el consorcio microbiano presente.

1.6.4.5 Temperatura

La temperatura y la velocidad de crecimiento de los microorganismos están ligados con la velocidad de reacción de los procesos biológicos. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y a su vez acelera el proceso de digestión. Es por ello que el control de la temperatura es fundamental y debe mantenerse lo más constante posible. Variaciones mayores a $\pm 2^{\circ}\text{C}$ afectan el proceso (Núñez L., 2017).

La temperatura de operación del digestor es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la influencia que tiene en la velocidad de digestión anaeróbica. Además, la temperatura del lugar geográfico o lugar de instalación del biodigestor también influirá en la estabilidad de la temperatura ya que las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la

desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y de ser necesario un controlador de temperatura.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. Al aumentar la temperatura desciende la solubilidad de los gases generados, favoreciéndose la transferencia líquidos-gas. Este efecto es positivo para gases como amoníaco (NH_3), hidrogeno (H_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos, por otra parte, disminuye la solubilidad del CO_2 aumentando el pH, lo que generaría en lodos una elevada concentración de amonio.

La solubilidad de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para las diferentes bacterias involucradas en la digestión anaeróbica.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Varnero M., 2011).

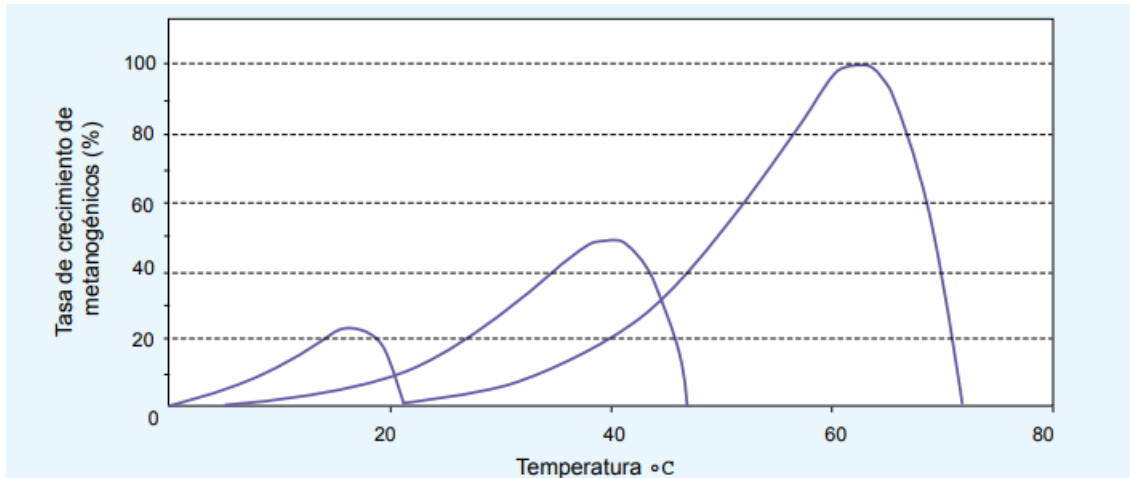


Figura 1.10: Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilos, mesófilos y termófilos.
(Fuente: Varnero M., 2011).

Tabla 1.3: Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica
(Fuente: Varnero M., 2011).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrófilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesófilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

El régimen mesófilo de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se encuentra implementando cada vez más el régimen termófilo para conseguir una mayor velocidad del proceso. Las consecuencias de este rango son: un aumento en la eliminación de organismos patógenos y la inestabilidad ante cualquier cambio de las condiciones de operación.

1.6.4.6 Agitación/mezclado

La agitación de la materia orgánica es favorable para el medio en el que se está dando la digestión anaerobia por:

- Remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas
- Mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana
- Evita la formación de costra dentro del digestor y formación de espumas
- Se alcanza una distribución uniforme del calor para mantener una isoterma correcta.

La agitación puede ser mecánica o neumática (a través del burbujeo del gas recirculado a la presión adecuada), y nunca será violenta, ya que podría destruir los agregados de bacterias que generan que el proceso sea estable.

1.6.4.7 Tiempo de retención y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención hidráulico (TRH) junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor.

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende de la temperatura anteriormente mencionada; mientras mayor se la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para una buena producción de biogás.

La figura 1.11 muestra la tendencia general de los índices de eliminación de materia orgánica (solidos volátiles, SV) y la producción de gas, por unidad de volumen de reactor, en función del tiempo de retención.

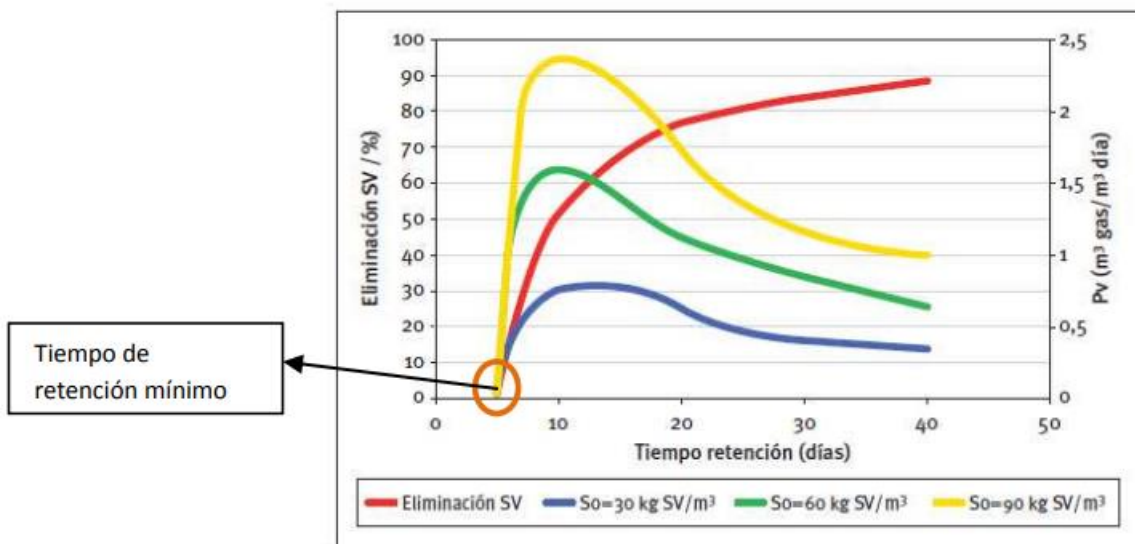


Figura 1.11: Eliminación de sólidos volátiles (Sv) en porcentaje y producción volumétrica de gas (Pv)(m³ biogás /m³ digerido*día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico.

Fuente: (González,2014).

Como se observa en la figura existe un tiempo de retención mínimo por debajo del cual el reactor no presenta actividad. La eliminación de la materia orgánica sigue una tendencia en el tiempo asintótica, con una eliminación completa en un tiempo infinito.

1.6.4.8 Materia seca

La materia prima, antes de ser utilizada en el proceso, se le conoce como materia fresca (FM por sus siglas en inglés). La materia seca (“Dry Matter” DM) el porcentaje de materia orgánica e inorgánica que contiene la materia prima luego que se le ha quitado el agua. La medición se realiza mediante ensayos gravimétricos. Cuando la materia prima tiene un alto contenido de materia seca (mayor al 15%), es necesario un pretratamiento de dilución para evitar problemas en el mezclado y bombeo de la materia prima. Además, un alto contenido de materia seca entorpece la movilidad de las bacterias metanogénicas en el digestato, lo que afecta a la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. En cambio, si el contenido de materia seca es muy bajo (menor al 2%), entonces el volumen del reactor tendrá que ser mayor pues la concentración de nutrientes es menor.

1.6.4.9 Materia orgánica seca

Cuando a la materia seca se le quita todo lo inorgánico (minerales, cenizas, etc.), entonces lo que queda es la materia orgánica seca (“Organic Dry Matter”, ODM). Su medición nos da una idea sobre la biodegradabilidad de la materia prima. Su medición se realiza mediante ensayo gravimétrico. El ensayo consiste en secar la materia prima en una estufa a 103 °C para obtener la cantidad de materia seca, y luego secarla en una mufla a una temperatura de 500 °C hasta una masa constante. Si bien es cierto que la medición de la ODM nos da una idea de la biodegradabilidad de la materia prima, esto no es tan preciso, pues algunas sustancias orgánicas podrían volatizarse a temperaturas de 103 °C. No es válido expresar la producción específica de biogás con respecto a la masa de materia prima fresca, pues esto varía dependiendo del contenido de agua y material inorgánico. Es por esto que la producción específica es referida a la materia seca orgánica, pues es solo está la que posee la potencialidad de que se convertirá en biogás.

1.6.4.10 Relación de alcalinidad

El control de pH en anaerobiosis se produce por el sistema carbonato ácido/básico. Si la concentración de ácidos volátiles aumenta, la alcalinidad del bicarbonato actuará neutralizando los mismos.

En los procesos anaerobios, los dos principales factores que afectan el pH son el ácido carbónico y los Ácidos Grasos Volátiles (AGV). El pH y la capacidad tampón en un sistema anaerobio son completamente dependientes del equilibrio entre el gas carbónico (CO_2) y el ion bicarbonato que regula la concentración de ion hidrógeno.

La inestabilidad del proceso puede estar relacionada con una sobrecarga orgánica, presencia de agentes inhibidores o tóxicos en el agua residual o variación de la temperatura. En cualquier caso, ocurre que la producción de los ácidos orgánicos en el reactor se hace superior al consumo de los mismos y en consecuencia, aumenta en el sistema la concentración de ácidos volátiles y disminuye la de bicarbonatos, que se descomponen en CO_2 , con la respectiva formación de sales de ácidos volátiles.

Durante cierto tiempo, las sustancias que ejercen un poder tampón impiden la caída del pH. Solamente cuando toda la alcalinidad del medio no es suficiente para la neutralización de los ácidos volátiles, ocurrirá la caída del pH. Por lo tanto, este parámetro se manifiesta muy tarde para poder corregir las fallas del proceso. Por ello, es importante evaluar simultáneamente los parámetros de pH, alcalinidad y ácidos grasos volátiles. (Pérez y Torres, 2008).

A bajas temperaturas, acorde a la ley de Henry, más CO_2 permanece en fase acuosa, promoviendo la formación de más iones bicarbonato, incrementando a su vez la capacidad buffer del sistema. Esto explica que la capacidad buffer sea mayor en los sistemas que funcionan a temperaturas mesofílicas, en lugar de los termofílicos.

El aumento de la capacidad buffer de un digestato se consigue mediante la reducción de la carga orgánica (reducción del flujo de ingreso de materia prima), aunque la adición directa de bicarbonato es una solución más rápida. También se puede amortiguar mediante el incremento de la temperatura, a causa de que la concentración de amoníaco aumentará. Sin embargo, altas concentraciones de amoníaco generan una inhibición de los microorganismos metanogénicos provocando mayor concentración de ácido acético.

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft/FAL) desarrolló el análisis de FOS/TAC a partir de una prueba de valoración (Método Nordmann) con el fin de determinar el cociente de la concentración acida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación.

FOS significa Flüchtige Organische Säuren, es decir, ácidos orgánicos volátiles y se mide en mg Ácido Acético/L. TAC significa Totales Anorganisches Carbonat, esto es, carbonato inorgánico total (capacidad de compensación alcalina), y se mide en mg CaCO_3 /L. La relación FOS/TAC permite detectar a tiempo los problemas del proceso y así tomar medidas para corregir.

Para fines prácticos se puede tomar como referencia los valores expuestos en la Tabla 1.5, al igual que las recomendaciones de operación para cada caso.

Tabla 1.4: Valores empíricos y reglas para la evaluación de las relaciones FOS/TAC proporcionados por DEULA-Nienburg.

(Fuente: Reynoso M., 2017)

Valor relación FOS/TAC	Antecedentes	Medida
>0,6	Excesiva sobrealimentación de biomasa	Interrumpir la adición de biomasa
0,5-0,6	Excesiva entrada de biomasa	Agregar menos biomasa
0,4-0,5	La planta está muy cargada	Vigilar la planta más estrechamente
0,3-0,4	La producción de biogás es máxima	Mantener constante la entrada de biomasa
0,2-0,3	La entrada de biomasa es muy baja	Aumentar lentamente la entrada de biomasa
<0,2	La entrada de biomasa es bajísima	Aumentar rápidamente la entrada de biomasa

1.7 Potencial bioquímico de metano

La prueba de potencial bioquímico de metano (“Biochemical Methane Potential”, BMP) sirve para evaluar de forma rápida si un residuo puede ser correctamente degradado y así producir metano. El valor experimental está dado como volumen de metano por unidad de masa de sólidos volátiles (mL CH₄/g SV) adicionados al reactor. La biodegradabilidad de una materia prima está indicada por el rendimiento de CH₄, es decir, por el porcentaje de sólidos que se adicionan o destruyen durante la degradación anaerobia. Aunque no se ha definido un método estándar para determinar el BMP, diversos autores han propuesto procedimientos de ensayo para inferirlo al utilizar diferentes relaciones materia prima: inóculo o al modificar las condiciones de temperatura, pH, tamaño de partícula de la materia prima y/o agitación (Sánchez et al, 2016).

Con base a lo anterior, en el presente trabajo se utilizarán las relaciones materia prima: inóculo 1:1 (Arenas, 2019), la materia prima se somete a un proceso batch de digestión anaerobia en condiciones controladas de temperatura, el proceso tendrá una duración aproximadamente de 30 días y antes y después de la prueba se debe medir el pH para determinar si se ha producido alguna acidificación. Los volúmenes de los reactores por lo general son de 0,5 a 1 litro. La norma técnica utilizada para realizar este ensayo corresponde a la VDI 4630 alemana.

El prototipo de ensayo BMP implementado en esta tesis es de bajo costo, pero cumpliendo con los requisitos y normas para que los resultados obtenidos sean fidedignos, cuya descripción del prototipo será realizada más adelante.

1.7.1 Inóculo

Es el conjunto de microorganismos (hidrolíticos, acidogénicos, acetogénicos y metanogénicos) que intervienen en el proceso. Estos microorganismos viven solamente en un medio anaerobio, con pH y temperatura adecuado.

En el interior de los reactores para el ensayo BMP contendrán los residuos orgánicos con un inóculo con los microorganismos anaerobios necesarios para iniciar el proceso de digestión. El tipo de inóculo generalmente utilizado son estiércol de ganado o aguas de lavado de criadero.

El estiércol puede ser de cerdos, caballos, aves de corral, vacuno, etc. Dependiendo de la fuente animal y de la alimentación del ganado varía la producción de biogás de cada tipo de estiércol animal.

El estiércol es un iniciador económico y tiene la ventaja de poseer una relación carbono-nitrógeno (C/N) alrededor de 25:1 lo que favorece al proceso de digestión anaerobia y además cuenta con nutrientes necesarios para el desarrollo de microorganismos anaerobios.

De acuerdo con VDI-4630, el inóculo deber ser desgasificado, con la finalidad de agotar todo el material orgánico residual biodegradable presente en él. Para ellos se lo almacena, durante una semana, a las mismas condiciones de temperatura que la prueba posterior.

1.7.2 Materia prima

La utilización de un sustrato como materia prima, está determinada en función de su idoneidad y de su disponibilidad.

La disponibilidad es sumamente importante, pues la potencialidad de biogás de cierta materia prima puede ser alta, pero si no se cuenta con el volumen suficiente que satisfaga la demanda por parte del proceso, entonces no se puede poner en marcha el biodigestor.

La materia prima que no se descompone, mediante la digestión anaeróbica a componentes más simples, no otorga a los microorganismos los elementos necesarios para la producción de biogás, por lo que esta se retrasa o disminuye. Los ensayos BMP permiten saber la biodegradabilidad o (digestibilidad) de la materia prima. Los carbohidratos de bajo peso molecular, los ácidos grasos volátiles, y alcoholes son digeridos en horas. Las proteínas, hemicelulosa y lípidos en días. Materiales como la lignina y/o celulosa necesitan semanas para degradarse completamente. Si la degradación se retrasa el tiempo de retención hidráulica aumenta, esto implica que los volúmenes de los reactores sean mayores, lo cual aumenta el costo de inversión y de operación (Núñez L., 2017).

2 PROBLEMA

En la actualidad en Chile una persona genera 1,19 kilos de residuos diarios, el 58% corresponde a residuos orgánicos (ENRO, 2020) teniendo como destino final rellenos sanitarios. Esto tiene un impacto medioambiental: la generación de gases de efecto invernadero y la producción de lixiviados.

La valorización de los residuos orgánicos existente es baja, comprende un 1% del total de la masa generadas cada año. La Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (2020) plantea acciones para alcanzar, al 2040, un 66% de la valorización de los residuos orgánicos generados a nivel municipal. Además, la Ley 20.920 establece que las municipalidades deben dar cumplimiento a “separar los residuos en origen y fomentar el reciclaje” y “promover la educación ambiental de la población sobre la prevención en la generación de residuos y su valorización”.

Por lo anterior, este proyecto de título presentará un prototipo de un biodigestor a partir de los residuos orgánicos generados en el casino CIAE de la Universidad de Valparaíso; impulsando de esta forma la valorización energética y una economía circular.

La valorización de los residuos en el edificio conllevaría a una gestión responsable por parte de la Universidad de Valparaíso, en su Decreto Exento N° 222 de 2021, la institución creó la Unidad de Medio Ambiente y Sostenibilidad (UMAS) que es dependiente de la Vicerrectoría de Vinculación con el Medio, cuyo objetivo es proponer actividades e iniciativas para establecer prácticas internas sostenibles en cuanto a gestión de residuos y eficiencia en uso energético en la Universidad.

Actualmente el país no produce gas natural, por lo tanto, depende de la importación del producto, valorizar los residuos orgánicos del edificio y utilizarlo como comburente en las cocinas del casino, fomenta la independencia energética. Chile carece de una política de estado que cubra o dote de

instrumentos estructurales, con opciones de largo plazo, que permitan enfrentar adecuada y oportunamente la inestabilidad que se generaría si cesan las importaciones de gas natural. Además en el ultimo tiempo el costo de adquisición de gas licuado se ha ido en alza, afectando a la ciudadanía en general.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnicamente la factibilidad de la generación de biogás a partir de los residuos orgánicos generados en el Centro Integral de Atención al Estudiante.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar y cuantificar los residuos orgánicos generados en el CIAE.
- Determinar la generación de biogás a partir de los residuos orgánicos originados en el CIAE.
- Estimar la generación de gas metano mediante la aplicación del modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Realizar el diseño preliminar de un biodigestor.

4 METODOLOGÍA

El desarrollo del presente proyecto de título se llevó a cabo mediante información obtenida por medio de mediciones de residuos orgánicos generada en el edificio CIAE de la Universidad de Valparaíso e información bibliográfica.

4.1 CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS

La actividad se realizó en el Centro Integral de Atención al Estudiante (CIAE) ubicado en calle Blanco 1931, Valparaíso. Para lograr el objetivo, se llevó a cabo una reunión con el personal de administración del edificio, en la que se presentó un plan de trabajo para la segregación y cuantificación de residuos orgánicos. En el plan se explicó el objetivo de la cuantificación de los residuos generados diariamente en el servicio de alimentación, además se incluye en el plan la sensibilización de los trabajadores de cocina para su colaboración para la cuantificación de residuos.

El tiempo de cuantificación de residuos se basó en la reunión con el personal del casino. La cantidad de residuos medidos se tabularon en una planilla (tabla 4.1).

Tabla 4.1: Registro cuantificación de residuos.

Fuente: (Elaboración propia).

Fecha:	
Valor (kg)	característica de los residuos

4.2 GENERACIÓN DE BIOGÁS

4.2.1 Cámara de prueba de Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

La prueba del potencial bioquímico de metano (BMP) se fundamentó en las indicaciones de la norma técnica alemana VDI-4630.

Para el proceso de digestión anaerobia requiere de una temperatura constante, es por esto por lo que la prueba se realizó a una temperatura de 37°C. Por consiguiente, la cámara conto con un sistema de calefacción y control de temperatura.

El biogás que se produjo en los reactores fluyo hacia el exterior de la cámara a través de una manguera hasta el sistema de medición, además se midió en paralelo la concentración de metano. En la figura 4.1 se presenta la esquematización de los bloques que componen la cámara de BMP.

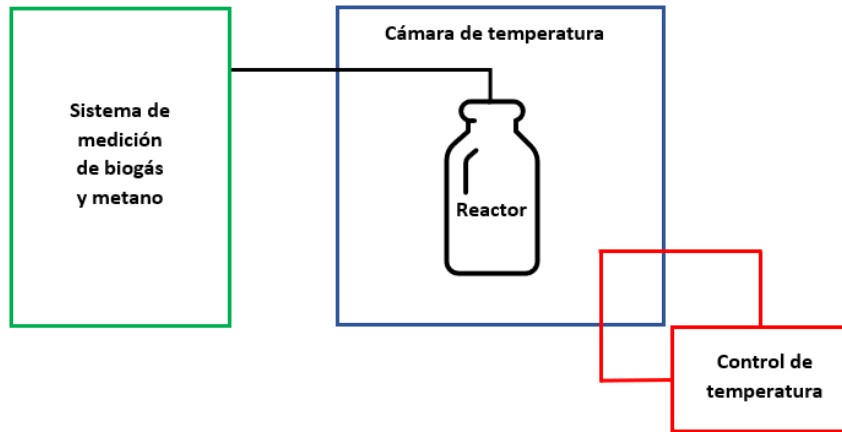


Figura 4.1: Diagrama básico de la cámara de prueba para medir BMP.

4.2.1.1 Componentes de la cámara de prueba

- **Cámara de temperatura**

Para mantener una temperatura constante se necesita un medio conductor en la cámara el que puede ser agua o aire. Para la prueba de BMP se utilizó un prototipo de baño maría. Como cámara se utilizó un recipiente plástico de capacidad de 28 litros de volumen.

- **Calentador para baño maría**

La elección del calentador se basó en el requerimiento de la resistencia eléctrica necesario para elevar la temperatura de los 27 litros de agua (volumen de llenado del recipiente), desde la temperatura ambiente promedio de la ciudad de Valparaíso, hasta llegar a los 37°C requeridos para los reactores.

Para obtener la resistencia se necesita conocer el calor requerido para llegar a 37°C el cual se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot C_e \cdot (T_f - T_i)$$

Donde:

Q: calor requerido (kJ)

M: masa de agua a calentar (kg)

C_e: calor específico del agua (4186 J/kg °K)

T_f - T_i: temperatura final y temperatura inicial respectivamente (K)

Asumiendo que el cambio de temperatura del agua se da en una hora la potencia de la resistencia eléctrica se obtiene de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{W}{t}$$

Donde:

W: calor requerido para realizar el trabajo [kJ]

T: tiempo en que existe un cambio de temperatura (seg)

- **Reactores**

Los reactores que se utilizaron son botellas de vidrio de 1 litro de volumen de color ámbar, herméticamente cerradas con tapones de goma, las cuales se les perforo un orificio para la salida de biogás generado en el sistema para su cuantificado posterior.

Se utilizaron 2 reactores en la prueba de BMP los cuales contuvieron el mismo contenido en su interior, en uno de ellos se cuantifico el volumen de biogás producido y en el otro la producción de metano. En el interior de los reactores contuvieron un inóculo más una mezcla de residuos orgánicos.

Los residuos orgánicos contenidos en los reactores son aquellos que con más frecuencia se generan en el casino del edificio CIAE.

Para realizar la prueba es necesario un inóculo, el cual será guano fresco de vacuno aportando los microorganismos necesarios que intervienen en el proceso. El guano se obtendrá de un criadero de vacunos cerca del Estero Mala Cara en Quintero, Valparaíso. De acuerdo con VDI-4630, el inóculo debe ser desgasificado en un periodo de una semana.

- **Sistema de medición de biogás y metano**

El biogás generado en el reactor es conducido mediante una manguera de silicona hasta el exterior de la cámara donde se encuentra un sistema de medición integrado por diversos materiales de laboratorio. La medición del volumen de gas generado se realizó mediante desplazamiento de fluidos (líquidos o gases). Para medir solamente el volumen de metano se utilizó un filtro de una solución de hidróxido de sodio para solubilizar el dióxido de carbono y dejar fluir solamente el metano.

4.2.1.2 Desplazamiento de líquido

Se utilizo una botella de vidrio de 500 ml, y una probeta milimetrada de 200 ml. Para la medición de biogás en la botella se usó una solución acida de pH 3 con la finalidad de evitar una medición errónea si se utilizara una solución neutra, ya que el CO₂ se solubiliza en pH cercano a 7.

En la figura 4.2 esquematiza el sistema de medición del biogás, el gas que se genera en el reactor es conducido por la manguera 1 hasta la cabecera de la botella de desplazamiento. Cuando la presión del gas en la cabecera sobrepasa la presión atmosférica y la presión hidrostática, el líquido fluye a través de la manguera 2 y luego puede ser medido en la probeta milimetrada, correspondiendo al biogás generado.

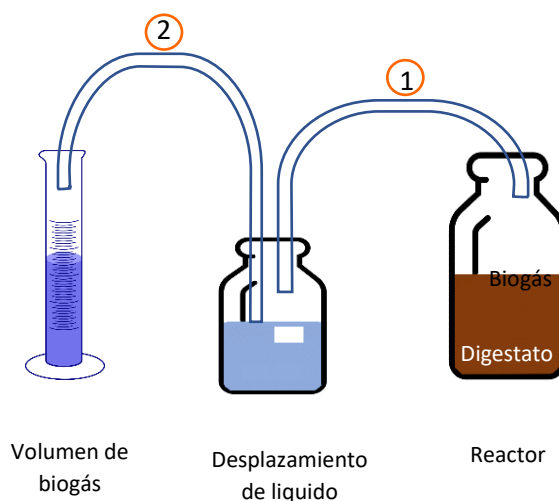


Figura 4.2: Esquema de sistema de medición de biogás.

El biogás obedece la ecuación de gases ideales. Para contrarrestar las expansiones y compresiones que sufre el gas en función de la variación de la temperatura; se expresa el volumen de gas en condiciones normales. Esto es a 273,15 (K) de temperatura y 101.325 (Pa) de presión.

En la cabecera de la botella de desplazamiento están presentes la presión atmosférica, la presión hidrostática del líquido de desplazamiento, la presión del gas y la presión de vapor de agua. Por lo tanto, para obtener la presión del gas se debe sumar la presión hidrostática a la presión atmosférica y sustraer la presión del líquido de desplazamiento.

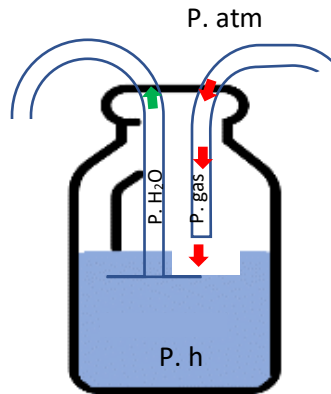


Figura 4.3: Presiones presentes en el líquido de desplazamiento.

Luego para calcular el volumen del gas a condiciones normales y sin la presión de vapor, se usa la siguiente ecuación la cual es obtenida a partir de la ecuación de gases ideales.

$$V_N = V * \frac{(P - P_W) * T_N}{P_N * T}$$

Donde:

V_N : Volumen del gas seco en condiciones normales.

V : Volumen del biogás medido en el líquido.

P : Presión atmosférica más presión hidrostática.

P_W : Presión de vapor (dependen de la temperatura y la presión atmosférica).

T_N, P_N : Temperatura normal (273,15 K) y presión normal (101,325 kPa).

T : Temperatura del biogás en la cabecera del líquido de desplazamiento.

La presión de vapor (P_W) del agua en el aire está en función de la temperatura y puede ser calculada por medio de la ecuación de Antoine.

$$\ln(p^*) = A - \frac{B}{C+T}$$

Donde A, B y C son constantes adimensionales.

Los valores de las constantes son específicos para cada sustancia. Para el agua en un rango de temperatura de 284 a 441 K, los valores de las constantes corresponden a los siguientes: $A=18,3036$, $B= 3816,44$ y $C= -46,13$

Las mediciones de temperatura fueron realizadas una vez al día, al mismo tiempo que se hacían las mediciones de volumen. Si el líquido de desplazamiento se agota se debe recargar la botella en igual volumen inicial.

Para la medición de metano se necesita de un filtro de dióxido de carbono. El filtro que se utilizó fue una solución de hidróxido de sodio de 1 molar (40 gramos de hidróxido de sodio en 1 litro de agua). La solución de scrubber se irá reemplazando cada 3 días.

El filtrador de CO_2 se colocará en un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Al igual que los reactores se encontrará sellado con un tapón de goma. El biogás es conducido hacia la solución de hidróxido de sodio, el CO_2 se solubilizará formando carbonato de sodio y agua. Luego solamente el metano fluye a través de la manguera 2 hasta la cabecera de la botella de desplazamiento para la medición de volumen. En la figura 4.4 se esquematiza la filtración del CO_2 por el NaOH.

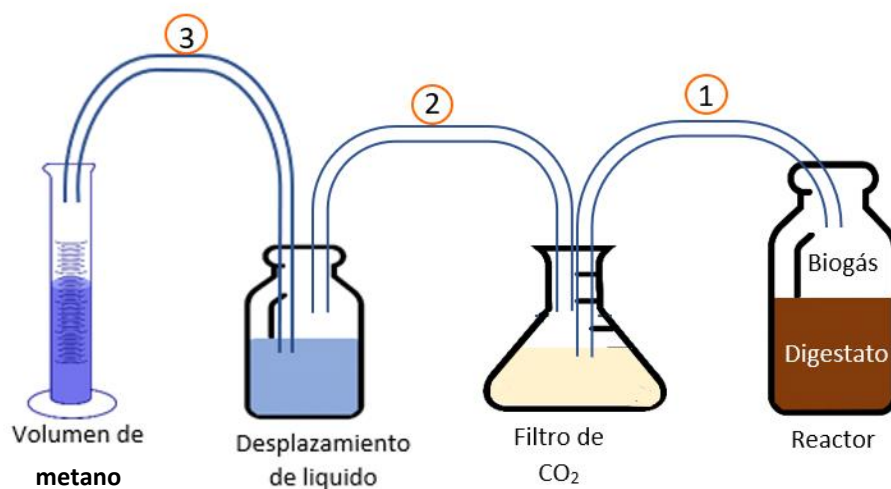


Figura 4.4: Esquema de sistema de medición de Metano.

Este sistema se implementó con la finalidad de medir el porcentaje de metano en el biogás producido por los residuos orgánicos del casino del edificio CIAE.

- Reactor

El contenido de las pruebas constará de un digestato y una mezcla de residuos orgánicos. El digestato o insumo iniciador aportara los microorganismos que producirán el biogás al iniciar el sistema (Yeison, 2009) así como también materia orgánica. Para el ensayo se obtendrá el inóculo a partir de estiércol fresco de ganado vacuno.

De acuerdo con VDI-4630, el inóculo debe ser desgasificado. Para ello se almacenará, durante una semana en botellas de vidrio de 1 litro de color ámbar, a las mismas condiciones de temperatura que tendrá durante el ensayo. Los recipientes se encontrarán parcialmente cerrados para no sobrepasar la presión que puede soportar la botella.

La relación adecuada del iniciador con el agua es de 1:1 (Arenas, 2019) para la desgasificación, se utilizarán 2 botellas con un volumen de llenado de 750 ml, donde la mitad es de agua y el otro de estiércol. Debido a que el guano de vacuno no corresponde a un líquido, sino que una mezcla de materia orgánica y fluidos, se basara la proporción a partir de su densidad la cual es de $0,64 \text{ g/cm}^3$ (Barbazán et al, 2011).

Una vez finalizada la semana de desgasificación, se realizó la identificación de microorganismo, el objetivo principal es concretar que la prueba de BMP funcionaria, debido a que las bacterias son las encargadas de la generación de metano en el sistema. La identificación se realizó mediante un cultivo bacteriano y posteriormente se efectuó una tinción de Gram.

- Siembra de muestras en agar SPC para la identificación de microorganismos.
1. Incubación de las colonias en cajas Petri durante 4 días (105 horas exactamente) a una temperatura ambiente.
 2. Prueba de Tinción de Gram, aplicación de sustancias químicas y lavado descritos a continuación:
 - o Cristal Violeta 1 minuto
 - o Lugol 1 minuto
 - o Acetil Cetona 30 segundos
 - o Fucsina 15 segundos.
 3. identificación de microorganismos mediante observación en microscopio.

Ya finalizada la identificación de microorganismo, el contenido de los reactores se mezcla con los residuos. La mezcla de residuos orgánicos seleccionados, son aquellos más frecuentes generados en el edificio CIAE. Los residuos previos al ser mezclados con el inóculo fueron triturados con el fin de aumentar la superficie de contacto para favorecer la degradación de los microorganismos aportados por el insumo iniciador, como se señala en VDI-4630.

Con respecto a las proporciones entre sustrato e inóculo, la norma alemana VDI-4630 sugiere que, para evitar inhibiciones por exceso de sustrato, la materia orgánica seca (ODM) del sustrato sea como limite el doble de la ODM de la solución de inóculo. En la siguiente ecuación se presenta la relación de proporción entre sustrato e inóculo.

$$R_{\text{sus/ino}} = \frac{\text{masa ODM sustrato}}{\text{masa ODM inóculo}} \leq 0,5$$

4.2.1.3 Monitoreo de parámetros de la cámara de prueba de BMP

4.2.1.4.1 Control de pH

El pH en los reactores se medirá de forma manual en el inicio y final de la prueba de medición de metano y biogás. Para realizar las mediciones se utilizó un medidor de pH/mV de sobremesa serie PHS-W modelo PHS-25CW



Figura 4.5: Medidor de pH.

4.2.1.4.2 Control de temperatura

La temperatura se medirá en distintos puntos del sistema como los son la cabecera de las botellas, la temperatura del agua del baño maría y la temperatura ambiente del laboratorio. Para las dos primeras se utilizará termómetro infrarrojo y para la temperatura ambiente del laboratorio un termohigrómetro.

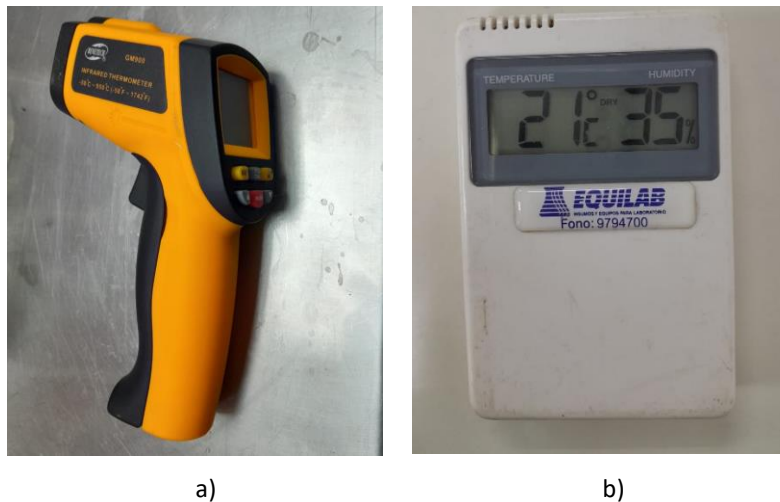


Figura 4.6: a) Termómetro infrarrojo, b) termohigrómetro

4.2.1.4.3 Relación de alcalinidad

La alcalinidad se determinará según la relación FOS/TAC. Los ácidos grasos volátiles (FOS) y la capacidad buffer del sistema (TAC) se determinará mediante una titulación manual, agregando al digestato más los residuos un ácido, hasta alcanzar pH 5 y 4,4 reemplazando la cantidad de volumen utilizado en la siguiente ecuación (Núñez L., 2017).

$$\frac{FOS}{TAC} = \frac{(1,66*B-0,15)*500 \left[\frac{mg}{LHAc}\right]}{250*A \left[\frac{mgCaCO_3}{l}\right]}$$

Donde:

A: Volumen de ácido añadido desde el pH inicial hasta pH 5,0 (ml)

B: Volumen de ácido añadido desde pH 5,0 hasta pH 4,4 (ml)

Esta doble titulación se realizó en 20 ml de muestra de digestato más residuos, filtrada por vacío (figura 4.8), utilizando una solución de ácido sulfúrico (0,05 mol/L). El parámetro A es el volumen del ácido sulfúrico añadido a la muestra de 20 ml de digestato desde su pH original hasta pH 5,0. El parámetro B es el volumen del ácido sulfúrico añadido a la muestra desde el pH 5,0 hasta el pH 4,4.

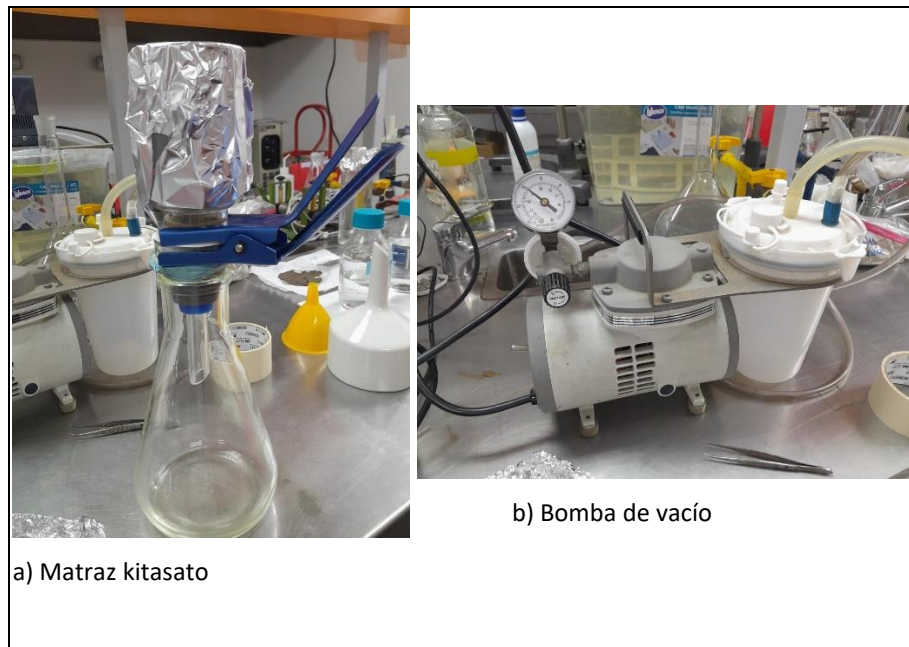


Figura 4.7: Materiales para filtración al vacío.

La muestra de 20 ml se vertió en un vaso precipitado, el cual ubico sobre un agitador magnético y en el interior del vaso se introdujo una barra agitadora magnética, para mezclar la mezcla en su interior. El monitoreo del descenso del pH se realizó con el pHmetro descrito anteriormente.

La adición del ácido sulfúrico se realizó mediante una bureta milimetrada de 40 ml. La medición se realizó al inicio de la prueba y al finalizar.

4.3 Estimación de la generación de gas metano mediante la aplicación del modelo del IPCC

El modelo matemático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático se basa en un balance de masa, en el cual la estimación de la producción de biogás depende de las categorías de residuos, el carbono orgánico degradable y del gas metano.

En este método se formula la hipótesis de que el componente orgánico degradable de los residuos se descompone lentamente a lo largo de unas pocas décadas, durante las cuales se forman el metano y el dióxido de carbono. Si las condiciones permanecen constantes, el índice de producción de metano depende únicamente de la cantidad de carbono restante en los residuos (INECC, 2020).

Las emisiones de CH₄ procedentes de la eliminación de desechos sólidos durante un solo año pueden estimarse con la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \left[\sum_x CH_4\ generado_{x,T} - R_T \right] * (1-OX_T)$$

Donde:

Emissiones de CH₄= CH₄ emitido durante el año T (Gg)

T= año de inventario

X= categoría o tipo de desecho y/o material

R_T= CH₄ recuperado durante el año T (Gg)

OX_T= factor de oxidación durante el año T, (fracción)

La cantidad de personas beneficiadas por la extracción de metano se identifica con la siguiente ecuación:

$$P_{be} = \frac{BT}{CB}$$

Donde:

P_{be}= número de personas beneficiadas

BT= cantidad total de biogás generado (m³)

CB= biogás empleado por persona al día (m³/día)

El CH₄ potencial que se genera a través de los años puede estimarse sobre la base de las cantidades y la composición de los desechos eliminados y de las prácticas de gestión en los sitios de eliminación en esta situación en específica un biodigestor. La base para el cálculo es la cantidad de carbono orgánico degradable descomponible (DDOC, del inglés, Decomposable Degradable Organic Carbon), DDOC_m es la parte del carbono orgánico que se degrada en condiciones anaeróbicas, el subíndice "m" se refiere a la masa producto de la cantidad de desechos (W), de la fracción de carbono orgánico degradable contenido en los desechos (DOC), de la fracción de carbono orgánico degradable que se descompone bajo condiciones anaeróbicas (DOC_i) y de la parte de los desechos que se descomponen bajo condiciones aeróbicas (antes de que las condiciones se vuelvan anaeróbicas), lo cual se interpreta con el factor de corrección del metano (MCF).

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

Donde:

$DDOC_m$ = masa del DDOC depositado (Gg)

W = masa de los desechos depositados (Gg)

DOC = carbono orgánico degradable durante el año de deposición, fracción (Gg de C/Gg de desechos)

DOC_f = fracción del DDOC que puede descomponerse (fracción)

MCF = factor de corrección de CH_4 para la descomposición aeróbica durante el año de deposición (fracción)

$$L_o = DDOC_m * F * \frac{16}{12}$$

Donde:

L_o = potencial de generación de metano (Gg de CH_4)

$DDOC_m$ = masa del DOC descompuesto depositado (Gg)

F = fracción de CH_4 en el gas generado (fracción de volumen)

$\frac{16}{12}$ = cociente de pesos moleculares CH_4/C

4.2.2.1 Elementos de la descomposición de primer orden

En una reacción de primer orden la cantidad de producto siempre es proporción a la cantidad de material reactivo. Lo único que cuenta es la masa total de material en descomposición para determinar la cantidad de metano generado cada año.

$DDOC_m$ acumulado al término del año T

$$\text{DDOCma}_T = \text{DDOCmd}_T + (\text{DDOCmd}_{T-1} * e^{-k})$$

DDOCm descompuesto durante el año T

$$\text{DDOCm descomp}_T = \text{DDOCma}_{T-1} * (1 - e^{-k})$$

Donde:

T= año del inventario

DDOCma_T = DDOCm acumulado al final del año T (Gg)

DDOCma_{T-1} = DDOCm acumulado al final del año (T-1) (Gg)

DDOCmd_T = DDOCm depositado durante el año T (Gg)

DDOCm descomp_T = DDOCm descompuesto durante el año T (Gg)

K= constante de reacción

4.2.2.2 Metano generado a partir del DDOCm descompuesto

Para determinar la cantidad de metano que se forma a partir del material que puede descomponerse, se multiplica la fracción de metano contenida en el gas de vertedero generado por el cociente de pesos moleculares CH₄/C.

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = \text{DDOCm descomp}_T * F * \frac{16}{12}$$

Donde:

CH_4 generado_T= cantidad CH_4 generado a partir del material en descomposición

DDOCm descomp_T= CH_4 descompuesto durante el año T (Gg)

F= fracción volumétrica de CH_4 en el gas de vertedero generado (fracción)

$\frac{16}{12}$ = cociente de pesos moleculares CH_4/C

4.2.2.3 Elección de factores y parámetros de emisión

- Fracción de corrección para el metano (MCF)

Las prácticas de eliminación de desechos varían del control, la disposición de los desechos y la gestión del sitio. Se asigna un MCF dependiendo de la categoría, como se muestra en la figura 4.3. Se proporciona un valor por defecto para los países donde no se conoce la cantidad de desechos eliminados en cada sitio de eliminación de desechos sólidos (SEDS).

Tabla 4.2: Factor de corrección de metano.

(Fuente: Pérez J., 2010)

Tipo de sitio	Valores por defecto del Factor de corrección de metano (MCF, del inglés, <i>Methane Correction Factor</i>)
Gestionado – anaeróbico ¹	1,0
Gestionado – semi-aeróbico ²	0,5
No gestionado ³ – profundo (>5 m desechos) y/o capa freática elevada.	0,8
No gestionado ⁴ – poco profundo (<5m de desechos)	0,4
SEDS no categorizado ⁵	0,6

¹ **Sitios anaeróbicos no gestionados de eliminación de desechos sólidos:** Deben implementar la colocación controlada de los desechos (o sea: los desechos son dirigidos a áreas específicas de deposición donde se ejerce un cierto control sobre la recuperación informal de residuos reciclables y la quema de basuras) e incluir por lo menos uno de los siguientes elementos: (i) material protector de la cubierta; (ii) compactación mecánica o (iii) nivelación de los desechos.

² **Sitios semi-aeróbicos gestionados de eliminación de desechos sólidos:** deben garantizar la ubicación controlada de los desechos e incluir todas las estructuras siguientes para introducir aire en las capas de desechos: (i) material de la cubierta permeable; (ii) sistema de drenaje para la lixiviación; (iii) estanques de regulación y (iv) sistema de ventilación de gases.

³ **Sitios no gestionados de eliminación de desechos sólidos - profundos y/o con capa freática elevada:** Todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades mayores o iguales a 5 metros y/o una capa freática elevada cercana al nivel del suelo. La última situación corresponde al llenado con desechos de un terreno con aguas fluviales, como un estanque, río o humedal.

⁴ **Sitios no gestionados poco profundos de eliminación de desechos sólidos:** todos los SEDS que no cumplen con los criterios de los SEDS gestionados y que tienen profundidades de menos de 5 metros.

⁵ **Sitios no categorizados de eliminación de desechos sólidos:** Sólo si los países no pueden categorizar sus SEDS dentro de las cuatro anteriores categorías de SEDS gestionados y no gestionados pueden emplear el MCF para esta categoría

- Fracción de metano en el gas de generado (F)

La mayor parte de los desechos generan un gas con aproximadamente 50 por ciento de metano. Sólo los materiales que incluyen cantidades sustanciales de grasa o aceite pueden generar gas con mayor cantidad de metano que sea el 50 por ciento. Por lo tanto, se sugiere a emplear el valor por defecto del IPCC para la fracción de metano en el gas generado (0,5).

- Factor de oxidación (OX)

El factor de oxidación refleja la cantidad de metano que se oxida en el suelo u otro material que cubre los desechos. La oxidación es mediante la acción de microorganismos metanogénicos. El valor por defecto para el factor de oxidación es cero.

- Vida media

El valor de la vida media ($t_{1/2}$) que es el tiempo necesario para que el DOCm de los desechos se descomponga hasta la mitad de su masa inicial. En el modelo FOD se utiliza la constante k . La relación entre k y $t_{1/2}$ es la siguiente:

$$K = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

El valor de la vida media se aplica de forma particular, está determinado por un gran número de factores asociados con la composición de los desechos y las condiciones del sitio. Las tasas más rápidas ($k=0,2$ o una vida media cercana a los 3 años) están asociados a condiciones de gran humedad y materiales altamente degradables tales como los desechos alimenticios. Las tasas más lentas ($k=0,02$ o una vida media cercana a los 35 años) están asociada a condiciones de sequedad y de materiales lentamente degradables tales como la madera o el papel.

Tabla 4.3: Valores del índice de generación de metano (k) por defecto.
(Fuente: IPCC,2006)

Tipo de desechos		Zona climática*							
		Boreal y templada (MAT ≤ 20°C)				Tropical ¹ (MAT > 20°C)			
		Seco (MAP/PET < 1)		Húmedo (MAP/PET > 1)		Seco (MAP < 1000 mm)		Húmedo y seco (MAP ≥ 1000 mm)	
		Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²
Desechos de degradación lenta	Desechos de papel/textiles	0,04	0,03 ^{3,5} – 0,05 ^{3,4}	0,06	0,05 – 0,07 ^{3,5}	0,045	0,04 – 0,06	0,07	0,06 – 0,085
	Desechos de madera/paja	0,02	0,01 ^{3,4} – 0,03 ^{6,7}	0,03	0,02 – 0,04	0,025	0,02 – 0,04	0,035	0,03 – 0,05
Desechos de degradación moderada	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)/ desechos de jardín y parques	0,05	0,04 – 0,06	0,1	0,06 – 0,1 ⁸	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 – 0,2
Desechos de degradación rápida	Desechos alimenticios/ lodo de aguas servidas	0,06	0,05 – 0,08	0,185 ⁴	0,1 ^{3,4} – 0,2 ⁹	0,085	0,07 – 0,1	0,4	0,17 – 0,7 ¹⁰
Desechos brutos		0,05	0,04 – 0,06	0,09	0,08 ⁸ – 0,1	0,065	0,05 – 0,08	0,17	0,15 ¹¹ – 0,2

Tabla 4.4: Valores de vida media ($t_{1/2}$) por defecto
(Fuente: IPCC, 2006)

Tipo de desechos		Zona climática*							
		Boreal y templada (MAT $\leq 20^{\circ}\text{C}$)				Tropical ¹ (MAT $> 20^{\circ}\text{C}$)			
		Seco (MAP/PET < 1)		Húmedo (MAP/PET > 1)		Seco (MAP < 1000 mm)		Húmedo y seco (MAP ≥ 1000 mm)	
		Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango ²
Desechos de degradación lenta	Desechos de papel/textiles	17	14 ^{3,5} – 23 ^{3,4}	12	10 – 14 ^{3,5}	15	12 – 17	10	8 – 12
	Desechos de madera/paja	35	23 ^{3,4} – 69 ^{6,7}	23	17 – 35	28	17 – 35	20	14 – 23
Desechos de degradación moderada	Otros putrescibles orgánicos (no alimenticios)/desechos de jardín y parques	14	12 – 17	7	6 – 9 ⁸	11	9 – 14	4	3 – 5
Desechos de degradación rápida	Desechos alimenticios/lodo de aguas servidas	12	9 – 14	4 ⁴	3 ^{3,4} – 6 ⁹	8	6 – 10	2	1 ¹⁰ – 4
Desechos brutos		14	12 – 17	7	6 – 9 ⁸	11	9 – 14	4	3 – 5 ¹¹

- fracción del carbono orgánico degradables que se descompone (DOC_f)

La DOC_f es una estimación de la fracción de carbono que se degrada en última instancia, reflejando que una parte del carbono degradable no se degrada, o se degrada muy lentamente. Su valor depende de muchos factores, como la temperatura, humedad, pH, composición de los desechos.

Tabla 4.5: Valores por defecto para contenidos de materia seca, DOC, total de carbono y fracción de carbono fósil.

(Fuente: IPCC, 2006)

Componente de DSM	Contenido de materia seca en % del peso húmedo ¹	Contenido de DOC en % de desechos húmedos		Contenido de DOC en % de desechos secos		Contenido total en % del peso en seco		Fracción de carbono fósil en % del total de carbono	
		Por defecto	Rango	Por defecto	Rango ²	Por defecto	Rango	Por defecto	Rango
Papel/cartón	90	40	36 - 45	44	40 - 50	46	42 - 50	1	0 - 5
Textiles ³	80	24	20 - 40	30	25 - 50	50	25 - 50	20	0 - 50
Desechos de alimentos	40	15	8 - 20	38	20 - 50	38	20 - 50	-	-
Madera	85 ⁴	43	39 - 46	50	46 - 54	50	46 - 54	-	-
Desechos de jardines y parques	40	20	18 - 22	49	45 - 55	49	45 - 55	0	0
Pañales	40	24	18 - 32	60	44 - 80	70	54 - 90	10	10
Caucho y cuero	84	(39) ⁵	(39) ⁵	(47) ⁵	(47) ⁵	67	67	20	20
Plásticos	100	-	-	-	-	75	67 - 85	100	95 - 100
Metal ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Vidrio ⁶	100	-	-	-	-	ND	ND	ND	ND
Otros, desechos inertes	90	-	-	-	-	3	0 - 5	100	50 - 100

4.4 DISEÑO ESTANQUE DEL BIODIGESTOR

La norma aplicable es API 650 “Welded Steel Tanks for Oil Storage”, del Instituto Americano del Petróleo, enfoca su diseño en estanques de acero que almacenan petróleo o subproductos, a una presión cercana a la atmosférica. La norma considera requisitos contenidos en sus diferentes secciones como el manto del estanque, cabezales, soportes, flanches y boquillas, asegurando que se cumplen las normas de seguridad requeridas para la operación del estanque.

La forma cilíndrica presenta una mayor resistencia mecánica que no presenta concentraciones de esfuerzos en los vértices como lo es un formato rectangular. Dentro de los cilindros, existe la

disposición vertical y horizontal, donde los verticales permiten almacenar un mayor volumen de líquidos.

Con respecto a la parte superior e inferior del mismo, se opta por un recipiente techado hermético y con fondo cónico; lo que justifica su asentamiento sobre una base cilíndrica de hormigón armado, además de evitar el contacto directo del acero con el piso. Si bien las condiciones de trabajo internas son cercanas a la presión atmosférica, la condición de techado hermético responde a la necesidad de conservar el ambiente reductor y el calor, al igual que contener y encauzar el biogás que se genera (Reynoso M., 2017).

Los materiales mayormente utilizados para la construcción del reactor son hormigón armado y acero. El sustrato, el biogás y los condensados pueden generar sustancias corrosivas, como lo son el sulfuro de hidrogeno, amoníaco y ácidos orgánicos. Para el diseño del biodigestor se utilizará acero sobre una base de hormigón, debido a que el acero es un material abundante, de bajo costo, de sencillo acceso y construcción. Además, el acero se recomienda aplicar un recubrimiento como lo son pinturas epoxi, films o láminas de polietileno y polímeros cerámicos.

4.3.1 Parámetros de diseño

El volumen requerido por el biodigestor de cilindro vertical debe ser considerado utilizando la carga volumétrica (Volume Load, VL) a soportar. La carga volumétrica representa el volumen necesario para digerir 1(kg) de materia orgánica seca y se estima que, en un orden de 3,5 (kg) de materia orgánica seca diaria (odm) utilizan 1 (m³) del biodigestor (Perez J., 2010).

$$V = \frac{\phi odm}{VL}$$

Donde:

V= volumen requerido del biodigestor

\emptyset_{odm} = flujo de materia orgánica seca diaria (kg/d)

VL= carga volumétrica considerada ($\frac{kg_{odm}}{m^3*d}$)

- Geometría

En base a que se busca que sea cilíndrico el biodigestor se debe buscar una relación con respecto con la altura la cual es la siguiente (Pérez, 2010):

$$\frac{D}{H} = \frac{1}{4}$$

Donde:

D= diámetro del cilindro

L= largo del estanque

4.3.2 Espesor del estanque

El criterio utilizado corresponde a modelamiento por elementos finitos apoyado en la utilización del estándar API 650 para la determinación del espesor del estanque.

- Espesor de diseño (mínimo)

$$e_d = \frac{\rho(H-1)d^{2,6}}{21000 * E} + c$$

- Espesor hidrostático

$$e_d = \frac{\rho(H-1)d}{144*2*S_t*E}$$

Donde:

e_d = espesor de diseño (in)

e_t = espesor hidrostático (in)

d = diámetro nominal del tanque (in)

c = corrosión permitida (in)

S_d = esfuerzo de diseño permisible (psi)

S_t = esfuerzo hidrostático permisible (psi)

E = eficiencia de la junta

Cargas del estanque

- Cargas por soportar

El componente debe soportar la mitad de la carga de los residuos orgánicos más el peso del tambor esto equivale a:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

Donde:

C_T = carga total (kg)

C_1 = carga generada por los residuos en el manto cilíndrico (kg)

C_2 = carga generada por los residuos en los cabezales (kg)

C_3 = carga generada por el manto (kg)

C_4 = carga generada por los cabezales (kg)

$$C_1 = \pi * r^2 * L * \rho_s$$

Donde:

r = radio del estanque (m)

L = largo del estanque (m)

ρ_s = densidad del substrato (kg/m³)

$$C_2 = 0,4536 * 0,000076 * d^3 * \rho_s$$

Donde:

d= diámetro del estanque (in)

ρ_s = densidad del substrato (kg/ m³)

$$C_3 = \frac{\pi * d * L * e * \rho_{acero}}{4 * 1728} * 0,4536$$

Donde:

d= diámetro del estanque (ft)

L= largo del estanque (ft)

ρ_{acero} = densidad del acero (lb/ft³)

e= espesor del manto (ft)

Diseño del sistema de bombeo

Parámetros de diseño:

- Flujo masico

Las bombas y sus tuberías operan entregando los residuos orgánicos líquidos al reactor, esto implica que cada 7 días debe bombear 0,12 m³ aproximadamente.

- Substrato

Las tuberías están en contacto directo con los residuos que tienen un potencial corrosivo bajo, el cual se debe tener en mantenimiento esporádicamente.

La bomba operara con residuos de densidad de 510 (kg/m³) y que se debe considerar como agua sucia de industria con bajo contenido de sólidos. La densidad podría aumentar siempre y cuando se implemente un sistema de triturado previo al tratamiento del biodigestor.

- Calculo diámetro de tuberías

$$D_{tubdesc} = \sqrt{\frac{(V_{T2}/t_{dt2})}{(V_{dt} * 4)/\pi}}$$

Donde:

$D_{tubdesc}$ = diámetro de tuberías (cm)

V_T = flujo volumétrico

t_{dt} = tiempo de descarga del estanque

V_{dt} = velocidad del flujo másico

Espesor mínimo de tuberías

El espesor mínimo de la tubería corresponde al espesor que soporta la presión de operación, los estándares de tuberías exigen materiales ASTM A-53 (tubo de acero al carbono, tubería sin costuras, con soldaduras), por lo que el espesor mínimo de la tubería queda determinado por:

- $e_{mim} = \frac{PN * D}{2\sigma_s + PN}$

Donde:

e_{mim} = espesor mínimo de la tubería (mm)

PN= presión nominal de operación (MPa)

D= diámetro externo de la tubería (mm)

σ_s = tensión de diseño (MPa)

- Cálculo potencia de operación de la bomba

Las bombas operan evacuando un caudal máximo nominal de 6 (m³/h) y la presión del fluido transportado es de 1 (bar). Luego la potencia necesaria de las bombas a utilizar equivale a:

$$P_{BT1}^* = \frac{V_{bt1}^* \Delta P_{T1}}{\eta_{BT1}}$$

Donde:

P_{BT1}^* = potencia de diseño de la bomba (kW)

V_{bt1}^* = flujo volumétrico a bombear

ΔP_{T1} = diferencia de presiones entre carga y descarga

η_{BT1} = factor de corrección de la bomba

4.3.3 Almacenamiento de biogás

El biogás generado en la digestión anaeróbica, al tener una baja densidad fluye automáticamente por el ducto ubicado en la parte superior del reactor.

El gasómetro debe cumplir ciertos requerimientos mínimos, tales como: ser construida con material resistente a la presión, radiación UV, variaciones de temperatura y a las condiciones climáticas adversas. La unidad de almacenamiento que se optara es un gasómetro de doble membrana (figura 4.9), instalan sobre tanque de hormigón optimizando el espacio de instalación del sistema.



Figura 4.8: Esquema de gasómetro de doble membrana sobre tanques (Top Mounted).

(Fuente: http://www.jfa-tech.es/Catalogos/files/Catalogo_TECON.pdf)

La presión de almacenamiento es, aproximadamente, de 3,4 atm, lo que permite disminuir el volumen de gas a una tercera parte de lo que ocupa en el digestor (Varnero M., 2011).

Para calcular el volumen adecuado de almacenamiento se obtendrá mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{P1}{V2*T1} = \frac{P2}{V1*T2}$$

$$V2 = \frac{P1}{T1*P2} * V1 * T2$$

Donde

P1: Presión absoluta en la línea.

P2: Sobrepresión presente en el gasómetro.

T1: Temperatura de digestión.

T2: Temperatura de equilibrio máxima a la que podría llegar el gasómetro.

V1: Volumen de biogás generado en el biodigestor.

4.3.4 Acondicionamiento del biogás para sulfuro de hidrógeno

En el biogás crudo se puede encontrar una gran variedad de impurezas sulfuradas, pero el ácido sulfhídrico (H₂S) es el más común. El biogás tratado debe contener una concentración de H₂S inferior a 100 mg/Nm³ de manera de prevenir daños en los equipos.

Para este tratamiento de purificación se contempla la incorporación de un filtro de carbón activado. El H₂S se adsorbe en la superficie interna del carbón, donde en presencia de oxígeno se puede oxidar y convertirse en azufre (Reynoso M., 2017).

4.3.5 Agitador

La integración de un agitador sumergido en los residuos logra una mayor homogeneidad de los residuos en fermentación y con ello la mejora de la producción de biogás. Se considera que para aplicaciones domésticas un funcionamiento de 5 (min/h) es suficiente para lograr la homogeneidad.

Para determinar un agitador adecuado, se considera la potencia del agitador:

$$P_{ag} = 1,3 * N_{ag} * \rho_s * n_{ag}^3 * D_{ag}^5$$

Donde:

P_{ag} : Potencia del agitador [kW]

N_{ag} : Coeficiente de Newton del agitador

ρ_s : Densidad del fluido a agitar (kg/m³)

n_{ag} : Velocidad de giro del agitador (rpm)

D_{ag} : Diámetro de la paleta del agitador (m)

5 RESULTADOS

5.1 CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS

La masa de residuos orgánicos generados en el Centro Integral de Atención al Estudiante producto del servicio de alimentación se cuantificaron de lunes a viernes durante dos semanas. La duración de medición de los desechos orgánicos, efectuada en dos semanas, se determinó el tiempo basado en la reunión sostenida con el personal de administración de CIAE, en donde se realizó una serie de preguntas sobre la dinámica de los menús preparados, concluyendo que la diversidad de productos utilizados semana tras semana estos no tienen gran variación.

El primer día de medición en el centro fue realizado el lunes 4 de julio finalizando el viernes 15 de julio del año 2022, en el cual se utilizó una balanza la cual entregaba la masa en kilogramos (Anexo 1). Los resultados obtenidos de la cuantificación se presentan en el siguiente gráfico.

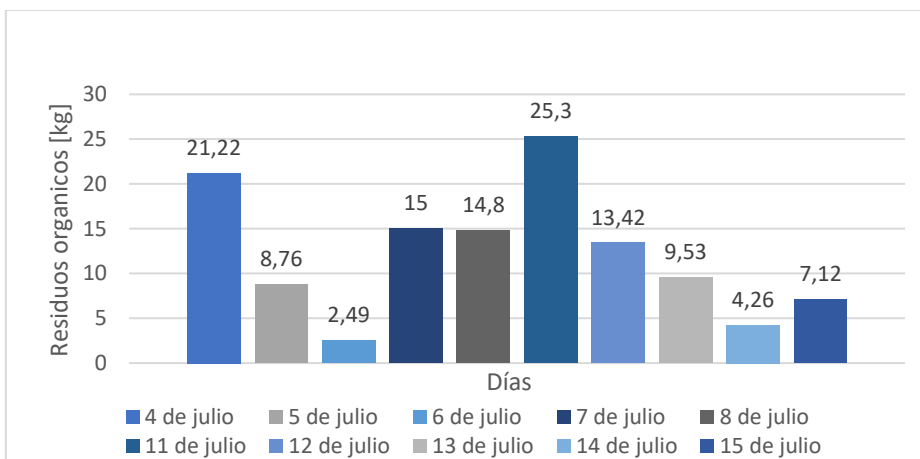


Figura 5.1: Generación de residuos orgánicos frescos del CIAE, Valparaíso, 2022.

En la primera semana en la que se realizó la cuantificación se generaron un total de 62,27 kilos de residuos orgánicos, en la segunda semana se obtuvo 59,68 kilos de residuos orgánicos. En un año de operación del casino del edificio, el cual funciona de lunes a viernes, en los meses de marzo a diciembre, se estima la cantidad de 2.439 kilos de residuos orgánicos.

La identificación de los residuos orgánicos generados en las mediciones se presenta en la tabla 5.1 que corresponde a la primera semana y la tabla 5.2 a la segunda semana.

Tabla 5.1: Identificación de los residuos orgánicos semana 1.

Fecha	4 de julio	5 de julio	6 de julio	7 de julio	8 de julio
Tipo de residuo	1. Acelga 2. Apio 3. Cáscara de ajo 4. Cáscara de cebolla 5. Cáscara de papa 6. Cáscara de Pepino 7. Cáscara de tomate 8. Lechuga 9. Repollo 10. Zanahoria 11. Zapallo camote	1. Cáscara de cebolla 2. Lechuga 3. Cáscara de papa 4. Zanahoria	1. Acelga 2. Cáscara de ajo 3. Cáscara de cebolla 4. Lechuga 5. Zapallo camote 6. Zapallo italiano	1. Apio 2. Cáscara de cebolla 3. Cáscara de Pepino 4. Zanahoria	1. Cáscara de papa 2. Cáscara de tomate 3. Lechuga 4. Repollo

Tabla 5.2: Identificación de los residuos orgánicos semana 2.

Fecha	11 de julio	12 de julio	13 de julio	14 de julio	15 de julio
Tipo de residuo	1. Cáscara de cebolla 3. Cáscara de papa 4. Cáscara de tomate 5. Lechuga 6. Repollo 7. Zanahoria 8. Zapallo camote	1. Acelga 2. Apio 3. Cebollín 4. Cáscara de papa 5. Lechuga 6. Pepino 7. Zanahoria 8. Zapallo camote	1. Apio 2. Beterraga 3. Cáscara de papa 4. Cebollín	1. Acelga 2. Cáscara de cebolla 3. Cáscara de papa 4. Zapallo camote	1. Cáscara de cebolla 2. Cáscara de tomate 3. Lechuga 4. Zapallo italiano

5.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE BMP

El insumo iniciador (Anexo 2) con el cual se realizó la prueba de BMP es estiércol bovino el cual se obtuvo de Santa Julia en la localidad de Ritoque comuna de Quintero. En la figura 5.2 se observa con exactitud la ubicación del criadero vacuno.

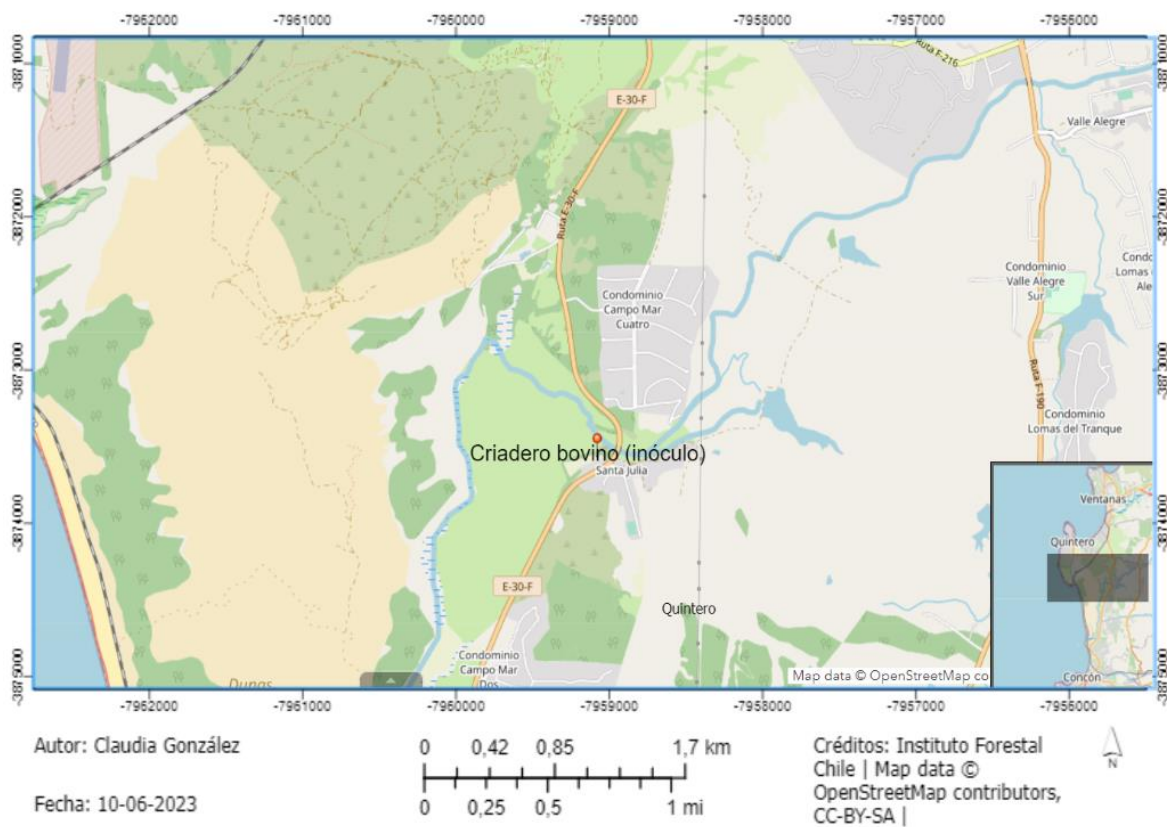


Figura 5.2: Ubicación geográfica de la obtención de estiércol bovino.

Una vez obtenido el inóculo se mezcló con agua, en una proporción 1:1 como se mencionó en el capítulo anterior.

En base a la cuantificación realizada en el Centro de Integración de Atención al Estudiante se seleccionaron cinco de los residuos orgánicos más frecuentes, los cuales son la papa, zapallo camote, cebolla, zanahoria y lechuga.

Las consideraciones para el calentador de baño maría son la temperatura inicial del agua, se trabajó con agua potable, por lo tanto, la temperatura de salida del grifo en Valparaíso es aproximada de 23°C (medición en laboratorio), en una hora el calor requerido para elevar la temperatura a 37°C es de 1.582 kJ, entonces la potencia eléctrica debe ser de 0,44 (kW) como mínimo.

En base al requerimiento de la potencia eléctrica la temperatura en la prueba se controló mediante un baño termostático con indicador digital de la marca Lab Tech el cual, el equipo permite mediante convección transferir calor al agua. En la siguiente tabla se describe algunas de las características del equipo e imagen.

Tabla 4.1: Características de baño termostático.

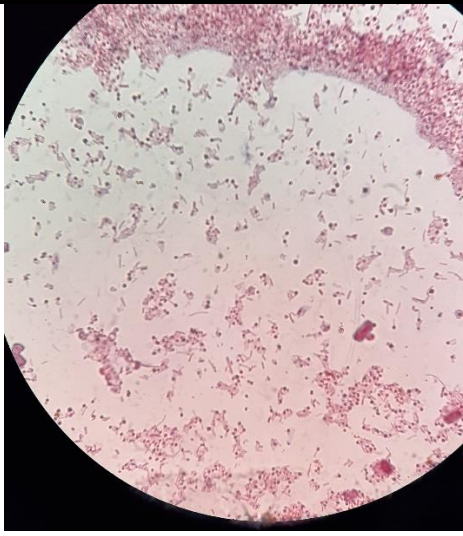
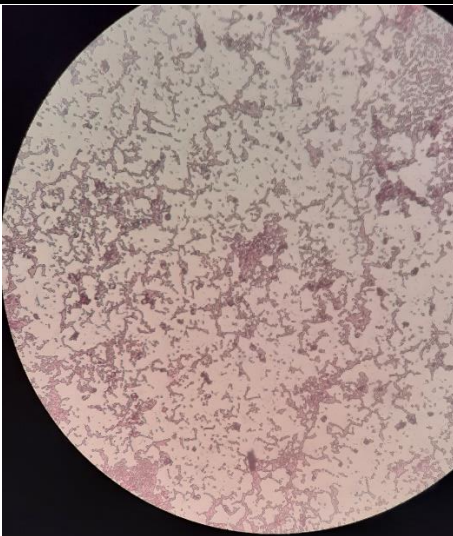
(Fuente: <http://www.labequim.com.mx/html/CATALOGO.C/BANOS/LCB-6DBANO.htm>).

	
Clave	LABTECLCB0011D
Modelo	LCB-11D
Elemento calentador	2000 Watts
Alimentación	110 V, 60 Hz

Los reactores con el inculo se dejó durante una semana para su desgasificación. Transcurrida la semana se generó el cultivo bacteriano.

La identificación de microorganismo del insumo iniciador se llevó a cabo considerando la morfología de las bacterias presentes, por medio de tinción de Gram, se identificaron las siguientes morfologías:

Tabla 4.2: Identificación de microorganismo de cultivos bacterianos de residuos organismo, por tinción de Gram.

Imágenes de microscopio		
Descripción de la imagen	Presencia de cocos y bacilos Gram positivos	Presencia de cocos Gram positivos

La norma VDO-4630 indica que la proporción de masa de ODM entre sustrato e inóculo (sin considerar la materia prima) debe ser igual o menor a 0,5. El estiércol de vacuno contiene un 88,45% ODM (Núñez L., 2017). La cantidad de materia orgánica seca de cada uno de los residuos se obtuvo bibliográficamente, en la siguiente tabla se indica la cantidad porcentual de cada uno de ellos.

Tabla 5.3: Características de los residuos.

Residuo	%Humedad	% Ceniza	%ODM
Zanahoria	23,00	12,97	64,03
Lechuga	95,10	0,70	4,20
Papa	5,04	5,04	89,92
Zapallo	10,79	3,61	85,60
Cebolla	9,98	0,39	89,63

Basándose en la norma alemana la cantidad de inóculo que se utilizó es de 300 gramos de materia orgánica seca del inóculo es decir que la cantidad total es de 339,17 gramos aproximados, por lo tanto, los residuos tienen un total de 150 gramos de ODM. La cantidad total para residuo se detalla en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Cantidad de residuo para reactores

Residuo	ODM	Total, gramos (ODM+humedad+cenizas)
Zanahoria	30	46,85
Lechuga	10	238,10
Papa	50	179,84
Zapallo	30	35,05
Cebolla	30	33,47
Total	150	533,31

La relación de proporción de 150 gramos de ODM de sustrato en 300 gramos de ODM de solución de inóculo da como resultado 0,5 cumpliendo con la norma VDI-4630.

Los residuos previamente a ser mezclados con el inóculo se trituraron (se utilizó una minipimer) obteniéndose dimensiones menores a 10mm x 10mm x 10 mm, la figura 5.5 evidencia el tamaño de partícula obtenido.



Tabla 5.5: Cascara de zanahoria triturada.

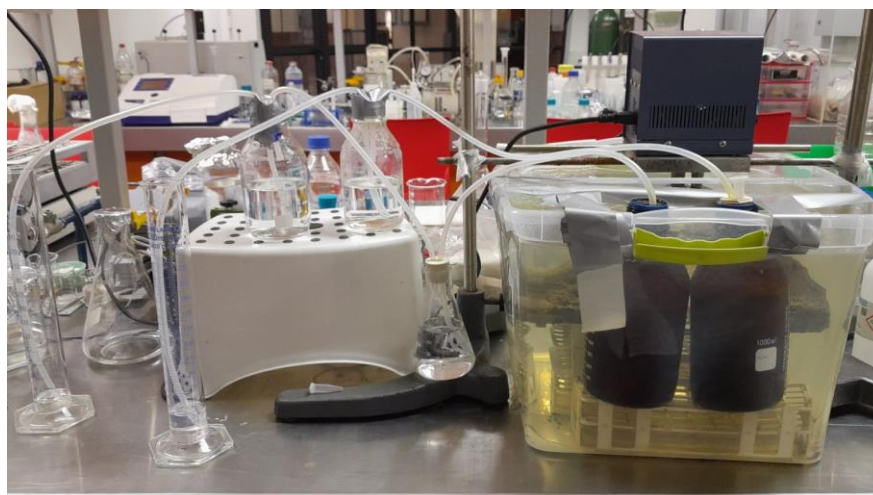


Figura 5.3: Montaje en laboratorio de prueba BMP.

Como se observa en la figura 5.3 el baño termostático se encontraba abierto generando una pérdida de agua por evaporación la cual se midió y cada una hora se evaporaban 120 ml, la observación se hizo principalmente para asegurar que siempre el agua estuviera sobre el contenido que tenían los reactores (botellas), como lo indica la norma alemana VDI 4630.

La implementación del sistema de prueba de BMP y el cultivo bacteriano se realizó en paralelo, es decir el mismo día.

5.2.1 Resultados de producción de biogás.

En la tabla 5.6 se presentan las producciones biogás medidas a partir de 863,01 gramos de sustrato a temperatura (T) de 37°C. Los días 2, 9, 10, 16, 23 y 30 correspondieron a domingos y un feriado los cuales no se tenía acceso a laboratorio para hacer las mediciones respectivas.

Tabla 5.6: Producción diaria y acumulada de biogás.

Día	Producción diaria de biogás (ml)	Producción acumulada de biogás (ml)
0	0	0
1	0	0
2	-	-
3	0	0
4	0	0
5	84	84
6	19	103
7	20	123
8	21	144
9	-	-
10	-	-
11	114	258
12	14	272
13	80	352
14	278	630
15	121	751
16	-	-
17	244	995
18	203	1198
19	139	1337
20	28	1365
21	108	1473
22	16	1489
23	-	-
24	14	1503
25	14	1517
26	86	1603
27	202	1805
28	56	1861
29	28	1889

30	-	-
31	20	1909

En la tabla observa un registro distinto de cero a partir del quinto día y esto se adjudica principalmente a la implementación de agitación de los reactores durante 15 minutos a la misma hora en la se midieron las probetas con el desplazamiento de líquido y las temperaturas de los cabezales de los reactores.

En la siguiente tabla se presentan las producciones de biogás en condiciones normales de presión (P) y temperatura (T) a partir de 863,01 gramos de sustrato con la finalidad de posibles comparaciones.

Tabla 5.7: Producción diaria y acumulada de biogás en CNPT.

Día	Producción diaria de biogás (ml N)	Producción acumulada de biogás (ml N)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	77,71	77,71
6	17,64	95,35
7	18,46	113,81
8	19,53	133,34
9	-	-
10	-	-
11	105,37	238,71
12	13,04	251,76
13	74,30	326,06
14	259,24	585,29
15	113,88	699,18
16	-	-
17	227,60	926,78
18	188,99	1115,77
19	128,48	1244,25
20	25,82	1270,08
21	99,80	1369,88
22	14,86	1384,74
23	-	-
24	12,95	1397,69
25	12,98	1410,67
26	79,60	1490,27
27	185,87	1676,14
28	51,50	1727,63
29	26,08	1753,71

30	-	-
31	18,49	1772,20

En las figuras 5.4 y 5.5 se expresan las producciones normales de biogás tanto diarias como acumuladas.

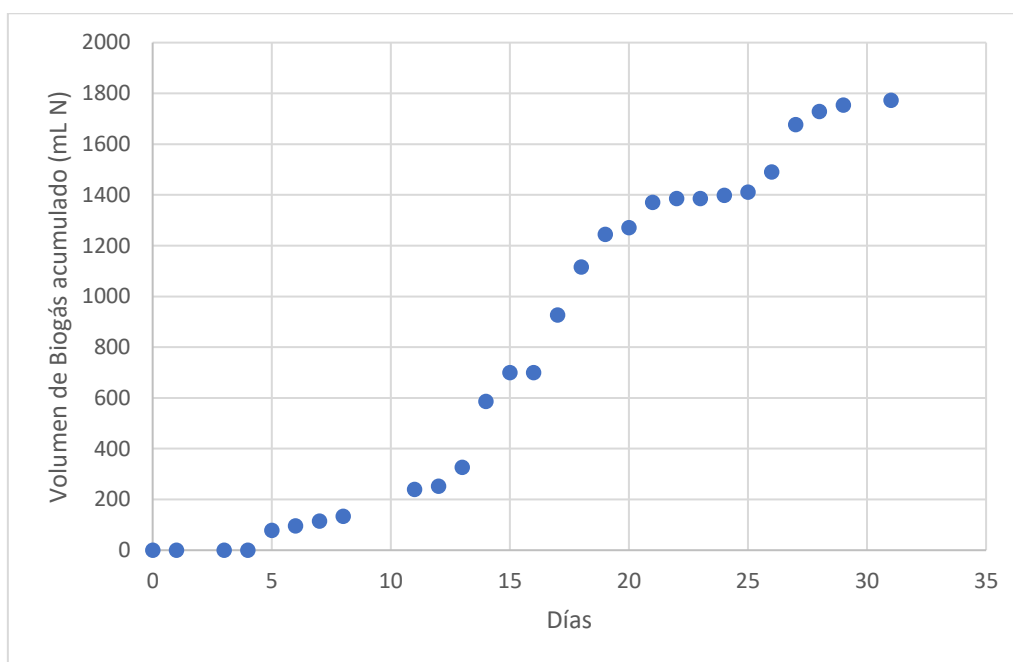


Figura 5.4: Producción acumulada de Biogás en CNPT

La tabla 5.8 expresa los volúmenes normales de biogás producido con respecto a la materia orgánica seca (150 g. de sustrato).

Tabla 5.8: Producción diaria y acumulada de biogás en CNPT de la ODM

Día	Producción diaria de biogás (ml N/g ODM)	Producción acumulada de biogás (ml N/g ODM)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0,52	0,52
6	0,12	0,64
7	0,12	0,76
8	0,13	0,89
9	-	-
10	-	-
11	0,70	1,59
12	0,09	1,68
13	0,50	2,17
14	1,73	3,90
15	0,76	4,66
16	-	-
17	1,52	6,18
18	1,26	7,44
19	0,86	8,30
20	0,17	8,47
21	0,67	9,13
22	0,10	9,23
23	-	-
24	0,09	9,32
25	0,09	9,40
26	0,53	9,94
27	1,24	11,17
28	0,34	11,52
29	0,17	11,69
30	-	-

31	0,12	11,81
----	------	-------

Como se puede observar en las tablas y graficas existe una mayor producción de biogás entre el día 10 al 22 desde la puesta en marcha, luego se ve un decaimiento de el biogás generado.

Para la prueba de BMP ejecutada, se está asumiendo que el biogás está compuesto únicamente por metano y dióxido de carbono, sin embargo, existen trazas de otros gases que no se consideraron. Debido a que la concentración de metano se intentó medir indirectamente mediante el filtro de CO₂ no es factible comparar las concentraciones de metano de las producciones diarias debido a que las mediciones provienen de diferentes reactores. Sin embargo, el reactor conectado a la solución de hidróxido de sodio para diluir el CO₂ y solo tener lecturas de metano no se logró el objetivo puesto que solo se obtuvieron 3 días de medición.

5.2.2 Nivel de pH

La medición del nivel de pH de la mezcla del sustrato más el inóculo se realizó en el inicio de la prueba y al finalizar (transcurrido 31 días) en cada reactor. En la tabla 5.9 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 5.9: Nivel de pH, prueba BMP

pH	Reactor de medición de biogás	Reactor de medición de metano
Inicial	4,54	4,54
Final	5,23	5,23

5.2.3 Relación de Alcalinidad

La medición de este parámetro se realizó al igual que el pH al inicio de la prueba y al finalizar. Como se explicó en 4.2.1.4.3 la medición se llevó a cabo mediante titulación manual.

Tabla 5.10: Relación de alcalinidad de los reactores

FOS/TAC	Reactor de medición de biogás	Reactor de medición de metano
Inicial	0,8748	0,9710
A	0	0
B	1,0	1,1
Final	0,0024	0,0025
A (ml)	3,0	3,4
B (ml)	2,0	2,3

Según las reglas empíricas DEULA-Nienburg (tabla 1.8) al inicio del desarrollo de la prueba BMP había una excesiva sobrealimentación de biomasa en los reactores, al transcurrir los 31 días el valor de la relación FOS/TAC expresa que la biomasa que se tiene en los reactores es baja y se debería alimentar rápidamente.

5.3 Producción de metano, modelo IPCC

A partir del objetivo uno, se determinaron los resultados de la aplicación del modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático basado en la generación de residuos orgánicos del CIAE, en el cual entrega una estimación de la producción de metano.

- Carbono orgánico degradable descomponible

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

Masa de los desechos depositados (Gg) (W)

A partir del objetivo uno, se estima que la generación de residuos orgánicos frescos en el edificio CIAE un año corresponde a 2.439 kilogramos que corresponde a 0,002439 gigagramo (Gg).

Carbono orgánico degradable durante el año de deposición, fracción (Gg de C/Gg de desechos) (DOC)

El DOC de los residuos de CIAE se expresará por medio del promedio del Carbono orgánico degradable de los cinco residuos más frecuentes

El carbono degradable que contienen los residuos es la Materia Orgánica Seca. El promedio de materia orgánica seca se representó en base a los 5 residuos que con mayor frecuencia generados en el CIAE (asumiendo que representan todos los demás residuos generados).

Promedio de carbono degradable de los residuos=

$$\frac{0,6403(\text{zanahoria})+0,42(\text{lechuga})+0,8992(\text{papa})+0,856(\text{zapallo})+0,8963(\text{cebolla})}{5}=0,6667$$

- **Fracción del DDOC que puede descomponerse (fracción) (DOC_f)**

Por defecto el IPCC recomienda para DOC_f el valor de 0,15 para desechos de alimentos húmedos

- **Factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición (fracción) (MCF)**

Según IPCC se asigna un valor por defecto en relación con la categoría perteneciente del residuo. El tipo de sitio de disposición de los residuos pertenece a gestionado-anaeróbico correspondiendo a un valor de MCF de 1.

Reemplazo de los valores establecidos

$$\text{DDOC}_m = 0,002439 \text{ (Gg)} * 0,6667 * 0,15 * 1,0$$

$$\text{DDOC}_m = 2,44 * 10^{-4} \text{ (Gg)}$$

- **Potencial de generación de metano**

$$L_0 = \text{DDOC}_m * F * \frac{16}{12}$$

Masa del DOC descompuesto depositado (Gg) (DDOC_m) = 2,44 * 10⁻⁴ (Gg)

Fracción de CH₄ en el gas generado (fracción de volumen) = 0,7

Reemplazo de los valores establecidos

$$L_0 = 2,44 * 10^{-4} * 0,7 * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 2,27 * 10^{-4} \text{ (Gg de metano/año)}$$

DDOCm acumulado al final del año T (Gg)

$$DDOCm_{aT} = DDOCm_{dT} + (DDOCm_{dT-1} * e^{-k})$$

Año del inventario (T): Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor

DDOCm acumulado al final del año (T-1) (Gg) (DDOCm_{aT-1}): Su valor es igual a DDOCm que es $2,44 * 10^{-4}$ (Gg)

DDOCm depositado durante el año T (Gg) (DDOCm_{dT}): El valor de DDOCm depositado en el año 1 es igual a cero

Constante de reacción (k):

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Vida media (t_{1/2})

La vida media de los residuos se encuentra directamente ligada a la zona climática en que se encuentre geográficamente el biodigestor, por lo tanto, Valparaíso se categoriza como zona boreal y templada donde la temperatura media anual es inferior a los 20°C y es aproximadamente 14°C para el clima templado de tipo mediterráneo costero (BCN). La precipitación media anual (MAP) es de 450 mm, en cuanto a la evapotranspiración potencial (PET) es de 462 mm/día (Ciren, 1989), la relación MAP/PET da un valor de 0,97 categorizándose como zona climática seca. Por consiguiente, t tiene un valor por defecto de 12.

$$K = \frac{\ln(2)}{12}$$

$$K = 0,0578$$

Reemplazamos los valores en la ecuación

$$DDOCm_{a_T} = 0 + (2,44 * 10^{-4} * e^{-0,0578})$$

$$DDOCm_{a_T} = 2,30 * 10^{-4}$$

- **DDOCm descompuesto durante el año T**

$$DDOCm \text{ descomp}_T = DDOCm_{a_{T-1}} * (1 - e^{-k})$$

Año del inventario (T): Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor.

DDOCm acumulado al final del año (T-1) (Gg) $DDOCm_{a_{T-1}}$: Su valor es igual a DDOCm que es $2,44 * 10^{-4}$ (Gg)

Constante de reacción (k) = 0,0578

Reemplazar en la ecuación los valores asignados

$$DDOCm \text{ descomp}_T = 2,44 * 10^{-4} * (1 - e^{-0,0578})$$

$$DDOCm \text{ descomp}_T = 1,29 * 10^{-5} \text{ (Gg)}$$

- Cantidad CH_4 generado a partir del material en descomposición

$$CH_4 \text{ generado}_T = DDOCm \text{ descomp}_T * F * \frac{16}{12}$$

CH_4 descompuesto durante el año T (Gg) ($DDOCm \text{ descomp}_T$)

$1,87 \cdot 10^{-6}$ (Gg)

Fracción volumétrica de CH₄ en el gas de vertedero generado (fracción)(F)

Del gas generado el 70% corresponde a metano en el caso más favorable.

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ (Gg)} * 0,7 * \frac{16}{12}$$

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ (Gg)}$$

- **CH₄ emitido durante el año T (Gg)**

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_x \text{CH}_4 \text{ generado}_{x,T} - R_T \right] * (1 - \text{OX}_T)$$

Año de inventario: Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor.

Categoría o tipo de desecho y/o material: Solo se trabajará con un tipo de desecho y son residuos de comida, materia orgánica.

CH₄ recuperado durante el año T (Gg)(R_T): Como la finalidad es saber la cantidad de emisión de metano se genera el valor de recuperación se supondrá que es cero.

Factor de oxidación durante el año T (fracción)(OX_T): El valor por defecto para el factor de oxidación es cero. El uso del valor de oxidación de 0,1 se justifica cuando se gestiona con algún material oxidante

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [1,21 \cdot 10^{-5} \text{ (Gg)} - 0] * (1 - 0)$$

$$\text{Emisiones de CH}_4 = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ (Gg)}$$

Las emisiones de CH_4 corresponden a 12,1 kilos de que equivalen al 70% del gas emitido por lo tanto la totalidad de gas emitido es de 17,24 kilos. En base a la densidad del metano que es de 0,657 (kg/m³) el volumen de metano emitido es 18,37 m³.

Tabla 5.11: Resultados del Método de eliminación de desechos sólidos IPCC (2006).

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Masa de los desechos depositados	0,002439	(Gg)
Carbono orgánico degradable de los residuos (DDOC _o)	66,67	(%)
Carbono orgánico degradable disuelto	2,44*10 ⁻⁴	(Gg)
Fración del DDOC que puede descomponerse	0,15	-
Factor de corrección de CH ₄	1,0	-
Potencial de generación de metano	2,27*10 ⁻⁴	(Gg de metano/año)
Fración de metano en el gas generado	70,0	(%)
DDOC _m acumulado al final del año	2,30*10 ⁻⁴	(Gg)
Constante de reacción (k)	0,0578	-
Vida media de los residuos	12	-
DDOC _m descompuesto durante el año T (T=1)	1,29*10 ⁻⁵	(Gg)
Metano generado en 1 año	1,21*10 ⁻⁵	(Gg)
Factor de oxidación	0	
<i>Emisiones de CH₄</i>	1,21*10 ⁻⁵	(Gg)

Las emisiones de CH_4 corresponden a 12,1 kilogramos de que equivalen al 70% del gas emitido por lo tanto la totalidad de gas emitido es de 17,24 (kg). En base a la densidad del metano que es de 0,657

(kg/m³) el volumen de metano emitido es 18,37 (m³) y el volumen del biogás corresponda a 14,37 (densidad de 1,2 kg/m³).

La cantidad de personas beneficiadas por la extracción de metano serian:

$$P_{be} = \frac{14,37 \text{ m}^3}{0,33 \text{ m}^3/\text{persona}} = 43,53$$

El número de personas beneficiadas es un total de 43 aproximadamente.

Por otra parte, una cocina de biogás de dos hornillas tiene un consumo de 0,20 a 0,42 m³/h (Varnero M., 2011).

$$\text{Tiempo de duración del biogás} = \frac{14,37 \text{ m}^3}{0,20 \text{ m}^3/\text{horas}}$$

Tiempo de duración del biogás= 71,83 horas

A partir de los residuos generados en CIAE se podría estimar un tiempo de utilización de cocina a biogás de dos hornillas 71 horas y 50 minutos aproximadamente.

5.4 DISEÑO DE BIODIGESTOR ANAEROBIO

En un sistema de biodigestión anaerobia existen entradas que son los insumos (residuos orgánicos) y salidas de los productos generados (biogás), la figura 5.8 esquematiza lo mencionado.

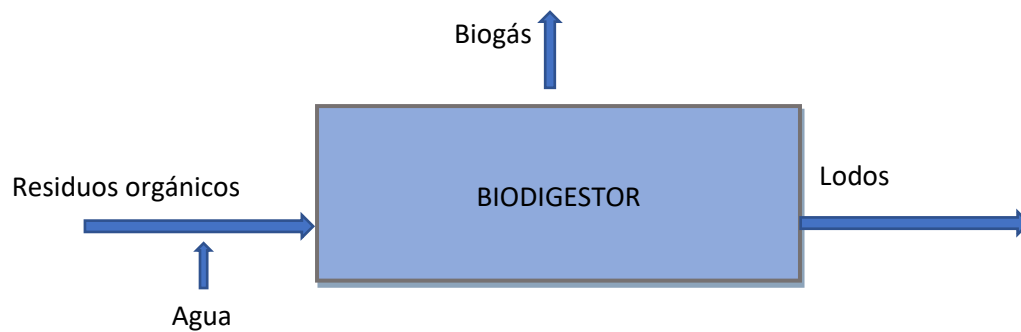


Figura 5.5: Esquema de entradas y salidas del biodigestor.

La unidad de aprovechamiento trabajara con un régimen de alimentación semicontinuo al finalizar la semana de servicio de alimentación, ya que se busca que los residuos sólidos orgánicos no generen malos olores y tampoco se acumulen en un cuarto de almacenamiento de estos, atrayendo vectores que puedan propagar infección en el lugar en el cual se encontrara situado.

El diseño de la unidad debe considerar que los residuos que se generan son más que los cinco seleccionados por lo tanto puede generar una mayor producción de biogás, por otro lado, la generación de residuos puede aumentar debido a un aumento de público que llegue al servicio de alimentación, por estas razones se asume un factor de aumento de las dimensiones de la unidad, este factor será de 1,7 (Arenas B., 2019).

La estimación de biogás generado tiene el propósito de evaluar la factibilidad que podría tener al ser utilizado en una cocina de biogás de dos hornillas. Las hornillas tienen un consumo de biogás de 0,20 a 0,42 (m³/h) (Varnero M., 2011).

5.4.1. Diseño del estanque del biodigestor

El detalle de los cálculos correspondientes se puede observar en el Anexo 4.

Tabla 5.12: Dimensiones preliminares del biodigestor para CIAE.

Característica	Valor	Unidad de medida
Volumen del estanque		
Carga volumétrica considerada	2,32	$\frac{kg_{odm}}{m^3 * d}$
Diámetro	0,90	m
Altura	3,70	m
Espesor de diseño (calculado)	1,68	mm
Espesor de diseño mínimo API 650	5,00	mm
Carga a soportar	1982,72	kg

El espesor de diseño se considerará el indicado por la norma API 650 que es de ¼" (6,35 mm) que es un valor comercial para una chapa de acero para las paredes del reactor.

5.4.2. Selección de la bomba

Para la selección de bomba se debe hacer según los parámetros de diseño que debe tolerar. A continuación, se presentan los parámetros calculados en el Anexo 5.

Tabla 5.13: Características de la bomba apropiada para los residuos generados en CIAE

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Diámetro de tuberías	0,65	cm
Flujo volumétrico	0,392	m ³
Espesor mínimo de tuberías	0,030	mm
Potencial de diseño de la bomba	5,26	W

Comercialmente las tuberías de material ASTM A-53 tienen como mínimo de diámetro externo 10,3 mm, por lo tanto, este es el valor utilizado en la suma de espesor de las tuberías más el diámetro interno de las tuberías.

Tabla 5.14: Características de la bomba seleccionada

(Fuente: Rodavigo.net)

Parámetros	
Marca	Calpeda
Modelo	C-C22/1/trifásica
Referencia rodavigo	746CC221E
Sección de la bomba	64 (mm)
Caudal máximo	2,5 (m ³ /h)
Elevación máxima	4,8 (m)
Presión máxima	2 (bar)
Temperatura máxima de operación	180°C
Eje	Acero al Cr-Ni-Mo

5.4.3. Agitador

El diámetro del agitador se fijará en 0,2 metros (considerando que el diámetro del reactor de 0,9m). El coeficiente de Newton para 0,2 metros corresponde a 0,33.

$$P_{ag} = 1,3 * N_{ag} * \rho_s * n_{ag}^3 * D_{ag}^5$$

Donde:

N_{ag} : Coeficiente de Newton del agitador 0,33

ρ_s : Densidad del fluido a agitar 510 (kg/m³)

n_{ag} : Velocidad de giro del agitador 250 (rpm)

D_{ag} : Diámetro de la paleta del agitador 0,2 (m)

$$P_{ag} = 1,3 * 0,33 * 510(\text{kg/m}^3) * 26,18(\text{rad/s})^3 * 0,2(\text{m})^5$$

$$P_{ag} = 1,26 \text{ Kw}$$

6 DISCUSIÓN

La cuantificación de residuos se efectuó en un periodo del semestre, lo que implica que la muestra pudiera ser no representativa, ya que existen variaciones de la cantidad de clientes según la etapa del semestre (ejemplo de etapas son el inicio de semestre y periodo de exámenes). Por lo anterior, la cantidad estimada de residuos en un año universitario podría ser mayor, pero no menor.

La digestión anaerobia se realizó con un inóculo de estiércol bovino, dando buenos resultados. Sería interesante saber si otro tipo de estiércol o una mezcla pudiera ser un mejor iniciador.

La cámara temperada por baño maría que se ha implementado satisface las condiciones exigidas por la norma VDI-4630, además es una opción económica. Sin embargo, pueden existir mejoras como por ejemplo que se encuentre cerrado en la parte superior, que cuente con un sistema de agitación para uniformar la temperatura del agua y homogenizar la mezcla de residuos.

Hubiese sido beneficioso hacer replicas de los ensayos en paralelo para obtener datos más fiables. Las replicas requieren un mayor numero de reactores y por lo tanto un aumento del tamaño de la cámara temperada, la cual debiese construirse para tal efecto.

Si bien se logra identificación y presencia de actividad microbiana por medio de cultivos bacterianos, no se puede asegurar con certeza que sean bacterias metanogénicas debido a la diversidad morfológica que presenta cada familia e incluso cada género.

Si bien se han evaluado dos reactores, uno de ellos no tuvo los resultados esperados, es beneficioso hacer réplicas de los ensayos en paralelo para obtener datos más fiables. Las réplicas requieren un mayor número de reactores y por lo tanto un aumento del tamaño de la cámara temperada.

La debilidad del sistema radica en las conexiones de mangueras para la circulación de los fluidos, ya que no deben presentar fugas del gas producido. Es prudente contar con válvulas para la recarga de líquidos.

De acuerdo con los valores empíricos y reglas para la evaluación de las relaciones FOS/TAC, los valores obtenidos de la relación de alcalinidad, el reactor al finalizar de la prueba BMP estaría subalimentado. La producción de biogás disminuye a partir del día 22 concordando con las reglas que se encuentra subalimentado.

Al relacionar la prueba de BMP donde se utilizó 150 gramos de residuos orgánicos secos, produciéndose un estimado de 1.772,2 ml de biogás acumulado, al llevarlo a una escala mayor en donde diariamente se generan 8,13 kg de residuos orgánicos secos considerando un tiempo de retención de 25 días. Se puede inferir que al transcurrir los 25 días se obtendrá 2,4 m³ de biogás (con impurezas como H₂S), dándole uso en una cocina de dos hornillas que consumen 0,2 m³/h, con un tiempo de duración de 12 horas cada una.

7 CONCLUSIONES

En el Centro Integral de Atención al Estudiante se logró cuantificar y caracterizar los residuos orgánicos generados en el casino, producto del servicio de alimentación que ofrecen.

La factibilidad de producir biogás se comprobó mediante la prueba de potencial bioquímico de metano, basado en cinco de los residuos que genera el casino del CIAE, sin embargo, no se constató cual es el porcentaje de metano presente en el biogás.

La estimación de la generación de residuos orgánicos durante un año de funcionamiento del casino (correspondiente a 10 meses), permitió utilizar el modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático logrando identificar que la masa posiblemente generada en el CIAE no es suficiente para reemplazar en su totalidad la cocina de combustión de gas natural, sin embargo, puede actuar como un complemento.

Para lograr el funcionamiento del casino únicamente con biogás, la masa de residuos orgánicos debe ser 4,5 veces a la actual, equivaliendo a 274,39 kg semanal (10.975,6 kg/año), la corroboración de los cálculos se encuentra en el anexo 7. La cantidad de masa faltante se podría obtener mediante alianza con el mercado de Valparaíso, por medio de la gestión de la municipalidad, otra alternativa es trasladar los residuos orgánicos generados del casino de Playa Ancha (Avenida El Parque N°533) una vez que se encuentre en funcionamiento.

Producto de la cuantificación de los residuos, se logró determinar algunas de las dimensiones de diseño del biodigestor, parámetros físicos y equipos complementarios. El volumen del estanque del biodigestor debe ser de 2,35 m³ con un tiempo de retención de 25 días, en su interior se recomienda

integrar un agitador mecánico ya que en la prueba de BMP se constató que la agitación produce un aumento en la emisión de gases de fermentación.

La estrategia actual del país hace factible este tipo de proyectos, la Ley 20.920 que “tiene como objetivo disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización”.

La propuesta tiene características de viabilidad de que se genere biogás a partir de los desechos orgánicos producidos en el CIAE, con las que puede convertirse en un complemento, su utilización no reemplazaría al gas licuado en su totalidad, como se mencionó se deben buscar alternativas para acoger residuos orgánicos de otros recintos, para poder conseguir la factibilidad esperada. Sin embargo es un proyecto en apoyo a una iniciativa de sostenibilidad, economía circular e independencia energética.

8 REFERENCIAS

1. AGUILAR-VIRGEN, Q., OJEDA-BENÍTEZ, S., TABOADA-GONZÁLEZ, P., & QUINTERO-NÚÑEZ, M. (2012). Estimación de las constantes k Y L_0 de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28, 45-51.
2. Barbazán, M., del Pino, A., Moltini, C., Hernández, J., & Rodríguez, J. (2011). Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(1), 82-92.
3. Carrasco Allendes, J. L. (2015). Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos.
4. Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-81.
5. Diaz de Basurto Burgos, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia) (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
6. Diaz de Basurto Burgos, A. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia) (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
7. González Cabrera, A. M. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia. *Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Ambiental*.
8. González Salcedo, L. O., & Olaya Arboleda, Y. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. *Departamento de Ingeniería*.
9. Ingenieure, V. D. (2006). Fermentation of organic materials characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, vdi 4630. *VDI-Gesellschaft Energietechnik*.
10. IPCC, 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 3: Eliminación de desechos. Página 3.6 Disponible en:

https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf

11. Juárez González, A. F., & Ramírez Delgado, L. A. Panorama del petróleo crudo mexicano y su relación con el sistema nacional de refinación. Khan Academy. La respiración celular anaeróbica [en línea]. <[Fermentación y respiración anaeróbica \(artículo\) | Khan Academy](#)>[consulta: 14 mayo 2023]
12. Ministerio de Energía (MINENERGIA) (2017) Aprueba Reglamento de Seguridad de las Plantas de Biogás e Introduce Modificaciones al Reglamento de Instalaciones de Gas. Decreto 119. Diario oficial de la República de Chile con código de verificación electrónico (CVE) 1176358.
13. Ministerio de Medio Ambiente (2019) Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes 2005-2017
14. Ministerio de Medio Ambiente (2020) Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes 2005-2018
15. Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2016) Establece Marco para la Gestión de residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje. Ley 20.920. Diario oficial de la República de Chile N.º 41.472. Chile.
16. Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2019) Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 3.
17. Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2020) Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2014.
18. Ministerio de Medio Ambiente. (6 de diciembre de 2018). Compostaje: Una tendencia para combatir el Cambio Climático [en línea]. <https://mma.gob.cl/compostaje-una-tendencia-para-combatir-el-cambio-climatico-2/>
19. Ministerio de Salud (MINSAL) (2008) Aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios. Decreto 189. Diario oficial de la República de Chile N.º 2.476. Chile
20. Ministerio del Medio Ambiente. Cuarto Reporte del estado del Medio Ambiente. Capitulo 8, Residuos.
21. Núñez Pintado, L. F. (2017). Diseño e implementación de prototipos de digestión anaerobia para residuos agrícolas.
22. Padilla, A., & Rivero, J. (2016). Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *Revista ciencia y tecnología*, 12(1), 29-43.

23. Palma, R., & Otorola, J. (1978). Composición química y bromatológica de 28 variedades de papas (*Solanum tuberosum* L.) cultivadas en tres localidades de Chile (Santiago, Temuco y Osorno).
24. Pérez Medel, J. A. (2010). Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros.
25. Pérez, H., & Ferrer, Y. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43(1), 9-20.
26. Restrepo, J. (2007). Código API 650 y 630: Diseño, montaje y construcción de tanques soldados de acero. *Elite Trainig, Bogota*.
27. Reynoso, M. A. (2017). Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos. *Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina*.
28. Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortíz-Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 191-198.
29. Van Buren, A. (1979). Chinese biogas manual: popularising technology in the countryside.
30. Varnero, M. M. T. (2011). Manual de biogas. Minenergia-PNUD-FAO-GEF. Santiago de Chile.

ANEXOS

ANEXO 1 Pesa para la cuantificación de residuos



Figura A 1. Pesa utilizada para la cuantificación de residuos

ANEXO 2 Estiércol bovino recolectado



Figura A 2. Estado del estiércol bovino en su recolección

ANEXO 3

Hola de cálculo de las dimensiones del biodigestor anaerobio

Volumen

- **Volumen requerido del biodigestor**

$$V = \frac{\phi odm}{VL}$$

- Flujo de materia orgánica seca diaria (kg/d) (ϕodm):

La cantidad de residuos generados en 1 semana (lunes a viernes) es de 60,975 (kg), por lo tanto, se generan 12,2 kilogramos diarios, sin embargo, el biodigestor que se selecciono es de semicontinuo en donde se cargara con la materia orgánica cada 25 días.

Los residuos seleccionados (cáscara de papa, cebolla, zapallo camote, zanahoria y lechuga) tienen en promedio un 66,67% de materia orgánica seca, por lo tanto, la cantidad de entrada es de un 8,13 (kg).

- **Carga volumétrica considerada ($\frac{kg odm}{m^3 * d}$) (VL)**

La carga volumétrica representa el volumen necesario para biodigerir 1 kg de materia orgánica seca y se estima que del orden de 3,5 kg de ODM utilizan 1 m³ del biodigestor.

Reemplazamos los valores asignados

$$V = \frac{8,13 (kg/d)}{3,5 (\frac{kg ODM}{m^3 * d})} = 2,32 \text{ m}^3$$

Los residuos serán ingresados al biodigestor triturados para aumentar la superficie de contacto para favorecer la etapa de hidrólisis.

- **Espesor del estanque**

$$e_d = \frac{\rho(H-1)d*2,6}{21000*E} + c$$

$$\rho = 510 \text{ (kg/m}^3\text{)} = 0,018 \text{ (lb/in}^3\text{)}$$

$$H = 145,669 \text{ (in)}$$

$$d = 35,433 \text{ (in)}$$

$$E = 0,8$$

$$c = 1/16 \text{ (in)}$$

$$e_d = \frac{0,018 \left(\frac{\text{lb}}{\text{in}^3}\right) * (145,669 \text{ (in)} - 1) * 35,433 \text{ (in)} * 2,6}{21000 * 0,8} + \frac{1}{16} \text{ (in)}$$

$$e_d = 0,072 \text{ (in)}$$

$$e_d = 1,82 \text{ (mm)}$$

La norma API 650 recomienda utilizar como espesor mínimo en planchas de aceros al carbono un valor de 3/16 (in), esto equivale a 5 (mm), como el valor calculado para el espesor es inferior al indicado como mínimo se fija el espesor del manto del estanque en el valor mínimo.

- **Soporte del estanque**

C_1 = carga generada por los residuos en el manto cilíndrico (kg)

$$C_1 = \pi * r^2 * L * \rho_s$$

Donde:

$$r = 0,45 \text{ (m)}$$

$$L = 3,7 \text{ (m)}$$

$$\rho_s = 510 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$C_1 = \pi * (0,45 \text{ (m)})^2 * 3,7 \text{ (m)} * 510 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$C_1 = 1200,46 \text{ (kg)}$$

- Carga generada por los residuos en los cabezales (kg)
-

$$C_2 = 0,4536 * 0,000076 * d^3 * \rho_s$$

$$d = 35,433 \text{ (m)}$$

$$\rho_s = 510 \text{ (kg/ m}^3\text{)}$$

$$C_2 = 0,4536 * 0,000076 * (35,433 \text{ (m)})^3 * 510 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$C_2 = 782,13 \text{ (kg)}$$

Carga generada por el manto (kg)

$$C_3 = \frac{\pi * d * L * e * \rho_{acero}}{4 * 1728} * 0,4536$$

$$\text{Diámetro del estanque} = 2,95 \text{ (ft)}$$

$$\text{Largo del estanque} = 12,14 \text{ (ft)}$$

$$\text{Densidad del acero} = 490 \text{ (lb/ft}^3\text{)}$$

$$\text{Espesor del manto} = 0,021 \text{ (ft)}$$

$$C_3 = \frac{\pi * 2,95 \text{ (ft)} * 12,14 \text{ (ft)} * 0,021 \text{ (ft)} * 490 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}\right)}{4 * 1728} * 0,4536$$

$$C_3 = 0,076 \text{ (lb)}$$

$$C_3 = 0,034 \text{ (kg)}$$

- $C_4 =$ carga generada por los cabezales (kg)

$$C_4 = \frac{\pi * d_{eq}^2 * e * \rho_{acero}}{4 * 1728} * 0,4536$$

Donde:

$$\text{Diámetro equivalente cabezal} = 120 \text{ (in)}$$

$$\text{Densidad del acero} = 490 \text{ (lb/ft}^3\text{)}$$

$$\text{Espesor del manto} = 0,021 \text{ (ft)}$$

$$C_4 = \frac{\pi * (10(ft))^2 * 0,021(ft) * 490 \left(\frac{lb}{ft^3}\right)}{4 * 1728} * 0,4536$$

$$C_4 = 0,212 \text{ (lb)}$$

$$C_4 = 0,096 \text{ (kg)}$$

Carga total (kg)

$$C_T = 1200,46(\text{kg}) + 782,13(\text{kg}) + 0,034(\text{kg}) + 0,096 \text{ (kg)}$$

$$C_T = 1982,72 \text{ (kg)}$$

Hoja de cálculo del sistema de bombeo

Diseño del sistema de bombeo

- **Calculo diámetro de tuberías**

$$D_{tubdesc} = \sqrt{\frac{(V_{T2}/t_{dt2})}{(V_{dt} * 4)/\pi}}$$

Flujo volumétrico (V_T)= 0,392 (m³)

Tiempo de descarga del estanque (t_{dt})= 0,5 (hr)= 720 (s)

Velocidad del flujo másico (V_{dt})= 10 (m/s)

Reemplazamos los valores asignados en la ecuación dando como resultado:

$$D_{tubdesc} = \sqrt{\frac{(0,392 (m^3)/720 (s))}{(10(\frac{m}{s}) * 4)/\pi}}$$

$$D_{tubdesc} = 0,65 (cm)$$

- **Espesor mínimo de tuberías (e_{mim})**

$$e_{mim} = \frac{PN * D}{2\sigma_s + PN}$$

Presión nominal de operación (PN)= 0,1 (MPa)

Diámetro externo de la tubería (D)=150 (mm)

Tensión de diseño (σ_s)= 294 (MPa)

Reemplazamos los valores asignados en la ecuación dando como resultado:

$$e_{mim} = \frac{0,1 MPa * 150(mm)}{2 * 294 (MPa) + 0,1 MPa}$$

$$e_{mim} = 0,03(mm)$$

- Luego la potencia de diseño de la bomba (P_{BT1}^*)necesaria a utilizar equivale a :

$$P_{BT1}^* = \frac{V_{bt1}^* * \Delta P_{T1}}{\eta_{BT1}}$$

Flujo volumétrico para bombear (V_{bt1}^*) tiempo de retención de 25 días=
0,784 (m³/h)= 2822,4(m³/s)

diferencia de presiones entre N carga y descarga (ΔP_{T1}) = 0,29 (bar)

Factor de corrección de la bomba $\eta_{BT1} = 1,2$

$$P_{BT1}^* = \frac{2822,4 \left(\frac{m^3}{s}\right) * 29.000 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1,2}$$

$$P_{BT1}^* = 5,26 \text{ (w)}$$

•Selección de la bomba

La bomba según los parámetros de diseño debe tolerar un fluido de densidad de 510 (kg/m³) de drenaje con un bajo nivel de corrosión además debe ser compatible con la geometría del equipo.

En el grafico siguiente se observa un campo de aplicaciones en el cual seleccionaremos el tipo de bomba según el caudal de salida que es de 0,784 (m³/h).

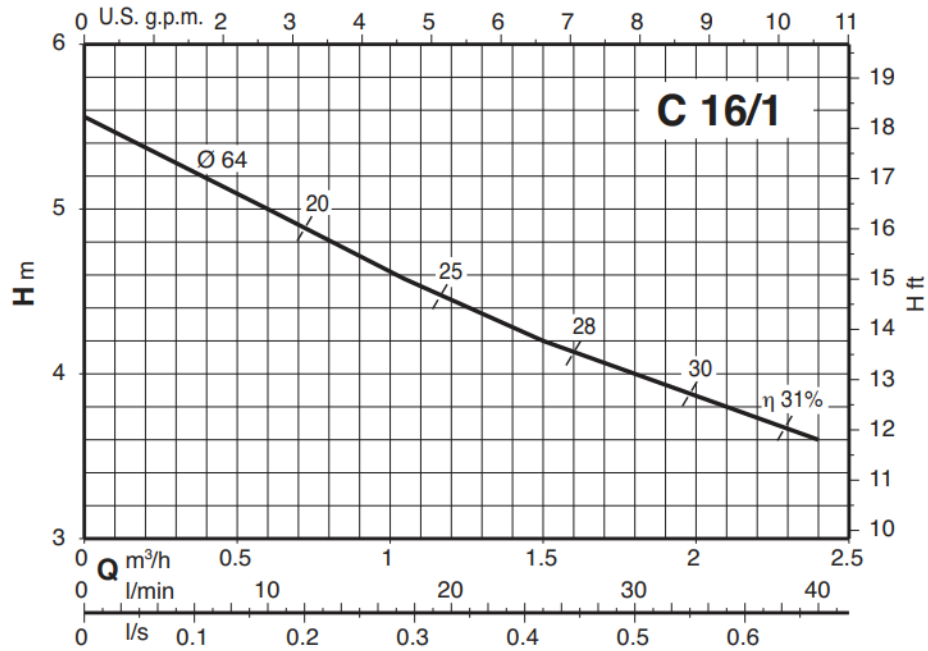


Figura A 3. Característica de la bomba elegida por medio del caudal

Tabla A 1. Características de la bomba seleccionada

Fuente: (Rodavigo.net)

Parámetros	
Marca	Calpeda
Modelo	C-C22/1/trifásica
Referencia rodavigo	746CC221E
Sección de la bomba	64 (mm)
Caudal máximo	2,5 (m³/h)
Elevación máxima	4,8 (m)
Presión máxima	2 (bar)
Temperatura máxima de operación	180°C
Eje	Acero al Cr-Ni-Mo

ANEXO 4 Volumen de almacenamiento de biogás

EL biogás generado como se mencionó en el capítulo 4 se almacena en un gasómetro de doble membrana ubicado en la parte superior del biodigestor, la sobrepresión en estos gasómetros suele rondar los 0,05 bar (Reynoso M., 2017), la ecuación para calcular el volumen requerido para el almacenamiento es la siguiente:

$$V2 = \frac{P1}{T1 * P2} * V1 * T2$$

Donde

T1: Temperatura de digestión (37°C).

V1: Volumen de biogás generado en el reactor en una hora y en condiciones de temperatura y presión mencionadas (37°C, mbar).

T2: Temperatura de equilibrio máxima que podría llegar el gasómetro, se toma el valor de la temperatura máxima absoluta de los últimos 10 años, correspondiendo a la ciudad de Valparaíso de 35,7°C (explorador del CR2).

P1: Presión absoluta en la línea, corresponde a la presión atmosférica más presión manométrica. La Patm corresponde a 1015,8 mbar (promedio de registro de presión durante el periodo de prueba de BMP) y la Pm corresponde a 2 mbar.

P2: Presión absoluta más la sobrepresión presente en el gasómetro, el gasómetro se mantendrá a una presión de 26 mbar.

$$V2 = \frac{1017,8 \text{ mbar}}{310,15 \text{ K} * 1041,8 \text{ mbar}} * 0,482 \text{ m}^3 * 308,85 \text{ K}$$

$$V2 = 0,469 \text{ m}^3$$

$$V2 = 468,92 \text{ litros}$$

ANEXO 5 Norma alemana VDI 4630

La norma alemana VDI 4630 (2016) proporciona reglas y especificaciones para las pruebas para determinar la producción de biogás de materiales orgánicos y la producción de gas residual después de la digestión anaeróbica que sirve para la interpretación y optimización de las plantas de biogás.

La prueba de Potencial Bioquímico de Metano realizada se basó en las reglas de la norma, específicamente en el capítulo 7, que describe pruebas de fermentación en procedimientos por lotes, en las figuras A4 a A10 se presenta fragmentos del capítulo.

<p>7 Gärtests – Batch-Verfahren</p> <p>Nachfolgend wird die Durchführung von Gärtest nach den Batch-Verfahren beschrieben. Das dargestellte Verfahren ist anwendbar auf alle organischen Feststoffe oder Flüssigkeiten, die als repräsentative Testsubstanz eingesetzt werden können.</p> <p>Derartige Gärtests erlauben Aussagen</p> <ul style="list-style-type: none">• zur grundsätzlichen Bewertung des möglichen Biogasertrags und der anaeroben biologischen Abbaubarkeit eines Stoffes oder Stoffgemisches,• zur qualitativen Beurteilung der Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus des untersuchten Stoffes und• zur qualitativen Bewertung der Hemmwirkung des untersuchten Stoffes im untersuchten Konzentrationsbereich. <p>Gärtests erlauben keine Aussagen</p> <ul style="list-style-type: none">• zur Prozessstabilität in Reaktoren, die mit dem untersuchten Stoff oder dem Stoffgemisch kontinuierlich beschickt werden,• zur Biogasausbeute unter Praxisbedingungen, auf Grund möglicher negativer oder positiver Synergieeffekte,• zur Monovergärbarkeit des Substrates unter Prozessbedingungen und• über die Grenzen der organischen Raumbelastung. <p>Das Ergebnis eines Gärtests hängt vor allem ab von</p> <ul style="list-style-type: none">• der mikrobiologischen Aktivität des verwendeten Impfschlammes (diese ist abhängig von den Milieubedingungen wie Temperatur und Verfügbarkeit des Substrates sowie von der Leistungsfähigkeit der verwendeten biologisch aktiven Masse) und• der ordnungsgemäßen Erfassung und Auswertung der entstandenen Biogasmengen.	<p>7 Fermentation tests – batch procedures</p> <p>We will now describe how the fermentation test using the batch procedure is carried out. The procedure described can be applied to all organic solids or liquids which can be used as representative test substances.</p> <p>Fermentation tests of this kind provide information regarding:</p> <ul style="list-style-type: none">• Fundamental evaluation of the possible biogas yield and of the anaerobic biological degradability of a material or mixture of materials• Qualitative appraisal of the speed of anaerobic degradation of the material under investigation, and• Qualitative evaluation of the inhibitory effect of the material under investigation in the range of concentrations in the test. <p>Fermentation tests provide no information regarding:</p> <ul style="list-style-type: none">• Process stability in reactors which are continuously fed with the material or mixture of materials under investigation• Biogas yield under practical conditions due to possible negative or positive synergistic effects• The mono-fermentability of the substrate under process conditions, and• The limits of the organic loading rate per unit volume. <p>The result of a fermentation test depends primarily on:</p> <ul style="list-style-type: none">• The microbiological activity of the seeding sludge being used (this is dependent on milieu conditions such as temperature and availability of the substrate as also the efficiency of the biologically active mass used), and• Proper acquisition and evaluation of the biogas quantities created.
--	---

Figura A 4. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

Um vergleichbare Ergebnisse in Gärtests zu erhalten ist es notwendig, sowohl die Erstellung eines Gäransatzes als auch die Gaserfassung und deren Auswertung möglichst genau zu definieren.

7.1 Material und Methoden

7.1.1 Gärtestapparaturen

Die Gärtestapparatur kann gemäß DIN 38414-8 oder gemäß DIN EN ISO 11734 ausgeführt werden. Zunächst gilt es bei der Auswahl der Gerätschaften und Materialien darauf zu achten, dass ein Luftsauerstoffeintrag oder ein unkontrollierter Biogasausstrag ausgeschlossen wird; das heißt alle verwendeten Gerätschaften sollten eine ausreichende Gasdichtigkeit aufweisen. Für alle Teile der Apparatur, die mit der Biogasatmosphäre in Kontakt sind, ist Glas der bevorzugte Werkstoff. Das gesamte System soll nach dem Aufbau einem Dichtigkeitstest unterzogen werden. Vor allem bei der Verwendung von Schläuchen ist die Dichtigkeit besonders sorgsam zu prüfen. Wie dieser im einzelnen Aussehen kann, ist abhängig von dem Versuchsaufbau. Dichtigkeitsprüfungen mit Stickstoff oder Luft sind nicht ausreichend, da verschiedene Werkstoffe unterschiedliche Permeabilitätsraten für die Hauptbestandteile des Biogases im Vergleich zu den Hauptbestandteilen der Luft haben. Sinnvollerweise werden die Dichtigkeitsstests daher mit Biogas oder einer dem Biogas vergleichbaren synthetischen Mischung von CH₄ und CO₂ durchgeführt.

Die Inkubation der Ansätze erfolgt unter mesophilen (37 °C ± 2 °C) oder unter thermophilen Bedingungen (55 °C ± 1 °C). Zum Temperieren der Gäransätze können Klimakammern verwendet werden. Diese sind in der Regel nicht mit Umluftsystem ausgestattet und dann mit einem Ventilator nachzurüsten, um eine homogene Temperaturkonstanz im gesamten Inkubatorraum zu sichern. Als alternative Wärmequelle können Wasserbäder zum Einsatz kommen; hier ist darauf zu achten, dass der Flüssigkeitspegel im Wasserbad stets oberhalb der Füllstände in den Gärgefäßen ist.

Eine Einrichtung zur mechanischen Durchmischung des Gäransatzes ist hilfreich, jedoch meistens nicht erforderlich. Bei Substraten, die eine Schwimmschicht erzeugen, ist eine regelmäßige Durchmischung aber notwendig. Eine einmalige vollständige Durchmischung an Werktagen ist dabei meistens ausreichend. Das Durchmischen dient vor allem dazu, die Ausgasung des gebildeten Biogases zu fördern und die Bildung von trockenen inaktiven Flotat-schichten zu verhindern.

Die Gärtestgefäße können 0,5-ℓ-, 1-ℓ- oder 2-ℓ-Flaschen sein. Für besonders inhomogenes Substrat

This means that if comparable results are to be obtained in fermentation tests, not only the creation of a fermentation batch but also gas data acquisition and its evaluation must be defined as precisely as possible.

7.1 Material and methods

7.1.1 Fermentation test apparatus

Fermentation test apparatus may be as specified in DIN 38414 Part 8 or as specified in DIN EN ISO 11734. The first thing to pay attention to when selecting the equipment and materials is that introduction of atmospheric oxygen or unmonitored discharge of biogas is excluded; in other words, all equipment used should be adequately gastight. Glass is the preferred material for all parts of the apparatus which are in contact with the biogas atmosphere. Once it has been set up, the entire system should be tested to ensure it is leaktight. Particularly when hoses are used, an extra careful check should be made for leaks. How these may appear in individual cases may depend on the test apparatus set-up. Leak testing using nitrogen or air is inadequate since different materials have different permeability rates for the main constituents of the biogas as compared with the main constituents of air. For this reason, leak tests are carried out with biogas or with a synthetic mixture of CH₄ and CO₂ which is comparable to the biogas.

Feed materials are incubated under mesophilic conditions (37 °C ± 2 °C) or under thermophilic conditions (55 °C ± 1 °C). Climatic chambers can be used for temperature control of the fermentation batches. As a rule these chambers are not equipped with a circulating air system. A fan should therefore be fitted so as to ensure that temperatures are kept constant within the entire volume of the incubator. Water baths can be used as an alternative heat source but here it should be ensured that the level of water in the bath is always higher than the fill levels in the fermentation vessels.

A device for mixing the fermentation batch thoroughly may be useful but in most cases is not necessary. Substrates which produce a floating layer or scum will however need to be mixed thoroughly on a regular basis. In most cases a single thorough mixing will suffice on workdays. The main reason for thorough mixing is to encourage degassing of the biogas which forms and to prevent the formation of dry and inactive layers of flotage.

The containers used for the fermentation test can be 0,5 ℓ, 1 ℓ oder 2 ℓ flasks. When a substrate is particu-

Figura A 5. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

(Müll, Bioabfall etc.) ist der Einsatz größerer Gärvolumina (10 ℓ bis 20 ℓ) zu präferieren, da dadurch das Erstellen repräsentativer Proben erleichtert wird. Wenn Probenaufbereitung und Aufgabenstellung es zulassen, kann auch mit noch kleineren Gefäßen gearbeitet werden, wie es z.B. beim Hohenheimer Biogastest [14] beschrieben ist. Je größer die Probeflaschen und damit auch die eingesetzte Substratmenge sind, desto größer muss auch die gaserfassende Apparatur ausgelegt werden (Abschnitt 7.1.3). Dies trifft insbesondere bei der Vergärung energiereicher Rohsubstrate wie z.B. Maissilage, Flotatfett oder Speiseabfall zu, bei denen eine verhältnismäßig große Biogasausbeute zu erwarten ist.

larly inhomogeneous (refuse, biowaste, and so on), it may be better to have larger fermentation volumes (10 ℓ to 20 ℓ) as this makes it easier to obtain representative samples. If sample preparation and the test objectives permit, even smaller containers may be used such as was the case in the Hohenheim biogas test, for example [14]. The larger the sample flasks are – and thus the amount of substrate used as well – the larger the apparatus detecting the gas must be dimensioned (see Section 7.1.3). This is particularly the case when energy-rich raw substrates are fermented. These include maize silage, fatty flotate or food waste from which a relatively high biogas yield is to be expected.

Figura A 6. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

7.1.2 Impfschlamm

Als Impfschlamm soll bevorzugt unbehandelter Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage, der keiner offensichtlichen Hemmung unterlegen ist, eingesetzt werden. Derartige Schlämme kommen auf Grund ihrer Natur mit einer Vielzahl an Substanzen in Kontakt und bilden somit ein Inoculum, das eine vielseitige Biozönose enthält und deshalb einem labor-technisch gezüchteten Inoculum, das keiner vergleichbaren Bandbreite an Substanzen ausgesetzt ist, vorzuziehen ist. Der Impfschlamm soll einen organischen Trockensubstanzgehalt (oTS) von über 50 % der TS aufweisen.

Vor dem Einsatz im Gärtest ist der Impfschlamm bei Testtemperatur eine Woche lang zu lagern, um durch eine Hungerphase seine Eigengasproduktion ausreichend abzusenken. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Nährstoffversorgung und Pufferkapazität des Impfschlammes kann dieser wie in DIN EN ISO 11734

7.1.2 Seeding sludge

By preference, the seeding sludge used should be untreated digested sludge from a municipal sewage treatment works and one which is not obviously subject to inhibition. Due to their nature, sludges of this kind come into contact with a large variety of substances and thus constitute an inoculum which contains a diversified biocoenose. For this reason an inoculum produced in the laboratory and which has therefore not been exposed to any comparable range of substances is to be preferred. The seeding sludge should have an organic dry matter content (oTS) greater than 50 % of the solids content.

Before it is used in the fermentation test the seeding sludge should be stored for a week at the test temperature so as to reduce sufficiently its own gas production by means of a hunger phase. To ensure an adequate supply of nutrients and buffering capacity of the seeding sludge it can be prepared as described in

Figura A 7. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

beschrieben vorbereitet werden und im spezifizierten Testmedium resuspendiert werden. Ein Verfahren zur längeren Lagerung des Impfschlammes ist in DIN 38414-8 beschrieben.

Sollen landwirtschaftliche Rückstände, Nebenprodukte oder Abfälle vergoren werden, kann auch ein Inokulum aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage genommen werden, die den entsprechenden Rückstand, das jeweilige Nebenprodukt oder den entsprechenden Abfall ebenfalls vergärt (z.B. Gartest mit Maissilage: Inokulum aus einer Biogasanlage, die Maissilage mitvergart). Für thermophile Gärversuche muss der Impfschlamm entweder einer thermophil betriebenen Anlage entnommen oder entsprechend adaptiert werden.

Bei Substraten, die als schwer abbaubar einzuschätzen sind, kann eine vorgezogene Garphase in Gegenwart der Prüfsubstanz durchgeführt werden, um eine Adaption des Impfschlammes an die Prüfsubstanz vor dem eigentlichen Gartest zu erreichen (siehe auch DIN EN ISO 11734).

Der Impfschlamm ist vor dem Einsatz von groben Verunreinigungen zu befreien und gut zu durchmischen, um eine repräsentative Einwaage zu gewährleisten. Ein Waschen des Impfschlammes wie in DIN EN ISO 11734 beschrieben kann sich ebenfalls als vorteilhaft erweisen.

Zur Klärung der Frage, ob eine weitergehende Adaption des Impfschlammes zum besseren anaeroben biologischen Abbau des Prufsubstrats möglich ist, kann ein Batch-Gartest mit dem Garruckstand aus dem vorausgegangenen Test als Impfschlamm wiederholt werden.

Um den Gärverlauf zu vereinheitlichen, sollte im Gäransatz 1,5 Gew.-% bis 2 Gew.-% organische Masse aus dem Impfschlamm vorliegen (nicht weniger und nicht mehr), um eine vergleichbare Biomassekonzentration sicherzustellen (z.B. Gäransatz 500 ml benötigt 7,5 g_{oTS} bis 10 g_{oTS} aus dem Impfschlamm: also z.B. 400 ml Impfschlamm mit Trockensubstanzgehalt (TS) von 3,5 Gew.-% und oTS von 60 % des TS).

7.1.3 Probenmenge

Bei der Festlegung, wie viel Substrat und Impfschlamm in einen Gäransatz eingewogen werden sollen, gilt es folgende Rahmenbedingungen einzuhalten:

- Um eine Hemmung im Gäransatz zu verhindern, soll das Substrat im Verhältnis zum Impfschlamm keinen zu großen Anteil haben.

$$\frac{oTS_{\text{Substrat}}}{oTS_{\text{Impfschlamm}}} \leq 0,5$$

DIN EN ISO 11734 and resuspended in the specified test medium. A procedure for extended storage of the seeding sludge is described in DIN 38414-8.

If agricultural residues, by-products or waste are to be fermented, even an inoculum from an agricultural biogas installation can be used which also ferments the corresponding residue, the corresponding by-product or the corresponding waste (for example, fermentation test with maize silage: inoculum from a biogas installation which co-ferments maize silage). For thermophilic fermentation tests the seeding sludge must be taken either from a thermophilicly operated installation or adapted accordingly.

In the case of substrates which are estimated as degrading only with difficulty, a fermentation phase in the presence of the test substance can be incorporated upstream so as to cause the seeding sludge to adapt to the test substance before the actual fermentation test (see also DIN EN ISO 11734).

The seeding sludge should be freed of coarse contaminating material before being used and mixed thoroughly to ensure that a representative weighed portion is obtained. It may also be a good idea to wash the seeding sludge as described in DIN EN ISO 11734.

To clarify the question as to whether it is possible to adapt the seeding sludge further for the purpose of better anaerobic biological degradation of the test substrate, a batch fermentation test can be repeated with the fermentation residue from the preceding test used as seeding sludge.

In order to standardize the course of fermentation, the fermentation batch should contain 1,5 % to 2 % by weight of organic mass from the seeding sludge (no more and no less) in order to ensure a comparable biomass concentration (for example, a fermentation batch of 500 ml requires 7,5 g_{oTS} to 10 g_{oTS} from the seeding sludge: in other words, for example, 400 ml seeding sludge with dry matter content (TS) of 3,5 % by weight and oTS of 60 % by weight of the TS).

7.1.3 Sample quantity

In determining how much substrate and seeding sludge should be weighed into a fermentation batch the following general constraints should be complied with:

- To prevent inhibition in the fermentation batch, the substrate should not be overlarge in proportion to the seeding sludge.

$$\frac{oTS_{\text{substrate}}}{oTS_{\text{seeding sludge}}} \leq 0,5$$

Figura A 8. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

7.2 Versuchsdurchführung

Batch-Gärtests sollen mindestens als Doppelbestimmungen (besser Dreifachbestimmungen) durchgeführt werden. Dieses gilt auch für die Referenz- und die Nullprobe.

Das Substrat wird mit in das Gärgefäß eingewogen, falls erforderlich mit Wasser vermischt und anschließend mit Impfschlamm vorsichtig auf das gewünschte Volumen aufgefüllt. Ein Arbeiten unter Stickstoffatmosphäre, wie in DIN EN ISO 11734 beschrieben, ist bei diesem Arbeitsschritt nicht notwendig. Ein allzu intensiver Austausch mit der Umgebungsluft sollte aber vermieden werden.

Vor dem Verschließen der Gärtestgefäße ist die Gasphase mit Stickstoff zu spülen, um den restlichen Sauerstoff aus der Gasphase zu entfernen. Dieser würde durch aerobe Abbauprozesse die Biogasausbeute negativ beeinflussen.

Während der Versuchsdurchführung ist auf eine ausreichende Durchmischung des Gärguts zu achten. Ein periodisches Mischen wie tägliches Schütteln zum vollständigen Resuspendieren der Sedimente und Schwimmdecken ist ausreichend.

Die entstehende Biogasmenge soll so häufig abgelesen werden, dass der Verlauf der Gasbildung einwandfrei zu erkennen ist. Dafür muss zu Beginn der Messungen täglich abgelesen werden. Sinkt die tägliche Gasproduktion, kann auf Ablesen alle zwei bis drei Tage reduziert werden. In regelmäßigen Abständen, z.B. bei jedem Ablassen von Biogas, soll dessen Gehalt an Methan bestimmt werden. Eine einmalige Methanbestimmung über den gesamten Versuchszeitraum reicht nicht aus, da sich der Methangehalt im Verlauf des Gärtests stark ändert.

Der Versuch wird so lange fortgeführt, bis nur noch ein geringes Biogasvolumen gebildet wird. Als Abbruchkriterium für den Versuch gilt, dass die tägliche Biogasrate nur noch 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogas Gesamtvolumens beträgt. Die Hauptmenge an Biogas wird üblicherweise innerhalb der ersten Woche des Gärversuchs gebildet. Häufig ist der biologische Abbau nach 20 Tagen weitgehend abgeschlossen und nach etwa 40 Tagen wird meistens nur noch eine sehr geringe Biogasproduktion beobachtet.

Bei Versuchsapparaturen muss auf den Gasraum oberhalb des Flüssigkeitsstandes geachtet werden. Insbesondere bei der Versuchsapparatur gemäß

7.2 Test procedure

Batch fermentation tests should be conducted at least as double determinations (or better as triple determinations). The same applies to the reference and zero samples as well.

The substrate is also weighed into the fermentation vessel, mixed if necessary with water, and the vessel then carefully filled with seeding sludge to the desired volume. In this operational step it is not necessary to work in a nitrogen atmosphere, as described in DIN EN ISO 11734. However, over-intensive exchange with the ambient air should be avoided.

Before the fermentation test vessels are closed the gas phase should be flushed with nitrogen so as to remove the residual oxygen from the gas phase. Due to aerobic degradation processes this would have a negative effect on the biogas yield.

During the course of the test, care should be taken that the fermentation material is sufficiently mixed. Regular mixing (such as shaking the vessels each day to fully resuspend the sediments and the scum layers) will suffice.

The biogas quantity should be read off as frequently as is necessary to make the course of gas formation perfectly recognizable. This calls for daily readings at the beginning of the measurements. Once the daily gas production falls, the frequency of reading can be reduced to once every two or three days. The methane content of the biogas should be determined at regular intervals; for example, every time biogas is vented. It is not sufficient to determine the methane content just once during the entire test period as the methane content varies markedly during the course of the fermentation test.

The test is continued until only a small volume of biogas forms. The criterion for terminating the test is when the daily biogas rate is equivalent to only 1 % of the total volume of biogas produced up to that time. Normally the great majority of the biogas is formed within the first week of the fermentation trial. Often biological degradation has more or less finished after 20 days and after 40 days or so in most cases only a very small level of biogas production is observed.

In the test apparatus, attention must be paid to the gas space above the level of the liquid. This is especially necessary with the test set-up shown in Figure 4 since

Figura A 9. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

Bild 4 ist dies notwendig, da der freie Gasraum zur Umrechnung des gemessenen Druckes in ein Gasvolumen benötigt wird.

Nach Beendigung des Versuchs ist der pH-Wert des Materials im Gärtestgefäß zu bestimmen und zu protokollieren.

7.3 Auswertung

Die folgenden beiden Abschnitte geben eine detaillierte Anleitung zur erforderlichen Datenerhebung und quantitativen Auswertung von Gärtests als auch Hinweise zur qualitativen Beurteilung des gemessenen Verlaufs der Biogasbildung.

Quantitative Auswertung

Als erster Schritt ist eine Berechnung des Normvolumens des in den einzelnen Zeitabschnitten entwickelten Faulgases durchzuführen. Dabei wird der Wasserdampfgehalt des Biogases herausgerechnet und das trockene Gasvolumen ermittelt. Dazu dient die folgende Gleichung.

$$V_0^{\text{tr}} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (3)$$

Dabei ist

V_0^{tr} Volumen des trockenen Gases im Normzustand in m^3_{N}

V abgelesenes Volumen des Gases in m^3

p Druck der Gasphase zum Zeitpunkt der Ableseung in hPa

p_w Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur des umgebenden Raumes in hPa

T_0 Normtemperatur; $T_0 = 273 \text{ K}$

p_0 Normdruck; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$

T Temperatur des Faulgases oder des umgebenden Raumes in K

Wird der Versuch im thermostatisierten Raum ausgeführt, so ist als T dessen Temperatur einzusetzen. Befindet sich nur die Standflasche mit dem Schlamm im Thermostaten, so gilt für das Faulgas die Raumtemperatur.

the free gas space is required for converting the measured pressure into a gas volume.

At the end of the test the pH value of the material in the fermentation test vessel should be determined and recorded.

7.3 Evaluation

The two sections which follow provide not only a detailed introduction to data acquisition and quantitative evaluation of fermentation tests but also information on qualitative assessment of the measured course of biogas formation.

Quantitative evaluation

The first step is to calculate the normal volume of the fermentation gas which developed during the periods between readings. Here the water vapour content of the biogas is calculated from this and the dry gas volume obtained. The following equation is used for this:

$$V_0^{\text{tr}} = V \cdot \frac{(p - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (3)$$

where

V_0^{tr} volume of the dry gas in the normal state, in m^3_{N}

V volume of the gas as read off, in m^3

p pressure of the gas phase at the time of reading, in hPa

p_w vapour pressure of the water as a function of the temperature of the ambient space, in hPa

T_0 normal temperature; $T_0 = 273 \text{ K}$

p_0 normal pressure; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$

T temperature of the fermentation gas or of the ambient space, in K

If the test is carried out in a thermostat-controlled room, the temperature in this room should be used as T . If only the jar with the sludge is in the constant-temperature bath, the room temperature will apply to the fermentation gas.

Figura A 10. Extracto de la norma alemana VDI 4630

(Fuente: Ingenieure, V. D. , 2006)

ANEXO 6Funcionamiento de casino completamente con biogás

Se planteará que en el CIAE se generan 4,5 veces más residuos orgánicos que en la actualidad, el objetivo es calcular si con esa cantidad se podría abastecer durante todo el año el casino exclusivamente de biogás.

- Carbono orgánico degradable descomponible

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF$$

Masa de los desechos depositados (Gg) (W)

A partir del objetivo uno, se estima que la generación de residuos orgánicos frescos en el edificio CIAE un año corresponde a 2.439 kilogramos, si los residuos aumentan en un 4,5, la cifra aumentaría a 10.975,5 kg (0,0109755 Gg).

Carbono orgánico degradable durante el año de deposición, fracción (Gg de C/Gg de desechos) (DOC)

El Carbono orgánico degradable se mantendrá en 0,6667

Fracción del DDOC que puede descomponerse (fracción) (DOC_f)

Por defecto el IPCC recomienda para DOC_f el valor de 0,15 para desechos de alimentos húmedos

Factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición (fracción) (MCF)

Según IPCC se asigna un valor por defecto en relación con la categoría perteneciente del residuo. El tipo de sitio de disposición de los residuos pertenece a gestionado-anaeróbico correspondiendo a un valor de MCF de 1.

Reemplazo de los valores establecidos

$$DDOC_m = 0,0109755 \text{ (Gg)} * 0,6667 * 0,15 * 1,0$$

$$DDOC_m = 1,098 * 10^{-3} \text{ (Gg)}$$

- Potencial de generación de metano

$$L_0 = DDOC_m * F * \frac{16}{12}$$

Masa del DOC descompuesto depositado (Gg) (DDOC_m) = 1,098*10⁻³(Gg)

Fracción de CH₄ en el gas generado (fracción de volumen) = 0,7

Reemplazo de los valores establecidos

$$L_0 = 1,098 * 10^{-3} * 0,7 * \frac{16}{12}$$

$$L_0 = 1,024 * 10^{-3} \text{ (Gg de metano/año)}$$

DDOC_m acumulado al final del año T (Gg)

$$DDOC_{mT} = DDOC_{mT-1} + (DDOC_{mT-1} * e^{-k})$$

Año del inventario (T): Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor

DDOC_m acumulado al final del año (T-1) (Gg) (DDOC_{mT-1}): Su valor es igual a DDOC_m que es 1,098*10⁻³ (Gg)

DDOCm depositado durante el año T (Gg) (DDOC_{mdT}): El valor de DDOCm depositado en el año 1 es igual a cero

Constante de reacción (k):

$$K = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Vida media (t_{1/2})

La vida media de los residuos se encuentra directamente ligada a la zona climática en que se encuentre geográficamente el biodigestor, como se mencionó en el capítulo de resultados la relación MAP/PET da un valor de 0,97 categorizándose como zona climática seca. Por consiguiente, t tiene un valor por defecto de 12.

$$K = \frac{\ln(2)}{12}$$

$$K = 0,0578$$

Reemplazamos los valores en la ecuación

$$DDOC_{maT} = 0 + (1,098 * 10^{-3} * e^{-0,0578})$$

$$DDOC_{maT} = 1,036 * 10^{-3}$$

- **DDOCm descompuesto durante el año T**

$$DDOC_{m\ descompT} = DDOC_{maT-1} * (1 - e^{-k})$$

Año del inventario (T): Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor.

DDOCm acumulado al final del año (T-1) (Gg) DDOC_{maT-1}: Su valor es igual a DDOCm que es $2,44 * 10^{-4}$ (Gg)

Constante de reacción (k) = 0,0578

Reemplazar en la ecuación los valores asignados

$$\text{DDOCm descomp}_T = 1,098 * 10^{-3} * (1 - e^{-0,0578})$$

$$\text{DDOCm descomp}_T = 6,164 * 10^{-5} \text{ (Gg)}$$

- Cantidad CH₄ generado a partir del material en descomposición

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = \text{DDOCm descomp}_T * F * \frac{16}{12}$$

CH₄ descompuesto durante el año T (Gg) (DDOCm descomp_T) 6,164*10⁻⁵ (Gg)

Fracción volumétrica de CH₄ en el gas de vertedero generado (fracción)(F)

Del gas generado el 70% corresponde a metano en el caso más favorable.

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = 6,164 * 10^{-5} \text{ (Gg)} * 0,7 * \frac{16}{12}$$

$$\text{CH}_4 \text{ generado}_T = 5,753 * 10^{-5} \text{ (Gg)}$$

- **CH₄ emitido durante el año T (Gg)**

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \left[\sum_x \text{CH}_4 \text{ generado}_{x,T} - R_T \right] * (1 - \text{OX}_T)$$

Año de inventario: Se considerará el primer año en funcionamiento del biodigestor.

Categoría o tipo de desecho y/o material: Solo se trabajará con un tipo de desecho y son residuos de comida, materia orgánica.

CH₄ recuperado durante el año T (Gg)(R_T): Como la finalidad es saber la cantidad de emisión de metano se genera el valor de recuperación se supondrá que es cero.

Factor de oxidación durante el año T (fracción)(OX_T): El valor por defecto para el factor de oxidación es cero. El uso del valor de oxidación de 0,1 se justifica cuando se gestiona con algún material oxidante

$$Emisiones\ de\ CH_4 = [5,753 * 10^{-5}\ (Gg) - 0] * (1-0)$$

$$Emisiones\ de\ CH_4 = 5,753 * 10^{-5}\ (Gg)$$

Las emisiones de CH₄ corresponden a 57,53 kg, en base a la densidad del metano que es 0,657 (kg/m³) el volumen de metano emitido es de 87,57 m³. Si suponemos que la cantidad de metano emitido es la máxima es decir un 70%, la cantidad de biogás producido es de 125,1 m³

Para comprobar si los 125,1 m³ son suficientes para el funcionamiento de un año del casino de alimentación del CIAE, se considero la cantidad de hornillas que se utilizan normalmente en las preparaciones de los menús, en la tabla X se observan las preparaciones de una semana.

Categoría de menú	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
General 1	Pechuga de pollo a la toscana con arroz casero	Guiso de carne y verduras con papas rústicas	Arvejado de vacuno con corbatitas al cilantro	Hamburguesa casera de vacuno suizo con chapsui de verduras	Tomaticán de vacuno con papas a la diablo
General 2	Pantrucas	Garbanzos nevados con chorizo	Pescado napolitano con corbatitas al cilantro	Arvejas partidas	Truto de pollo asado con rissoto de mote
Hipocalórico	Pechuga de pollo a la toscana con ensalada	Pulpa de cerdo a la	Pescado napolitano	Hamburguesa casera de vacuno suizo con	Truto de pollo asado con

		mostaza con ensaladas	con ensaladas surtidas	ensaladas surtidas	ensaladas surtidas
Vegetariano	Hamburguesa casera de soya en salsa con arroz casero	Garbanzos nevados	Budín de verduras con corbatitas al cilantro	Arvejas partidas	Croqueta de verduras con rissoto de mote
Hornillas utilizadas	4	5	4	3	5

Se puede observar la diversidad de preparaciones que existen en la semana. La cantidad de hornillas se contabiliza una por cada preparación, ejemplo el lunes en el menú general 1 consta de pechuga de pollo a la toscana y arroz casero, la preparación de la pechuga de pollo a la toscana se asume que utiliza una hornilla y por otra parte el arroz otra hornilla.

La cantidad máxima de hornillas es de 5, martes y viernes, se sumará una hornilla extra debido a que todos los días se tiene como opción en el menú de un postre en base de leche el cual utiliza una hornilla para la preparación. Por lo tanto, son 6 hornillas como máximo en un día normal en el casino.

Una cocina de biogás de dos hornillas consume 0,2 m³/h, el casino debería constar como mínimo con 3 cocinas, por lo tanto, los 125,1 m³ producidos de metano será distribuido en 3, cada cocina tendrá 41,7 m³ para el año, cada hornilla funcionaria 208,5 horas.

Para poder hacer una comparación se supondrá que 1 hornilla funciona en un tiempo de 1 para por cada preparación, en una semana se necesitan 5 horas de biogás de una hornilla, en un año es necesario 200 horas de funcionamiento.

Si la cantidad de residuos orgánicos es de 10.975,5 kg existe la factibilidad del funcionamiento del casino completamente de biogás, considerando que una hornilla en un año opera 200 horas y que la cantidad de biogás generada facilita 208,5 horas operación.