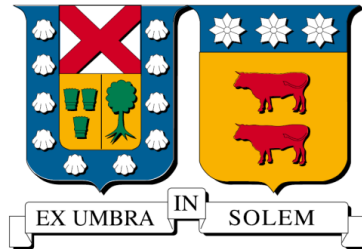


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



“METANIZACIÓN SOLAR DE ALGAS
ENDÉMICAS DE LA REGIÓN DE
VALPARAÍSO PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGAS COMBUSTIBLE”

PAULO EDGARDO DUBÓ CONTRERAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN PRODUCCIÓN.

PROFESOR GUÍA: DR. ING. ALEX FLORES M.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. GERMÁN AMADOR D.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. CAMILA MERY A.

OCTUBRE – 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecer infinitamente a mis padres por darme la oportunidad de crecer como profesional y sobre todo como persona, por el apoyo incondicional hasta el final de este camino, este logro es también de ustedes.

A mi profesor guía Alex Flores y correferentes Camila Mery y German Amador, por tener toda la disposición y el apoyo a lo largo de todo el proceso.

Al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental por facilitar sus dependencias y apoyo docente para realizar esta experimentación. Agradezco al equipo del Laboratorio de RILES, en especial a Andrea, Paloma y Félix, ya que fueron buenos compañeros al final de mi estancia dentro de la universidad, fue un gusto haberlos conocido.

A toda la gente que fui conociendo en el camino y que pude compartir momentos de risa y distensión. A Natalia, Gabo, James y Ricardo “Tek-Tek” por ser buenos amigos y por todas las anécdotas vividas en Valpo. A Karenine, por caminar juntos de la mano en todo este proceso, y sobre todo por tu amor y apoyo incondicional.

A mi familia, amigos, compañeros de universidad, académicos y docentes, sin el aporte de ustedes todo hubiese sido mucho más complicado, GRACIAS TOTALES.

DEDICATORIA

“A mis raíces y para mi hijo Agustín, mi motor”

RESUMEN

Debido al contexto energético-climático actual que se vive en estos días urge la necesidad de buscar fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC) que sirvan de complemento a las fuentes ya existentes, o bien para derechamente sustituirlas por completo en algún proceso productivo. La producción de biogás, que se genera a partir de la descomposición de la biomasa por la acción bacteriana es un ejemplo de lo mencionado previamente.

Este trabajo de título consiste en la primera etapa del estudio de metanización solar, cuya contribución radica en realizar la caracterización de la biomasa algal *Durvillae Antártica* a la que posteriormente se sometió a un ensayo de BMP con la que se evaluó su potencial metanogénico y se analizó el biogás generado en condiciones de laboratorio a baja escala. El uso de una macroalga como fuente para generar biogás radica en su velocidad de crecimiento y capacidad de adaptación a diferentes condiciones del medio.

Se realizaron dos tipos de ensayos de BMP, uno de botella invertida y otro con la utilización de frascos Serum, en donde en este último se trabajó con dos montajes en paralelo, uno con la macro alga sin tratamiento y el otro donde se le aplicó un tratamiento previo en un autoclave aplicándole temperatura y presión con la finalidad de romper la pared celular y así facilitar la acción de las bacterias.

Para cada ensayo se evaluó la producción de biogás de tres muestras diferentes, cada una con una diferente proporción de biomasa algal-heces dentro del volumen efectivo del mini reactor, **la primera de 90%-10%, la segunda de 50%-50% y la tercera de 20%-80%**. Además, se realizó un análisis en un cromatógrafo con la finalidad de saber la composición del biogás generado en el ensayo de BMP con frascos Serum.

El principal logro que se desprende de la experimentación es que la macro alga *Durvillae Antártica* **si es potencialmente metanogénica**, ya que para cada ensayo y

cada muestra se logró obtener un cierto volumen de biogás. A partir de los resultados obtenidos de cada ensayo de BMP se desprende que **no se puede decir con certeza si existe una mezcla mejor que otra una vez finalizada la co-digestión**, puesto que no hay una tendencia clara. En el ensayo de BMP de botella invertida la muestra que más generó biogás fue la **muestra 2 (50-50)** y la **biodegradabilidad anaerobia para las tres muestras fue similar sobre un 60%**. Para el ensayo de BMP con frascos Serum la que más generó fue la **muestra 3 (20-80) sin tratamiento previo** con 42 ml de metano generado. Del análisis realizado en el cromatógrafo se tiene que la muestra anteriormente mencionada **posee el porcentaje de metano más alto con un 57%** y la de las demás muestras están entre este último porcentaje y **un 48%**.

Por último, se observa que **realizar un tratamiento previo en esta experimentación no mejoró la producción de metano considerablemente**, pero si mejora la rapidez con que actúan las bacterias al inicio del experimento, lo que resulta beneficioso ya que reduce el tiempo de retención del sustrato dentro del reactor.

La aplicabilidad de este trabajo radica en ser el inicio del estudio de biomasa algal como fuente de producción de biogás combustible, ya que con los resultados obtenidos y mencionados con anterioridad, el siguiente paso es continuar con el desarrollo de un biodigestor a mayor escala con la incorporación de energía solar térmica y/o fotovoltaica.

ABSTRACT

Due to the current energetic-climatic context that is lived in these days, it is urgently necessary to look for non-standard renewable energy sources (NCRE) that complement the already affected sources, or to rightly completely replace them in some productive process. The production of biogas, which is generated from the decomposition of biomass by bacterial action is an example of the aforementioned.

This degree work consists of the first stage of the study of solar methanization, whose contribution lies in carrying out the characterization of the *Durvillae* Antarctic algal biomass to which it was subsequently subjected to a BMP test with which its methanogenic potential was evaluated and analyzed the biogas generated in small-scale laboratory conditions. The use of a macroalgae as a source to generate biogas lies in its growth rate and adaptability to different environmental conditions.

Two types of BMP tests were carried out, one of an inverted bottle and the other with the use of Serum bottles, where the latter worked with two assemblies in parallel, one with the macro algae without treatment and the other where it was applied a Pretreatment in an autoclave by applying temperature and pressure in order to break the cell wall and thus facilitate the action of bacteria.

For each test the biogas production of three different samples was evaluated, each with a different proportion of algal-feces biomass within the effective volume of the mini reactor, the first of 90% -10%, the second of 50% -50% and the third of 20% -80%. In addition, an analysis was performed on a chromatograph in order to know the composition of the biogas generated in the BMP test with Serum bottles.

The main achievement that emerges from the experimentation is that the *Durvillae* Antarctic macro algae is potentially methanogenic, since for each test and each sample a certain volume of biogas was obtained. From the results obtained from each BMP

test it can be said that it cannot be said with certainty if there is a better mixture than another once the co-digestion is finished, since there is no clear trend. In the inverted bottle BMP test, the sample that generated the most biogas was sample 2 (50-50) and anaerobic biodegradability for the three samples was similar over 60%. For the BMP test with Serum bottles the one that generated the most was sample 3 (20-80) without prior treatment with 42 [ml] of generated methane. From the analysis carried out in the chromatograph, the aforementioned sample has the highest percentage of methane with 57% and that of the other samples are between the latter percentage and 48%.

Finally, it is observed that performing a previous treatment in this experiment did not improve methane production considerably, but it does improve the speed with which the bacteria act at the beginning of the experiment, which is beneficial since it reduces the retention time of the substrate within the reactor.

The applicability of this work lies in being the beginning of the algal biomass study as a source of biogas fuel production, since with the results obtained and mentioned above, the next step is to continue with the development of a larger-scale biodigester with the incorporation of thermal and / or photovoltaic solar energy.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE IMÁGENES	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 FORMULACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.	18
1.1.1 Antecedentes.....	18
1.1.1.1 Cultivo y extracción de algas en Chile.	18
1.1.1.2 Uso de ERNC.....	19
1.1.2 Problemática.	19
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	21
1.4 ESTADO DEL ARTE.	21
1.4.1 Estudios sobre biocombustibles en base a biomasa algal.	21
1.4.2 Desarrollo de la utilización de energía solar en biodigestores.	23
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.	29
2.1 DIGESTIÓN ANAEROBIA.....	29
2.1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia.....	30
2.1.2 Parámetros que afectan la digestión anaerobia.....	32
2.1.2.1 Nutrientes.....	32
2.1.2.2 Temperatura.....	33
2.1.2.3 pH.	33
2.1.2.4 Contenido de sólidos.....	34
2.1.2.5 Tiempo de retención.	34
2.1.2.6 Inhibidores.....	34
2.1.2.7 Agitación.	35
2.2 BIOMASA.	35

2.2.1	<i>Clasificación de la biomasa.</i>	35
2.2.2	<i>Características energéticas de la biomasa.</i>	37
2.2.2.1	Composición química	37
2.2.2.2	Contenido de humedad	37
2.2.2.3	Porcentaje de cenizas	38
2.2.2.4	Poder calorífico	38
2.2.2.5	Densidad aparente	38
2.2.3	<i>Hidrocarburos obtenidos de la biomasa.</i>	39
2.3	MEZCLAS DE COMBUSTIBLES.	41
2.3.1	<i>El Biodiesel.</i>	41
2.3.2	<i>Mezcla etanol-gasolina.</i>	41
2.3.3	<i>Mezcla biogás-gas natural.</i>	42
2.4	INTERCAMBIABILIDAD DE GASES.	42
2.4.1	<i>Índice de Wobbe.</i>	43
2.5	MEDICIÓN DEL PODER CALORÍFICO.	44
2.5.1	<i>Método analítico.</i>	44
2.5.2	<i>Método práctico.</i>	45
2.6	BIOCOMBUSTIBLES.	47
2.6.1	<i>Clasificación de los biocombustibles según su generación.</i>	47
2.6.2	<i>Clasificación de los biocombustible según su estado.</i>	48
2.6.2.1	Biocombustibles sólidos	48
2.6.2.2	Biocombustibles líquidos	49
2.6.2.3	Biocombustibles gaseosos	49
2.7	EL BIOGÁS.	49
2.8	TIPOS DE BIODIGESTORES ANAEROBIOS.	50
2.8.1	<i>Biodigestores sin retención de masa.</i>	50
2.8.1.1	Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación	50
2.8.1.2	Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación o reactor anaerobio de contacto	50
2.8.1.3	Digestor de flujo pistón	51
2.8.1.4	Digestor discontinuo	51
2.8.2	<i>Biodigestores con retención de masa</i>	52
2.8.2.1	Filtros anaerobios y lecho fijo	52
2.8.2.2	Reactores de lechos de lodos y lecho fluidizado	53
3.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.	54
3.1	<i>Biomásas.</i>	54
3.1.1	<i>RILES.</i>	55
3.2	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS.	56

3.3	ENSAYO DE BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA.	64
3.3.1	<i>Potencial Biometanogénico del Sustrato (alga + heces)</i>	65
3.3.1.1	Ensayo BMP botella invertida.	65
3.3.1.2	Ensayo de BMP frasco Serum con sello hermético.	68
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	73
4.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL.	73
4.2	RESULTADOS BMP ENSAYO DE BOTELLA INVERTIDA.	74
4.3	RESULTADOS BMP CON FRASCOS SERUM SIN TRATAMIENTO PREVIO.	78
4.4	RESULTADOS BMP CON FRASCOS SERUM CON TRATAMIENTO PREVIO.....	82
4.5	RESULTADOS CROMATOGRAFÍA DE GASES.....	86
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	89
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
6.1	CONCLUSIONES.....	95
6.2	RECOMENDACIONES.	96
7.	TRABAJOS FUTUROS.....	97
8.	REFERENCIAS.....	98
9.	ANEXOS	101
9.1	ANEXO 1: FUNCIONAMIENTO DE BIODIGESTOR PROPUESTO POR ALEJANDRO GALIZIA.	101
9.2	ANEXO 2: PROCEDIMIENTOS LABORATORIO DE RILES, UTFSM, CASA CENTRAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SÓLIDOS.....	103
9.3	ANEXO 3: PROCEDIMIENTOS LABORATORIO DE RILES, UTFSM CASA CENTRAL PARA LA MEDICIÓN DE DQO.	108
9.4	ANEXO 4: PROCEDIMIENTO LABORATORIO DE RILES UTFSM, CASA CENTRAL PARA LA MEDICIÓN DE PH.	111
9.5	ANEXO 5: PROCEDIMIENTO LABORATORIO DE RILES, UTFSM CASA CENTRAL PARA LA DETERMINACIÓN DE NITRITOS.	112
9.6	ANEXO 6: PROCEDIMIENTO LABORATORIO DE RILES, UTFSM CASA CENTRAL PARA LA DETERMINACIÓN DE FOSFATOS.....	115
9.7	ANEXO 7: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO DE BMP, LABORATORIO DE RILES, UTFSM CASA CENTRAL.....	119

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1: Esquema general de disposición del sistema del biodigestor (Fuente: México Patente nº WO 2013/089544 Al, 2013).....	23
Ilustración 2: Esquema del interior del biodigestor (Fuente: México Patente nº WO 2013/089544 Al, 2013).	24
Ilustración 3: Esquema del proceso BARC (Fuente: Burgos, 2013).....	26
Ilustración 4: Vista de planta del Natural S4 Loop (Fuente: Burgos, 2013).	28
Ilustración 5: Vista de derecha del Natural S4 Loop (Fuente: Burgos, 2013).....	28
Ilustración 6: Aplicaciones y productos del proceso de digestión anaerobia. (Fuente: CIEMAT, s.f).....	29
Ilustración 7: Etapas de la digestión anaerobia (Fuente: (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar))	30
Ilustración 8: Origen de la biomasa (Fuente: (EBA, s.f.)).....	35
Ilustración 9: Clasificación de biomasa disponible en Chile. (Fuente: Garay, 2011)	36
Ilustración 10: Biodigestores sin retención interior de biomasa, izquierda: Sin recirculación y derecha: con recirculación. (Fuente: de Lucas & del Peso, 2012)	50
Ilustración 11: Reactor sin retención de masa, digestor de flujo pistón. (Fuente IDAE 2007)	51
Ilustración 12: Reactor sin retención de masa, digestor de flujo discontinuo. (Fuente IDAE 2007)	52
Ilustración 13: Biodigestores con retención interior de biomasa, a) lecho fijo y b) filtro anaerobio. (Fuente IDAE 2007).....	53
Ilustración 14: Biodigestores con retención interior de biomasa, c) reactor de lecho de lodo granular y d) lecho fluidizado. (Fuente IDAE 2007)	53
Ilustración 15: Biomasa algal, <i>Durvillae</i> antártica (Fuente: Elaboración propia)	54
Ilustración 16: Primera dilución biomasa algal	55
Ilustración 17: Segunda dilución biomasa algal	56
Ilustración 18: Medición de pH (Fuente: Elaboración propia).....	57
Ilustración 19: Secado de muestra en estufa (Fuente: Elaboración propia).....	58
Ilustración 20: Filtrado de muestra con bomba de vacío (Fuente: Elaboración propia).....	59
Ilustración 21: Papel filtro en el crisol (Fuente: Elaboración propia)	60
Ilustración 22: Mufla (Fuente: Elaboración propia)	60

Ilustración 23: Tubos de DQO con las soluciones catalíticas y digestoras y con la muestra de RIL (Fuente: Elaboración propia).....	63
Ilustración 24: Digestión de las muestras de DQO (Fuente: Elaboración propia)	63
Ilustración 25: Esquema de equipos para ensayo de biodegradabilidad (Fuente: Guerrero, 2014)	66
Ilustración 26: Montaje de mini reactores ensayo botella invertida. (Fuente: Elaboración propia).....	68
Ilustración 27: Frasco Serum (Fuente: Guerrero, 2014).....	69
Ilustración 28: Medición de presión a mezclas en frascos Serum (Fuente: Elaboración propia)	70
Ilustración 29: Cromatógrafo de gases, UTFSM Campus San Joaquín (Fuente: Elaboración propia).....	71
Ilustración 30: Volumen de biogás producido en botellas ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)	76
Ilustración 31: Presión acumulada en botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	79
Ilustración 32: Volumen de biogás generado durante el ensayo de BMP frascos Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	80
Ilustración 33: Presión acumulada en botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	84
Ilustración 34: Volumen de biogás generado durante el ensayo de BMP frascos Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	84
Figura 35: Esquema ensayo BMP.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rangos de temperaturas en las que trabajan las bacterias anaeróbicas (Fuente: Elaboración propia en base a (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar) y (Montalvo & Guerrero))	33
Tabla 2: Densidades aparentes para distintos combustibles (Fuente: Elaboración propia)....	39
Tabla 3: Procesos y subproductos de la transformación de la biomasa en energía. (Fuente: Elaboración propia).....	40
Tabla 4: Metodología de caracterización (Fuente: Elaboración propia)	56
Tabla 5: Caracterización inicial de cada biomasa (Fuente: Elaboración propia)	73
Tabla 6: Nutrientes en cada biomasa (Fuente: Elaboración propia)	74
Tabla 7: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas de 250 [ml]. Ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)	74
Tabla 8: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas 500 [ml], ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)	75
Tabla 9: Volumen de metano generado en ensayo BMP ensayo botella invertida (Fuente: Elaboración propia).....	76
Tabla 10: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)	77
Tabla 11: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia).....	77
Tabla 12: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP Frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	78
Tabla 13: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	78
Tabla 14: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo de BMP sin tratamiento previo.	81
Tabla 15: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	81
Tabla 16: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: Elaboración propia)	82
Tabla 17: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP Frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	82

Tabla 18: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia).....	83
Tabla 19: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo de BMP con tratamiento previo.	85
Tabla 20: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)	85
Tabla 21: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: Elaboración propia)	86
Tabla 22: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras sin tratamiento previo	86
Tabla 23: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras con tratamiento previo	87
Tabla 24: Volumen de metano generado al finalizar el ensayo de BMP con frascos Serum (Fuente: Elaboración propia)	88
Tabla 25: Valores de peso molecular y LHV para cada compuesto en el biogás obtenido. ([1] Se consideró el peso molecular de aire seco. Fuente: Elaboración propia.)	92
Tabla 26: Valores de LHV para cada muestra de la experimentación (Fuente: Elaboración propia).....	93
Tabla 27: Valores de LHV de combustibles más utilizados (Fuente: ACR Latinoamérica)..	93
Tabla 28: Valores para índice de Wobbe de las muestras realizadas en la experimentación (Fuente: Elaboración propia)	94

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ABREVIATURAS

FAO:	Food and Agriculture Organization.
ICYT:	Instituto de Información y Documentación sobre Ciencia y Tecnología.
SERNAPESCA:	Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura.
USD:	United States Dollars.
SEN:	Sistema Eléctrico Nacional.
MW:	Mega Watt.
SIC:	Sistema Interconectado Central.
SING:	Sistema Interconectado del Norte Grande.
ERNC:	Energía Renovable No Convencional.
DIQA:	Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.
CIEMAT:	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
DQO:	Demanda Química de Oxígeno.
PCI:	Poder Calorífico Inferior.
PCS:	Poder Calorífico Superior.
IW:	Índice de Wobbe.
ASTM:	American Society of Testing Materials.
RMC:	Reactor de Mezcla Completa.
UASB:	Up-flow Anaerobic Sludge Blanket.
RIL:	Residuo Industrial Líquido.
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
BMP:	Biochemical Methane Potential

UTFSM: Universidad Técnica Federico Santa María.

NOMENCLATURA DE FORMULAS QUÍMICAS

CH_4 : Metano

CO_2 : Dióxido de carbono

H_2 : Hidrógeno

H_2S : Ácido sulfhídrico

N: Nitrógeno

P: Fósforo

K: Potasio

Ca: Calcio

O_2 : Oxígeno

C: Carbono

S: Azufre

H_2O : Agua

H_2SO_4 : Ácido sulfúrico

$K_2Cr_2O_7$: Dicromato de potasio

$AgSO_4$: Sulfato de plata

$HgSO_4$: Sulfato mercurico

CAPÍTULO 1

1. Introducción.

La ficología es la ciencia dedicada al estudio de algas, seres vivos que tienen una estructura simple, conformada por un talo, tallo y hojas o tejidos vasculares. Las algas están constituidas por células eucariotas, es decir con núcleo, y se pueden clasificar en unicelulares o pluricelulares. Poseen una serie de características: la mayoría tienen pared celular, viven generalmente en el agua, pueden ser pardas, rojas o verdes, pero sin duda, lo fundamental de estos organismos y que en este estudio cobra relevancia es que son autótrofos y fotoautótrofos, lo primero hace referencia a que generan materia orgánica a partir de materia inorgánica utilizando energía proveniente de la fotosíntesis que se desarrolla de manera oxigénica, por lo que se obtiene oxígeno como subproducto de este proceso; lo segundo quiere decir que, a partir de la luz solar obtienen carbono orgánico para su metabolismo.

A lo largo de la historia, esta especie marina ha convivido y ha sido explotada por los seres humanos. Su utilización que, en primera instancia, fue exclusivamente como alimento, se remonta al siglo IV en Japón y al VI en China, siendo actualmente estos dos países y la República de Corea los mayores consumidores de algas como alimento a nivel mundial (FAO, 2004). Sin embargo, la humanidad se encuentra inserto en un proceso de globalización, por lo que, la demanda de algas marinas se ha expandido a otras partes del mundo, como, por ejemplo, Sudamérica, incluido Chile.

En el contexto nacional, los organismos más utilizados como algas comestibles son: *Durvillaea* antártica (cochayuyo), *Chondracanthus chamissoi* (Chicoria de Mar), *Porphyra* spp (Luche *Pyropia* spp), *Callophyllis variegata* y *Ulva* spp (Lechuguilla) (ICYT, 2014), a partir de estos tipos de especies de algas, se puede obtener un compuesto químico de gran impacto comercial, el agar, que es un ficocoloide, adquirido mediante un complejo proceso de tratamiento industrial, el cual consiste en recolección, alcalinización, lavado y blanqueo, filtrado y gelificación, secado, triturado y control de calidad. Lo obtenido de este

procesamiento es utilizado para fabricar alimentos, medicamentos, cosméticos, insumos médicos e incluso herramientas (AQUAE FUNDACIÓN; WIKI EXPLORA, s/f) .

Por otra parte, según un estudio realizado por SERNAPESCA en la III y IV región, en el año 2017, la cuota de extracción del alga parda de mayor importancia, cobertura y biomasa del país, llamada *Lessonia trabeculata*, (conocida comúnmente como huiro palo), fue de 14.413 toneladas, y la de captura fue de 15.656 toneladas anuales, dando como resultado un consumo aproximado del 108% (SERNAPESCA, 2017). A partir de esto, se infiere la existencia de un vasto recurso marino de algas, por lo que se refleja la factibilidad de modificar el tipo extracción que se realiza actualmente la cual es netamente artesanal, por una industria de cultivo a mayor escala, utilizando el alga como, por ejemplo, en la producción de estimulantes de crecimiento en la agricultura, biomedicina o **biocombustibles**.

Por lo tanto, las algas son utilizadas de diversas maneras, incluyendo su uso como agente gelificante y coloide para la industria de alimentos, farmacéutica y cosmética, además de su uso como fertilizantes y tratamiento de aguas residuales, por consiguiente, las industrias de las algas marinas tienen un potencial comercial significativo, variado y con alta proyección de crecimiento.

Pero, ¿Qué ocurre con los desechos generados por estas industrias? ¿Se puede generar otro producto a partir del cultivo de algas marinas diferentes a los mencionados con anterioridad? Para dar respuesta a estas preguntas, se utilizará el macro alga *Durvillaea* Antártica, comúnmente conocida como Cochayuyo, utilizada principalmente como: consumo alimenticio directo, producción de alginatos, biomedicina constituyendo una gran fuente de ácidos grasos y biofertilizante (Mansilla, 2017), pero existe una propiedad de este organismo que no se encuentra estudiado a fondo, que consiste en evaluar su potencial metanogénico, por lo que la finalidad de este trabajo de título consiste en la primera etapa del estudio de metanogénesis solar, el cual consiste en caracterizar la macro alga mencionada con anterioridad y analizar el biogás generado en condiciones de laboratorio a micro escala.

1.1 Formulación de la problemática.

1.1.1 Antecedentes.

1.1.1.1 Cultivo y extracción de algas en Chile.

Según un informe de la FAO en el año 2016 la producción mundial de algas marinas y otras especies de plantas acuáticas llegó a los 30,1 millones de toneladas anuales, equivalentes a 11.700 millones de USD (FAO, 2018) para satisfacer la demanda de las industrias que las utilizan para consumo directo, elaboración de nuevos alimentos, uso farmacéutico y cosmético, y en un menor porcentaje como biocombustible. Específicamente en China que es considerado el país con mayor cultivo de algas en el mundo, en el año 2010 obtuvo 7 millones de toneladas de cultivo y 250.000 toneladas de extracción (FAO, 2018)

Considerando lo anterior a nivel nacional, la producción de cultivo es considerablemente menor respecto a China y a la tendencia mundial, esto quede en evidencia en el informe sectorial de la subsecretaría de pesca y acuicultura, de agosto del 2018, donde las cosechas acumuladas del sector acuícola al mes de julio del mismo año fueron de 766 mil toneladas, en donde un 1,4% corresponden a algas de cultivo, es decir 10.724 toneladas, mientras que los recolectores de orilla lograron una cosecha de extracción de 100.100 toneladas de algas (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, 2018). Esto deja entre ver que, a pesar de la amplia zona costera de Chile, no logra el máximo provecho de este recurso, a pesar de que la extracción de la esta especie es potencialmente creciente, su cuota de cultivo es baja, por lo que disminuye su oferta frente a la gran demanda mundial.

El cultivo de algas es una práctica que se realiza en Chile desde los años 70, principalmente por pescadores artesanales, ya que constituye su recurso básico de sustento. Por otra parte, se encuentra la industria del cultivo de algas, concentradas en la región de Los Lagos destinadas al cultivo de *Gracilaria chilensis* mayoritariamente.

En Chile se contabilizan 161 especies de algas, donde sólo el 16% se le otorga un valor comercial. La *Durvillae* Antártica es destinada principalmente al consumo local, no alcanzando a figurar con un porcentaje de consideración dentro de las estadísticas que hacen relación con la extracción de algas.

1.1.1.2 Uso de ERNC.

Al mes de diciembre del 2018, el sistema eléctrico nacional (SEN) posee una potencia instalada de generación de 24.586,5 MW, que corresponden a más del 99% de la capacidad instalada nacional, de la cual, el 46,4 % corresponde a tecnologías de generación en base a recursos renovables y el 53,6% a centrales termoeléctricas a gas natural, carbón o derivados del petróleo (Asociación de Generadoras de Chile, 2019). A finales de diciembre del 2018, la capacidad instalada de biomasa es de 446,5 MW aproximadamente, correspondientes al 1,8% de la capacidad instalada total a nivel nacional (Asociación de Generadoras de Chile, 2019).

Chile no posee grandes yacimientos de combustibles fósiles, por lo que el en su mayoría tiene que ser importado, esto provoca que el valor comercial finalmente dependa mucho de factores externos al país.

La ley 20.257, promulgada el año 2008, ha favorecido el aumento de la utilización de ERNC debido a que obliga a las empresas generadoras en el Sistema Interconectado Central (SIC) y en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) acreditar que un 10% de sus contratos afectos provengan de ERNC, porcentaje que irá en aumento gradual hasta el año 2024.

1.1.2 Problemática.

Con la incorporación de nuevas tecnologías las empresas han visto aumentado sus niveles de producción, a partir de lo cual surgen dos problemas, en primer lugar, el aumento de la demanda energética del país y, en segundo lugar, el aumento de desechos que no son aprovechados y que contribuyen a producir contaminación.

A nivel país, en la industria del cultivo de algas marinas, la mayor parte de la materia prima se exporta al extranjero y la otra se utiliza como alimento para la población. La utilización de esta biomasa o de sus desechos industriales para fines energéticos es nulo. El desafío consiste en darle un valor agregado a esta biomasa.

Entonces, ¿Por qué utilizar un tipo de macro-alga como biomasa para realizar esta investigación? El principal motivo es que, al usar un organismo de origen acuático, se evita el cultivo en tierra que posterior a la cosecha provoca que los suelos terrestres se vayan degradando y perdiendo propiedades, además de considerar la actual escases de agua que afecta a zonas del territorio nacional. Otro punto importante es el tiempo que toma el proceso desde la cosecha hasta la extracción, lo que implica que para generar una cierta cantidad de biomasa se tengan que destinar un mayor espacio físico para el cultivo.

De este modo, el uso de una macro-alga podría resultar ventajoso, ya que al realizar cultivos en zonas costeras aportaría oxígeno a la atmosfera, contribuiría a la biodiversidad en los océanos, además de considerar que este tipo de cultivo es 5 a 10 veces más productivo que una cosecha terrestre, lo cual implica que la zona de producción sea de menor dimensión para generar la misma cantidad de biomasa (Fernández Rey, s.f).

Es importante señalar que el biogás y el biodiesel, si lo comparamos con el uso de combustibles fósiles convencionales poseen una menor calidad, pero si lo aplicamos a algún proceso en específicos se puede reducir el consumo de estos últimos.

La problemática que aborda esta investigación radica en la manera de sustituir los suelos destinados a cultivos exclusivos para alimento en cultivos de biomasa y a partir de esta producción generar biocombustible, sin dejar de lado la seguridad y abastecimiento alimenticio del país, considerando que la demanda en base a este uso va en aumento, lo que se convierte en una buena oportunidad de comercialización para hacer crecer este sector de la industria, ya que por un lado garantiza la seguridad alimentaria recién mencionada y los desechos de estas mismas pueden utilizarse como un recurso energético.

1.2 Objetivo general.

- El presente trabajo tiene como objetivo general determinar el potencial metanogénico de una especie biomasa algal endémica de Valparaíso para un posterior estudio de escalamiento para metanización en un biodigestor solar térmico.

1.3 Objetivos específicos.

- Identificar las variables y aspectos tecnológicos que afectan el proceso de metanización.
- Caracterizar la biomasa de la macroalga *Durvillaea antártica*, definiendo en términos generales sus propiedades metabólicas, morfológicas y taxonómicas en el Laboratorio de Microbiología del DIQA.
- Implementar un sistema de biodigestión controlada en el Laboratorio de Riles, DIQA, para monitorear el proceso de metanización a micro escala sin aporte de energía solar térmica.

1.4 Estado del arte.

1.4.1 Estudios sobre biocombustibles en base a biomasa algal.

Existen diversos estudios a lo largo del mundo que abordan el uso de biomasa algal para generar biocombustible y, aunque estos son recientes, hay algunos que son interesantes de mencionar y que pueden servir a modo de orientación para este trabajo de títulos y posteriores.

I. Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp.

Este estudio corresponde a una tesis doctoral del autor Juan Luis Ramos Suarez perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid del año 2010.

El autor plantea la posibilidad de generar biogás a partir de una especie de micro-alga la cual se somete a un proceso de digestión anaerobia. Los resultados obtenidos de esta investigación no son favorables puesto que los volúmenes de producción de metano son bajos.

El autor señala que el rendimiento de producción de biogás de esta biomasa puede mejorar añadiéndole pretratamientos previos que aumenten la biodegradabilidad o se realice una co-digestión con otro sustrato.

II. Producción de biodiesel a partir de micro-algas.

A través de su tesis de grado de ingeniería industrial, el autor Pablo Zarini del Instituto Tecnológico de Buenos Aires, pudo recopilar datos, principalmente de porcentaje de lípidos, de diversas especies de micro-algas.

Acá destacan las especies *Chlorella Vulgaris*, *Nannochloropsis sp* (marina) y *Neochloris oleoabundans* (dulce acuífera), elegidas para la obtención de biodiesel por destacarse por su alta productividad en biomasa y alto contenido en lípidos. Cabe señalar que actualmente grupos de investigación están trabajando en líneas de estudio para generar cepas genéticamente mejoradas y así producir especies de mejor rendimiento de generación de biodiesel.

III. Situación de estudio en Chile.

Chile no se queda atrás en este tipo de estudios, ya que a través del trabajo de título de Pamela Alejandra Cardenas Ojeda, de la Universidad de Magallanes, se estudiaron los parámetros de crecimiento de micro-algas en territorio antártico para una posterior generación de biodiesel. Acá las conclusiones más importantes son la importancia de la luz, la temperatura y la adaptación de cada especie en su crecimiento para una posterior evaluación de cultivo.

Existe otro estudio perteneciente a Pablo Julián Osorio Campusano de la Universidad de Chile en el año 2008, el cual trata de un estudio técnico económico para la producción de biodiesel a partir de algas, en el cual la conclusión que más se destaca es la factibilidad técnica por sobre la económica, puesto que Chile tiene las condiciones territoriales y climáticas para el cultivo de algas marinas a gran escala pero la producción de biodiesel resulta tener un costo considerablemente mayor que el precio de venta del petróleo diésel para ese año.

1.4.2 Desarrollo de la utilización de energía solar en biodigestores.

Invención Sistema de Producción de Biogás propuesto por Alejandro Garza Galicia.

Consiste en un sistema de producción de biogás a baja escala, para granjas, ranchos y todas aquellas instalaciones donde se generen desechos de origen animal, que comprende un biodigestor para producir biogás a partir de estos, un drenador que recibe el residuo orgánico procesado, una fuente de calor para calentar los residuos para generar el biogás, un filtro para eliminar las impurezas de este último, un tanque de almacenamiento y un generador de energía eléctrica. El sistema es de fácil instalación, ampliación y transporte, donde el biogás generado puede utilizarse para usos de estufas, calentadores de agua y generadores de energía eléctrica.

Esta invención presenta un serpentín dentro del biodigestor que está conectado a un calentador solar, que suministra agua caliente para la regulación de la temperatura durante la reacción y el drenaje del residuo se realiza a través de un tubo por gravedad (México Patente n° WO 2013/089544 A1, 2013).

La **ilustración 1** muestra el esquema general del sistema de producción de biogás y la **ilustración 2** muestra las partes del digestor, extraídas directamente de la patente del autor:

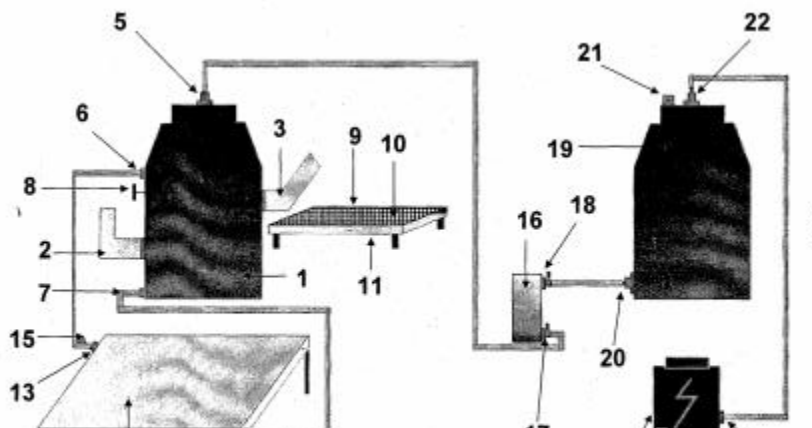


Ilustración 1: Esquema general de disposición del sistema del biodigestor (Fuente: México Patente n° WO 2013/089544 A1, 2013).

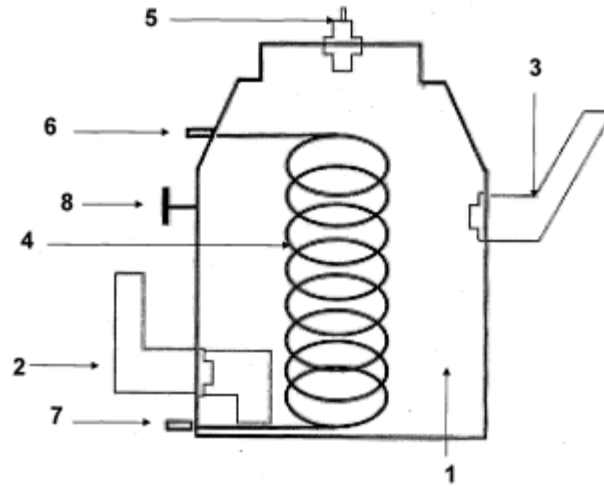


Ilustración 2: Esquema del interior del biodigestor (Fuente: México Patente n° WO 2013/089544 Al, 2013).

A continuación se procede a enumerar el listado de partes:

- | | |
|---|--|
| 1. Biodigestor | 12. Fuente de calor |
| 2. Tubo de entrada | 13. Tubería de salida de la fuente de calor |
| 3. Tubo de descarga | 14. Tubería de entrada de la fuente de calor |
| 4. Serpentín | 15. Válvula de paso |
| 5. Brida de descarga | 16. Filtro |
| 6. Inyector de corriente de agua caliente | 17. Inyector de filtro |
| 7. Descarga de corriente de agua tibia | 18. Descarga del filtro |
| 8. Medidor de temperatura | 19. Tanque de almacenamiento |
| 9. Drenador | 20. Tubería de entrada al tanque de almacenamiento |
| 10. Malla de drenador | |
| 11. Colador poroso | |

21. Válvula de alivio

23. Generador de energía eléctrica

22. Tubería de descarga del tanque de
almacenamiento

24. Inyector de biogás

El funcionamiento de este biodigestor se encuentra detallado en la patente en el anexo 1.

Diseño de baja tecnología BARC.

Desarrollado por Bhabha Atomic Research Institute, Mumbai. Es un sistema de dos etapas continuo y de vía húmeda donde el sustrato se hidroliza en una primera etapa y en una segunda se genera el metano. El reactor es construido en el subsuelo, reduciendo los costos de construcción.

La planta BARC (**Ilustración 3**), funciona con residuos de cocina pre-tratados (mezclados con agua calentada por energía solar y triturados) y se introducen discontinuamente en el pre-digestor aeróbico termofílico. El efluente de dicho pre-digestor es la alimentación del reactor de metano donde se genera el biogás. El efluente del reactor de metano se recolecta en unos tanques provistos de filtros de arena, y el exceso de agua se reutiliza en el proceso (Burgos, 2013).

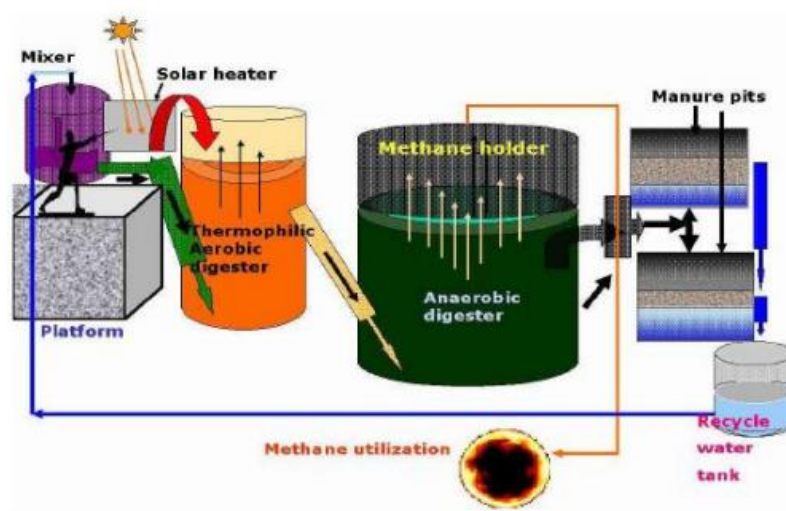


Ilustración 3: Esquema del proceso BARC (Fuente: Burgos, 2013)

Biodigestor Natural S4 LOOP

Este biodigestor se caracteriza por implementar tecnologías de bajo costo. Consiste en un sistema de digestión anaeróbica para tratar residuos sólidos orgánicos implementado y construido en Bolivia.

Este biodigestor recibe su nombre por sus características más significativas de funcionamiento. Natural por su funcionamiento pasivo sin la utilización de energía eléctrica, S4 por cuatro términos que resumen su funcionamiento; “submersion” (sumersión), “scum” (costra), “solar” y “slurry” (efluente) y finalmente LOOP por el término en inglés referido a la recirculación (Burgos, 2013).

Calefacción solar pasiva

La temperatura dentro del reactor es un factor muy importante a tener en cuenta en el proceso de digestión anaerobia. El aumento de la temperatura dentro del reactor se lleva a cabo de tres maneras diferentes: la ganancia solar, el aislamiento con el suelo y la recirculación.

Para conseguir el aumento de temperatura por ganancia solar es muy importante el lugar del biodigestor donde incide el sol, ya que el aumento de temperatura por ganancia solar a través del gas es ineficiente.

El aislamiento con el suelo es muy importante para obtener un aumento de temperatura en el reactor. Teniendo en cuenta que está semi enterrado, la influencia de la temperatura del suelo en el líquido del biodigestor es muy importante.

La última forma para aumentar la temperatura dentro del biodigestor se realiza con la recirculación de lodo digerido que previamente se calienta en el depósito de recirculación, debido a la radiación solar que incide sobre la cubierta del mismo.

Diseño y funcionamiento

El Natural S4 Loop es un biodigestor de carga continua con flujo pistón y un sistema de recirculación. La planta completa consta de un reactor anaerobio, un sistema de recirculación de efluente, y un depósito de vaciado.

Las **ilustraciones 6 y 7** muestran las vistas de planta y derecha del complejo respectivamente.

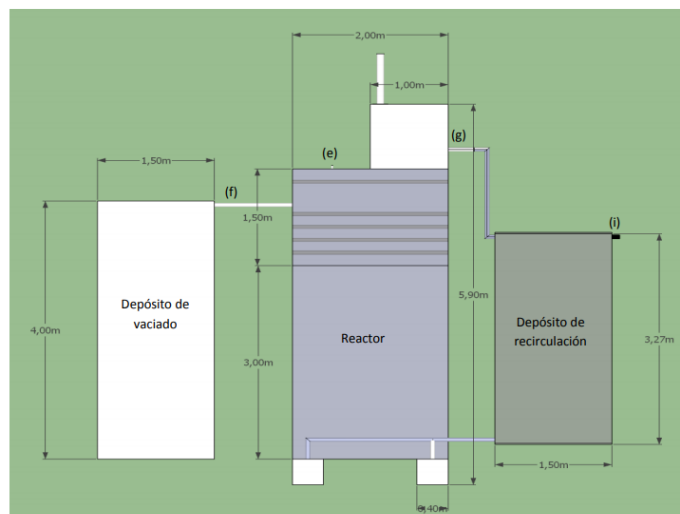


Ilustración 4: Vista de planta del Natural S4 Loop (Fuente: Burgos, 2013).

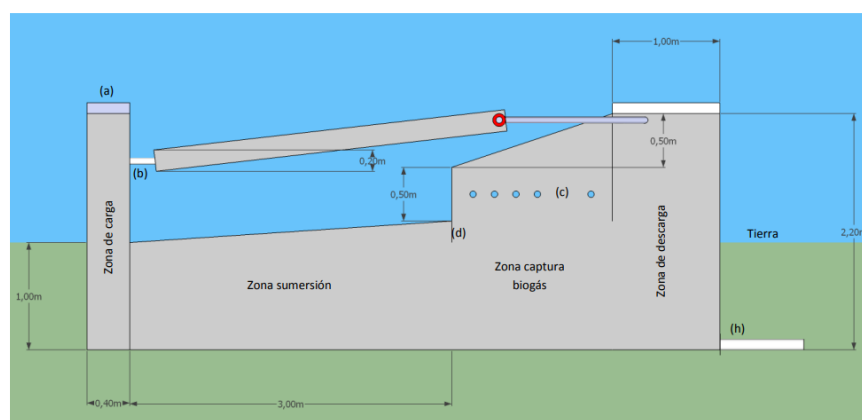


Ilustración 5: Vista de derecha del Natural S4 Loop (Fuente: Burgos, 2013).

CAPÍTULO 2

2. Fundamento teórico.

2.1 Digestión Anaerobia.

Se define como un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos (desde ahora biogás) como CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , entre otros, y en digestato, que es una mezcla de productos minerales como el N, P, K, Ca y otros compuestos de difícil degradación (IDAE, 2007).

El biogás contiene un alto porcentaje en CH_4 , (entre 50-70%), por lo que es susceptible de un aprovechamiento energético mediante su combustión en motores, en turbinas o en calderas, bien sólo o mezclado con otro combustible.

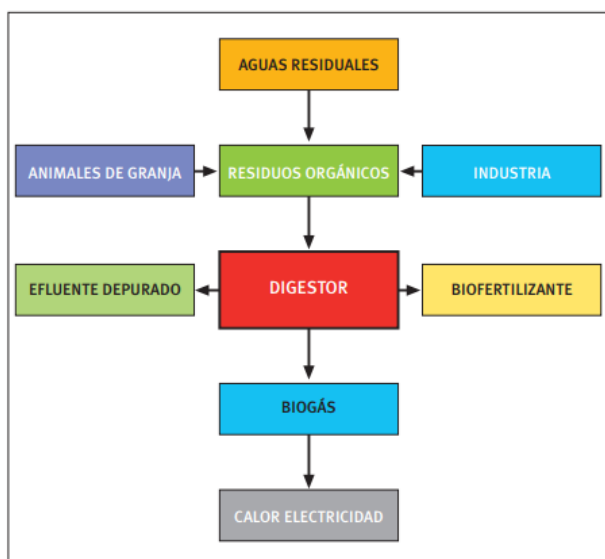


Ilustración 6: Aplicaciones y productos del proceso de digestión anaerobia. (Fuente: CIEMAT, s.f)

.El proceso de digestión anaerobia ocurre normalmente en la naturaleza, siendo los nichos de estos procesos el fondo de los ríos, los lagos y el mar, las ciénagas y el tracto intestinal de prácticamente todos los animales (Montalvo & Guerrero).

Este proceso también se emplea en el tratamiento de residuos sólidos o líquidos cuando la concentración de materia orgánica es tan elevada que no resulta económico el tratamiento aerobio.

2.1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia.

En la fermentación anaeróbica de la materia orgánica se pueden distinguir 4 etapas en las que intervienen distintos tipos de bacterias: **hidrólisis**, **acidogénesis**, **acetogénesis**, y **metanogénesis** (Ilustración 7).

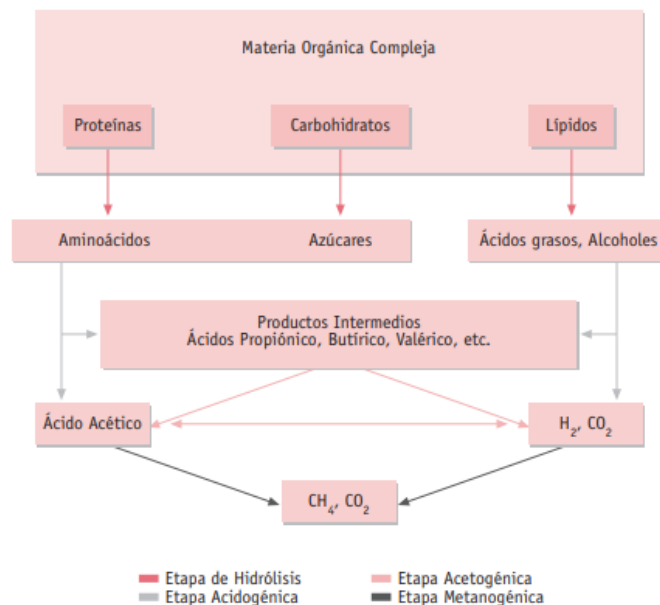


Ilustración 7: Etapas de la digestión anaerobia (Fuente: (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar)

Etapa de hidrólisis

Primer paso para la degradación de materia orgánica compleja. Las bacterias hidrolíticas actúan sobre las macromoléculas orgánicas despolimerizándolas enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos. Así, los lípidos son degradados por enzimas hidrolíticas (lipasas) a ácidos grasos de cadena larga y glicerina. Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosas, péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos.

Etapa acidogénica

Los compuestos solubles obtenidos anteriormente son transformados por las bacterias acidogénicas en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono. Los ácidos grasos volátiles son principalmente ácido acético, propiónico, butírico y valérico. En esta etapa se debe controlar la cantidad de hidrógeno, porque el metabolismo de las bacterias acidogénicas depende de él.

Etapa acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación (hidrógeno y ácido acético) pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, los productos intermedios (ácido propiónico, butírico, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, a través de las bacterias acetogénicas. Como principales productos se obtienen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que, posteriormente, pueden ser aprovechados por las bacterias metanogénicas. Las bacterias acetogénicas también necesitan un control exhaustivo de la concentración de hidrógeno, ya que con una elevada presión de hidrógeno se reduce la formación de acetato, produciendo preferentemente ácido propiónico, butírico o etanol en vez de metano.

Etapa metanogénica

En la etapa final del proceso, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de este proceso son anaeróbicas estrictas. Se distinguen dos tipos de microorganismos, los que degradan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (bacterias metanogénicas acetoclásicas) y los que reducen el dióxido de carbono con hidrógeno a metano y agua (bacterias metanogénicas hidrogenófilas).

La principal vía de producción de metano es la primera, con alrededor del 70% del metano producido. Este es un proceso lento y constituye la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

2.1.2 Parámetros que afectan la digestión anaerobia.

Existen diversos parámetros físicos y químicos que pueden afectar el proceso de biodigestión. Entre los más importantes se encuentran los nutrientes, temperatura, pH, contenido en sólidos, tiempo de residencia, presencia de compuestos inhibidores del proceso y agitación (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar).

2.1.2.1 Nutrientes.

Además de una fuente de carbono y energía, se necesita la presencia de una serie de nutrientes mineral, tales como el nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, etc. En el medio a digerir debe haber una relación adecuada entre nutrientes para el desarrollo de la flora bacteriana.

La relación carbono/nitrógeno/fósforo (DQO: N: P) debe ser 400:5:1 respectivamente, para tratamientos anaerobios (Aiyuk, Amoako, Raskin, Van Haandel, & Verstraete, 2004), ya que para valores inferiores la velocidad de la reacción puede verse disminuida.

2.1.2.2 Temperatura.

La digestión anaeróbica se puede llevar en un amplio intervalo de temperaturas, pero dependiendo el tipo de bacterias que se utilicen se pueden diferenciar tres intervalos diferentes (**tabla 1**). El intervalo mesofílico es el más utilizado, pese a que el termofílico es donde se tiene la mayor producción de biogás (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar). Esto debido a que las últimas son más sensibles a la variación de temperatura, por lo que se necesitara un mayor control lo que se traduce un costo más elevado, además en dicho intervalo de tiempo se consume más energía de la que produce el biogás resultante.

***Tabla 1:** Rangos de temperaturas en las que trabajan las bacterias anaeróbicas (Fuente: Elaboración propia en base a (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar) y (Montalvo & Guerrero))*

Bacterias	Rango de temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20°C	±2°C/hora
Mesofílicas	Entre 20°C y 45°C	±1°C/hora
Termofílicas	Entre 45°C y 75°C	±0,5°C/hora

La temperatura óptima en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de agua residual, de las condiciones ambientales, etc. No obstante se reconocer, en general, como temperaturas óptimas de las 35°C y 55°C para los tratamientos mesofílicos y termofílicos respectivamente (Montalvo & Guerrero).

2.1.2.3 pH.

En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferentes. El intervalo de pH óptimo de los microorganismos hidrolíticos es entre 7,2 y 7,5, para los acetogénicos entre 7 y 7.2 y para los metanogénicos entre 6.5 y 7.5 (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar).

Se plantea en general que el rango óptimo de pH para la digestión anaerobia es de 6,8 a 7,2 y el valor óptimo 7 (Montalvo & Guerrero). En la práctica se ha visto que al alejarse de este valor la eficiencia del proceso disminuye, aunque se ha comprobado que para valores inferiores a 7, el proceso no se inhibe hasta cierto valor particular.

2.1.2.4 Contenido de sólidos.

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos y con esto se puede ver afectada la eficiencia y la producción de biogás.

2.1.2.5 Tiempo de retención.

Se define como el tiempo que el sustrato está sometido a la acción de los microorganismos en el reactor. Este parámetro solo puede ser claramente definido en los sistemas discontinuos (batch), donde el tiempo de retención coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, como funcionan en condiciones estacionarias, la variable tiempo definida en el reactor discontinuo se reemplazada por el tiempo de residencia, que se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria. El tiempo de residencia indica, por tanto, el tiempo que el sustrato permanece por término medio en el digestor.

Este parámetro está íntimamente ligado con el tipo de sustrato y la temperatura del mismo. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y, consecuentemente, serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

2.1.2.6 Inhibidores.

Existen una gran cantidad de sustancias que pueden inhibir la digestión anaeróbica. Uno es el oxígeno aunque su efecto inhibidor no es permanente, ya que en la flora bacteriana existen microorganismos que irán consumiendo el oxígeno que puede contener el medio. Por otro lado, si la biomasa es rica en nitrógeno, se puede producir un exceso de amoníaco que inhibe el proceso. Otros inhibidores son los metales pesados, que actúan sobre los microorganismos metanogénicos. Además, algunas sustancias orgánicas, como antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones, pueden inhibir el proceso. Por último, una concentración elevada de ácidos volátiles puede producir un efecto inhibidor.

2.1.2.7 Agitación.

Hay diferentes motivos para mantener un grado de agitación adecuado en el medio de digestión: mezclado y homogeneización del sustrato, distribución uniforme de calor para mantener la temperatura homogénea, favorecer la transferencia de gases y evitar la formación de espumas o la sedimentación. La agitación puede ser mecánica o neumática a través del burbujeo de biogás recirculado a la presión adecuada (Cuesta, Martín, Vicente, & Villar). En ningún caso debe ser violenta, ya que podría destruir los agregados de bacterias.

2.2 Biomasa.

La biomasa es la materia orgánica originada de un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizado como fuente de energía sobre la cual se pueden aplicar diversos procesos convirtiéndola en otras formas de energía (Mella, 2016). En la **ilustración 8** se pueden observar los orígenes de la biomasa.

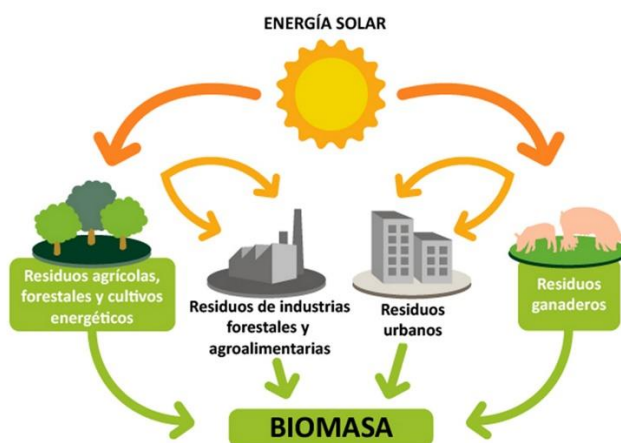


Ilustración 8: Origen de la biomasa (Fuente: (EBA, s.f.))

2.2.1 Clasificación de la biomasa.

La biomasa que se utiliza para fines energéticos puede clasificarse de la siguiente manera (Garay, 2011):

- **Biomasa natural:** corresponde a la que se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana, como por ejemplo, los desechos naturales de un bosque.
- **Biomasa residual seca:** se incluyen en este grupo todos los productos sólidos que no son utilizados en las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, como por ejemplo, el estiércol, la paja, la madera de podas, el aserrín, etc.
- **Biomasa residual húmeda:** son los vertidos denominados biodegradables, como las aguas residuales urbanas industriales y los residuos ganaderos principalmente purines.
- **Cultivos energéticos:** corresponden a los cultivos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustibles. Entre ellos se encuentran el maíz, raps, girasol, etc.

En Chile las principales fuentes de biomasa disponibles para generar biocombustible, son ambos tipos de biomasa residual (seca y húmeda) y su clasificación se muestra en la **ilustración 9:**

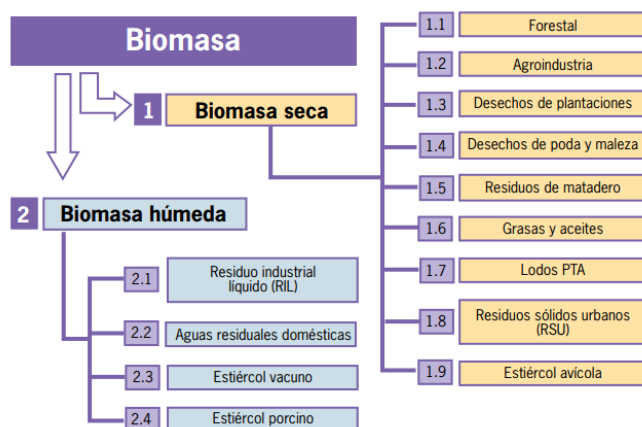


Ilustración 9: Clasificación de biomasa disponible en Chile. (Fuente: Garay, 2011)

2.2.2 Características energéticas de la biomasa.

Para poder realizar una posterior evaluación técnica y económica sobre la conversión de biomasa en energía se deben considerar los siguientes parámetros y condiciones que se detallan a continuación: (de Lucas & del Peso, 2012).

2.2.2.1 Composición química

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en este proceso de combustión formando ceniza o residuos sólidos.

La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como el carbono (C), el hidrógeno (H_2), nitrógeno (N), azufre (S), agua (H_2O) y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O_2), pero este elemento no se determina directamente, si no que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de los elementos más cenizas.

2.2.2.2 Contenido de humedad

También denominada humedad relativa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad de la biomasa puede medirse en base seca (Bs) (2.2.b) o en base húmeda (Bh) (2.2.a), ya que se puede considerar el peso húmedo (W_h) y el peso seco (W_o) (Se evapora el agua presente).

$$Bh = \frac{W_h - W_o}{W_h} \quad (2.2. a)$$

$$Bs = \frac{W_h - W_o}{W_o} \quad (2.2. b)$$

Cuanto menor sea este contenido mejor será el valor calorífico de esa biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema la biomasa, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30% (de Lucas & del Peso, 2012). Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía.

2.2.2.3 Porcentaje de cenizas

Indica la cantidad de materia solida no combustible por kilogramo de materia prima. Conviene que su porcentaje en relación a la materia seca sea lo menor posible.

2.2.2.4 Poder calorífico

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule /Kg). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. De manera más concreta, el poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que verdaderamente se produce en la reacción de combustión, y el inferior (PCI) el que se aprovecha realmente, producido sin utilizar la energía de condensación del agua y otros procesos.

El PCI de un combustible se determina a partir del PCS, con la ecuación (2.2.4), extrayendo el calor latente del agua formada:

$$PCI = PCS - 2,5(9H + H_2O) \quad (2.2.4)$$

Donde:

PCI: Poder calorífico inferior (MJ/Kg)

PCS: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

2,5: Calor de condensación del agua a 0°C (MJ/kg agua)

9: Kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno

H: Tanto por uno de hidrógeno en el combustible

H_2O : Tanto por uno de humedad del combustible

2.2.2.5 Densidad aparente

Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico en que se presenta. Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las

materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte.

La **tabla 2** muestra los valores de densidad aparente para distintos combustibles utilizados comúnmente como fuente energética:

Tabla 2: Densidades aparentes para distintos combustibles (Fuente: Elaboración propia)

Combustible	Densidad aparente [Kg/m ³]
Astilla de madera	250
Aserrín (húmedo)	350
Pellets de madera	650
Leña	380
Carbón (mineral)	720-880
Gasolina	680
Diésel	850
Propano (gas)	1,83
Butano (gas)	2,52
Metano (gas)	0,656

2.2.3 Hidrocarburos obtenidos de la biomasa.

Los hidrocarburos obtenidos van a depender del tipo de biomasa, pero principalmente si se trata de biomasa húmeda o seca, y del proceso de descomposición a la que se someta.

La biomasa con un alto porcentaje de humedad se somete a procesos bioquímicos, como lo es el caso de la digestión anaeróbica, caso en estudio de esta investigación.

La biomasa seca se somete a procesos de termoquímicos y se pueden dividir en 3 principales categorías, combustión, gasificación y pirolisis.

La siguiente tabla muestra el subproducto que se obtiene con una determinada biomasa y sometiéndola a diferentes procesos de degradación (Fernández Rey, s.f):

Tabla 3: Procesos y subproductos de la transformación de la biomasa en energía. (Fuente: Elaboración propia)

Tipo de biomasa	Proceso	Subproductos
Biomasa húmeda (procesos bioquímicos) • Aguas residuales urbanas o de industrias de tipo orgánico • Residuos ganaderos • Algas • Licores residuales	Digestión anaeróbica	Metano + lodos (compost) + CO_2
	Hidrólisis ácida	Por fermentación Alcoholes (etanol) + lodos + proteínas
	Digestión enzimática	
	Digestión aerobia	Compost + humus + CO_2 + H_2O
Biomasa seca (procesos termoquímicos) • Residuos sólidos urbanos. • Residuos forestales y agrícolas.	Destilación destructiva	Coque + metanol + compuestos químicos
	Pirolisis	Aceites pesados y ligeros + gases
	Gasificación	Gas combustible + amoníaco + metanol
	Combustión	Energía térmica (vapor) + cenizas (metales)
	Fermentación, secado y extrusión	Combustible sólido

Podemos observar a partir de la **tabla 3**, para la biomasa algal, aplicándole un proceso digestión anaeróbica, el subproducto principal obtenido es metano.

2.3 Mezclas de combustibles.

2.3.1 El Biodiesel.

El biodiesel es un biocombustible producido a partir de grasa animal y aceites vegetales principalmente. Este combustible líquido biodegradable se compone de ésteres alquílicos de ácidos grasos, ésteres metílicos de ácidos grasos, o ésteres monoalquílicos de cadenas largas. Las biomezclas son mezclas de biodiesel y diésel elaborado a partir de petróleo.

El biodiesel es considerado un buen reemplazo del diésel elaborado a partir de petróleo para su uso en motores de encendido por compresión, ya que emite menos gases dañinos y sulfuro cuando se quema. El biodiesel también es considerado más seguro que su contraparte de origen fósil debido a que no es tóxico y es menos inflamable (tiene un punto de ignición más alto). Aunque el biodiesel contiene aproximadamente 8% menos energía por galón que el diésel de petróleo (petrodiesel), no se ha reportado una diferencia significativa en el desempeño o el ahorro de combustible.

Algunos tipos de biodiesel utilizados en la actualidad son los siguientes (Analytic, s.f.):

1. El B100: es el biodiesel puro (100% biodiesel).
2. El B20: 20% de biodiesel y 80% diésel de petróleo.
3. El B5: 5% de biodiesel y 95% de diésel de petróleo.

La mayoría de los usuarios de biodiesel eligen el B20 porque no presenta los mismos problemas de desempeño en clima frío y de compatibilidad de materiales que tiene el B100.

2.3.2 Mezcla etanol-gasolina.

El bioetanol es un biocarburante que se obtiene mediante la fermentación de especies ricas en azúcares o almidón, por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada, etc.), la remolacha azucarera, la caña de azúcar, el sorgo, la patata u otros cultivos energéticos, así como de los excedentes de alcoholes vínicos.

Así como se puede mezclar gasolina con etanol, también puede realizarse con metano, pero esta última su uso es más limitado debido a que la mezcla resulta ser toxica.

La mezcla entre gasolina y etanol esta denominada por la siguiente nomenclatura EXX, donde XX es un número que señala el porcentaje de etanol en la mezcla.

El más comercializado es el E10, ya que, por ejemplo, en E.E.U.U esta mezcla se puede utilizar directamente en el motor de los vehículos sin necesidad de modificarlos.

Por el contrario las mezclas que contienen un alto porcentaje de alcohol requieren que el motor, el sistema de inyección y otros sistemas del vehículo sean adaptados a las propiedades químicas del alcohol, con mayor atención a sus propiedades corrosivas.

2.3.3 Mezcla biogás-gas natural.

En una tesis de la Universidad Federico Santa María, realizada en el año 2016, se realizó un estudio para el diseño de un sistema de pre-mezcla e inyección de biogás con gas natural, con el fin de obtener un combustible que sea capaz de generar una determinada potencia.

Se tomaron distintas mezclas de biogás-gas natural, en todas ellas el combustible predominante es el biogás. Para los cálculos se tomaron intervalos de 10% a partir de la mezcla 60% biogás – 40% gas natural (Lopez Gajardo, 2016).

El sistema se diseñó para generar una potencia de 1MW de energía eléctrica para posteriormente inyectarlo a un motogenerador.

2.4 Intercambiabilidad de gases.

La intercambiabilidad es la habilidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin que se presente un cambio sensible en la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o el incremento de las emisiones contaminantes (Flórez).

Debido a la diversificación y el incremento de fuentes de gas en el mundo se hace necesario estudiar la intercambiabilidad de gases con el fin de predecir de forma rápida y efectiva el desempeño de los equipos de combustión.

Existen diferentes métodos para determinar la intercambiabilidad de una mezcla de combustible, agrupados principalmente en dos categorías: métodos de índices simples y métodos de índices múltiples, ambos basados generalmente en métodos empíricos. Los índices simples están basados en la entrada de energía y los de índices múltiples incorporan fenómenos fundamentales de la combustión.

2.4.1 Índice de Wobbe.

El índice simple de Wobbe es el más utilizado y fácil de calcular para describir la intercambiabilidad de los gases.

La definición del índice de Wobbe se basa en el poder calorífico y la gravedad específica del gas, y su relación con la entrada de energía al quemador (btu/hr). En 1927, Goffredo Wobbe, observó lo siguiente:

- La entrega de calor desde un quemador, a una presión constante y un tamaño de orificio constante, es proporcional al flujo volumétrico del gas (A mayor tiempo de funcionamiento del quemador, mayor entrega de calor).
- La velocidad de flujo a través de un tamaño de orificio dado, a presión constante, es proporcional a la densidad específica del gas (Ente más liviana es la molécula de un gas, más moléculas pueden pasar a través del diámetro fijo del orificio).
- El poder calorífico de un gas es proporcional a su gravedad específica.

El índice de Wobbe se calcula a partir de la **ecuación 2.4**:

$$IW_s = \frac{PC_s}{\sqrt{GE}} \quad (2.4)$$

Donde:

Ws: Índice de Wobbe Superior.

PCs: El poder calorífico superior.

GE: Densidad relativa del gas.

Análogamente se puede calcular el índice de Wobbe inferior, utilizando la misma fórmula anterior pero utilizando el poder calorífico inferior.

2.5 Medición del poder calorífico.

Como se mencionó con anterioridad el poder calorífico de un combustible puede ser superior (PCS) o inferior (PCI). La medición se puede realizar por dos métodos:

1. Método analítico
2. Método práctico

2.5.1 Método analítico.

Aplica el Principio de Conservación de la Energía, señalando que el poder calorífico de un cuerpo compuesto es igual a la suma de los poderes caloríficos simples que la forman, multiplicados por la cantidad centesimal en que intervienen, descontando la cantidad de hidrógeno total del combustible la que se encuentra ya combinada con el oxígeno del mismo.

A partir de este principio se muestran a continuación distintas formulaciones para el cálculo de PCS y PCI, para combustibles secos o húmedos.

Fórmula de Dulong (para PCS de un combustible seco)

$$PCS = 8.140 \times C + 34.400 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.220 \times S \quad (2.5.1.1)$$

C: Cantidad centesimal de carbono en peso por kilogramo de combustible.

H: Cantidad centesimal de hidrógeno total en peso por kilogramo de combustible.

O: Cantidad centesimal de oxígeno en peso por kilogramo de combustible.

S: Cantidad centesimal de azufre en peso por kilogramo de combustible.

O/8: Cantidad centesimal de hidrógeno en peso que se encuentra combinado con el oxígeno del mismo combustible dando “agua de combinación”

(H-O/8): Cantidad centesimal de “hidrógeno disponible” en peso realmente disponible para que se oxide con el oxígeno del aire, dando “agua de formación”

Fórmula de Dulong (para PCI de un combustible seco)

$$PCI = 8.140 \times C + 29.000 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.220 \times S \quad (2.5.1.2)$$

Fórmula de Dulong (para PCI de un combustible húmedo)

$$PCI = 8.140 \times C + 29.000 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.220 \times S - 600 \times H_2O \quad (2.5.1.3)$$

Fórmula de Hutte (para PCI de un combustible húmedo)

$$PCI = 8.100 \times C + 29.000 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.500 \times S - 600 \times H_2O \quad (2.5.1.4)$$

Fórmula de la Asociación de Ingenieros Alemanes (para PCI de un combustible húmedo)

$$PCI = 8.080 \times C + 29.000 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.500 \times S - 600 \times H_2O$$

2.5.2 Método práctico.

Consiste en el empleo de calorímetros, para así determinar de manera directa el poder calorífico de los combustibles. Este procedimiento está señalado por la norma ASTM 240.

El método consiste en quemar una cierta cantidad de combustible y medir la cantidad de calor producida a través de la energía térmica ganada por un líquido conocido, agua, y donde esta última, dependiendo del método, puede estar contenida en un recipiente o puede recircular continuamente.

El proceso se considera ideal (adiabático) según la **fórmula 2.5.2.1 y el desarrollo de esta en 2.5.2.2.**

$$Q_{comb} = Q_{agua} \quad (2.5.2.1)$$

$$Q_{comb} = m_a \times C_{pa} \times (T_f - T_i) \quad (2.5.2.2)$$

Q_{comb} : Calor generado por la combustión del combustible.

Q_{agua} : Calor absorbido por el agua.

m_a : Masa de agua

C_{pa} : Calor específico del agua

T_f : Temperatura final

T_i : Temperatura al inicio

El calor generado dentro de la bomba calorimétrica (Q) es absorbido por los elementos que rodean a la misma, generando el siguiente balance (fórmula 2.5.2.3) y su desarrollo (fórmula 2.5.2.4):

$$Q = Q_{agua} + Q_{agitador} + Q_{termómetro} + Q_{bomba} + Q_{recipiente} \quad (2.5.2.3)$$

$$Q = \sum_{i=agua}^{j=recipiente} m_i C_{p_i} \Delta T \quad (2.5.2.4)$$

Se puede volver a formular dejando el calor absorbido por el agua fuera de la sumatoria y lo demás como un calor total del aparato de la siguiente manera (2.5.2.4):

$$Q = (m_{agua}Cp_{agua} + E_{aparato})\Delta T \quad (2.5.2.4)$$

El calor liberado por la bomba calorimétrica es el cedido por la combustión del combustible y del alambre (fórmula 2.5.2.5):

$$Q = Q_{combustible} + Q_{alambre} \quad (2.5.2.5)$$

$$Q_{combustible} = (m_{agua}Cp_{agua} + E_{aparato})\Delta T + m_{alambre}Cp_{alambre}$$

Donde:

$m_{alambre}$: Peso del alambre en [Kg]

$Cp_{alambre}$: Calor de fusión del alambre [Kcal/Kg]

Finalmente el PCS se calcula a partir de la formula (2.5.2.6):

$$PCS = \frac{Q_{combustible}}{G_{combustible}} \quad (2.5.2.6)$$

Donde G combustible es el peso de combustible quemado (Kg)

El PCI puede calcularse a partir de **la fórmula 2.5.2.7**:

$$PCI = PCS - 600 \times \frac{G_{agua}}{G_{combustible}} \quad (2.5.2.7)$$

Donde G agua es el peso total del agua existente en kg.

2.6 Biocombustibles.

2.6.1 Clasificación de los biocombustibles según su generación.

En función de la materia prima en que provenga el biocombustible y de los procesos utilizados para su obtención, se realiza una clasificación por generaciones, llegando hasta la cuarta generación (de Lucas & del Peso, 2012).

La primera generación consiste en combustibles obtenidos a partir de cultivos agrícolas alimentarios. Esta generación es la que causa más polémica, ya que al aumentar la demanda suben los precios de los cultivos y provoca la deforestación y degradación de los suelos.

La segunda generación se basa en producir biocombustibles a partir de los residuos y desechos de la industria alimentaria. También se consideran biocombustibles de segunda generación aquellos que se obtienen a partir de cultivos agro-forestales no destinados a la alimentación. En este caso, el problema que plantean es su bajo rendimiento económico ya que la materia prima posee altos contenidos lignocelulósicos de difícil degradación que proporcionan poca eficiencia en su conversión al diésel o al etanol.

Los biocombustibles **de tercera generación** ocupan metodologías de producción similares a los de segunda generación, pero empleando como materia prima cultivos energéticos especialmente diseñados para mejorar la conversión de la biomasa en biocombustible. Estas mejoras o adaptaciones utilizan frecuentemente técnicas de biología molecular, como por ejemplo, el desarrollo de árboles con porcentajes de lignina bajos, que reducirían los costes y mejorarían la producción de etanol, o la modificación del maíz para que contenga celulasas integradas.

Finalmente los biocombustibles de **cuarta generación** buscan la adaptación de la materia prima a mejorar la eficiencia en la captación y almacenamiento de CO_2 . Actualmente no son comerciales, pero se pueden encontrar plantas pilotos en Brasil y E.E.U.U (de Lucas & del Peso, 2012).

2.6.2 Clasificación de los biocombustible según su estado.

Los biocombustibles se pueden presentar en la naturaleza en los tres estados de la materia: solido, líquido y gas.

2.6.2.1 Biocombustibles sólidos

Se considera aquel combustible sólido, no fósil, compuesto por materia orgánica y susceptible para ser utilizado en aplicaciones energéticas.

2.6.2.2 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos, alcoholes y aceites principalmente, son una serie de productos biológicos que pueden sustituir a los derivados del petróleo, o bien pueden ser utilizados como aditivos.

2.6.2.3 Biocombustibles gaseosos

Son aquellos que se obtienen debido al proceso de digestión anaerobia que ocurre en la naturaleza.

2.7 El Biogás.

El biogás es un combustible que se obtiene a través de la descomposición de la materia orgánica, ya sea de manera natural o con la ayuda de algún dispositivo como lo es el caso de un biodigestor, mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno (anaeróbico). Está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Su poder energético se debe principalmente a su contenido de metano.

Posee otros elementos que actúan como impurezas, principalmente el azufre, el cual debe ser eliminado para utilizar el biogás como combustible.

La proporción de mezcla de gases depende del sustrato digerido, estando en general formada por un 50-70% de CH_4 , un 30-40% de CO_2 , y pequeñas proporciones de ácido sulfhídrico (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), y otros (de Lucas & del Peso, 2012).

Su elevado contenido en metano le proporciona una elevada capacidad calorífica (entre 18,8 y 23,4 kcal/m³) (de Lucas & del Peso, 2012), por lo que, tras ser depurado para eliminar el vapor de agua y el ácido sulfhídrico, es utilizado en calderas, cuando su producción es pequeña, o en motores de cogeneración para la generación de electricidad y calor, cuando la producción es mayor. Además, si se realiza una purificación adecuada del biogás (hasta alcanzar entre un 91-95% en metano) también puede emplearse como combustible para vehículos, pilas de combustible o ser incorporado a la red de gas natural.

2.8 Tipos de biodigestores anaerobios.

A la hora de diseñar o elegir un biodigestor se deben considerar las características de la biomasa y el producto final que se quiere obtener. En general, los biodigestores se pueden clasificar en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismo en su interior (de Lucas & del Peso, 2012).

2.8.1 Biodigestores sin retención de masa.

2.8.1.1 Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación

. Mantiene una distribución uniforme de las concentraciones de sustrato y microorganismos gracias a un sistema de agitación. La agitación puede realizarse de forma mecánica o neumática, pero nunca de forma violenta. Su tiempo de retención es elevado. Es el más utilizado para residuos ya que no ofrece problemas de diseño (**Ilustración 10 izq.**).

2.8.1.2 Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación o reactor anaerobio de contacto

Difiere del anterior porque existe un sistema de decantación para los microorganismos y se recirculan posteriormente. Antes del decantador se dispone de un sistema de desgasificación que favorece la decantación. Este sistema sólo puede aplicarse a aguas residuales que presenten una alta carga orgánica (ej. aguas residuales de azucareras o cerveceras) en las que es posible la separación de las fases líquido- sólido, con una fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos (**Ilustración 10 derch.**)

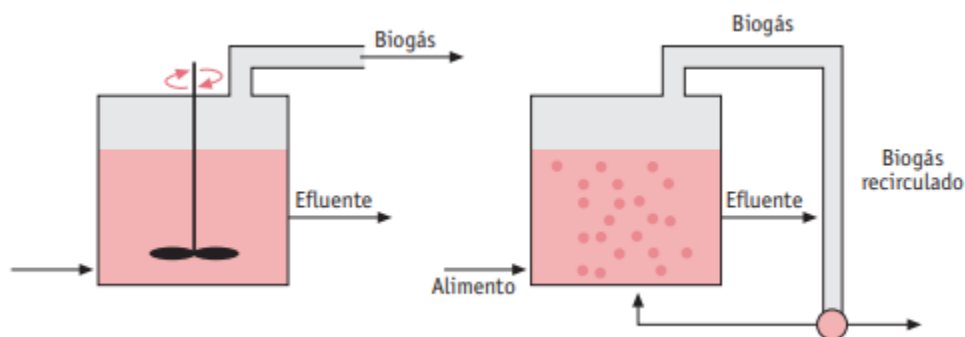


Ilustración 10: Biodigestores sin retención interior de biomasa, izquierda: Sin recirculación y derecha: con recirculación. (Fuente: de Lucas & del Peso, 2012)

2.8.1.3 Digestor de flujo pistón

Este tipo de reactor posee un tiempo de retención inferior a los anteriores debido a que la tasa de crecimiento de los organismos es más elevada a la entrada del reactor (donde la concentración de sustrato es también más elevada), lo que hace que la concentración media en el reactor sea superior a la de los reactores de mezcla completa (**Ilustración 11**)

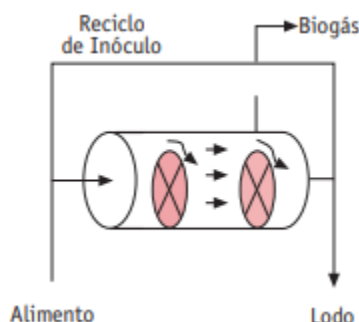


***Ilustración 11:** Reactor sin retención de masa, digestor de flujo pistón. (Fuente IDAE 2007)*

2.8.1.4 Digestor discontinuo

En este sistema (**Ilustración 12**), la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Aquí el tiempo de retención no tiene sentido y se habla de tiempo de digestión. Si se quiere conseguir una producción cercana a la continuidad deberán combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo.

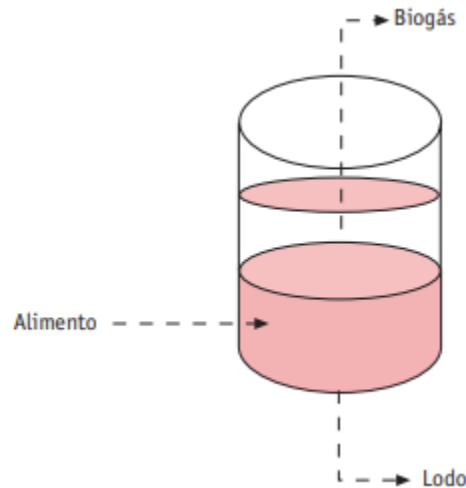


***Ilustración 12:** Reactor sin retención de masa, digestor de flujo discontinuo. (Fuente IDAE 2007)*

2.8.2 Biodigestores con retención de masa

Este tipo de dispositivos permite la retención de bacterias en el interior para reducir así el tiempo de retención empleado en los reactores de mezcla completa. Los principales métodos de retención de biomasa son:

2.8.2.1 Filtros anaerobios y lecho fijo

En este sistema los microorganismos anaerobios están fijados a la superficie de un soporte inerte (formando biopelículas), columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste con un flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente, **ilustración 13 b**) donde las bacterias se encuentran atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente (lecho fijo con flujo descendente, **ilustración 13 a**)

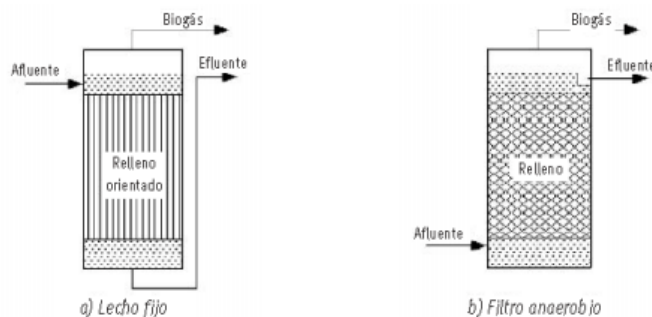


Ilustración 13: Biodigestores con retención interior de biomasa, a) lecho fijo y b) filtro anaerobio.

(Fuente IDAE 2007)

2.8.2.2 Reactores de lechos de lodos y lecho fluidizado

El sistema de lecho de lodos (**Ilustración 14 c)**) favorece la floculación o agregación de bacterias, que formarán gránulos, y que por sedimentación se mantendrán en el interior del reactor. El diseño más común es el Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) y es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria. En el sistema de lecho fluidizado, las bacterias se encuentran fijadas formando una biopelícula sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante un flujo ascendente (**Ilustración 14 d)**). Para mantener el caudal adecuado de este flujo, se recurre a la recirculación.

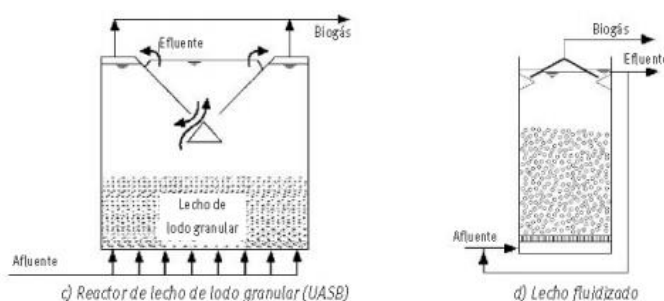


Ilustración 14: Biodigestores con retención interior de biomasa, c) reactor de lecho de lodo granular y d) lecho fluidizado. (Fuente IDAE 2007)

CAPÍTULO 3

3. Materiales y Metodología.

3.1 Biomosas

Las muestras se constituyeron por:

➤ **Biomasa Algal**

Se utilizó en este estudio la macroalga *Durvillae* Antártica (**ilustración 15**), comúnmente llamada en Chile como cochayuyo, la cual se obtuvo desde un puesto comercial del mercado El Cardonal de la ciudad de Valparaíso.



Ilustración 15: Biomasa algal, Durvillae antártica (Fuente: Elaboración propia)

➤ **Heces de perro**

Para elaborar las mezclas que serán sometidas a los **ensayos de biodegradabilidad anaerobia**, se tomaron heces de perro pertenecientes a un canil de la región de Valparaíso, constituyendo una fuente de nutrientes y bacterias en el proceso anaerobio, y de este modo realizar una cogestión de las algas.

➤ Inóculo

Se agrega lodo como fuente de microorganismos anaerobios ya activos, con el fin de que en el proceso de digestión anaerobia cuente con un ambiente apto para que las demás bacterias puedan activarse. Si no se adiciona el inóculo la biodegradabilidad de la biomasa algal puede verse limitada por los inhibidores que puedan existir en ella.

3.1.1 RILES.

Para realizar la caracterización, tanto de la biomasa como de las mezclas que se van a someter a los ensayos de biodegradabilidad, es necesario triturar la biomasa algal y realizar una dilución con agua destilada.

En primera instancia se obtuvo una dilución de 1000 ml del RIL, compuesta de 100 gramos de *Durvillae* Antártica en agua destilada. El resultado fue una pasta densa como se muestra en la **ilustración 16**, la cual, una vez realizada la caracterización inicial, se optó por realizar una nueva dilución para que quedará más líquida, y de este modo favorecer el proceso de armado de mezclas y ensayo de biodegradabilidad. La solución adoptada es volver a formar una dilución de 100 ml de la pasta anterior en un litro agua destilada y repetir la caracterización. El resultado final puede verse en la **ilustración 17**.



Ilustración 16: Primera dilución biomasa algal

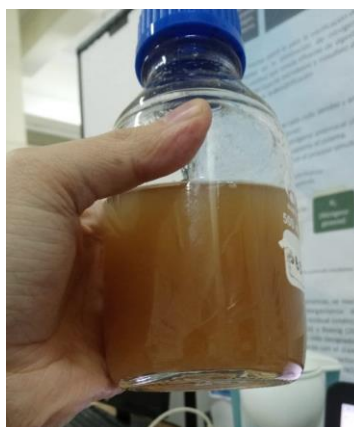


Ilustración 17: Segunda dilución biomasa algal

Por otro parte, se tomaron 56 gramos de heces diluidas con 500 ml de agua destilada para su posterior caracterización inicial y armado de mezclas para realizar los ensayos de biodegradabilidad.

3.2 Caracterización de muestras.

Los parámetros medidos en este punto del estudio se muestran en la **tabla 4**, cuya metodología utilizada se especifica en los anexos.

Tabla 4: Metodología de caracterización (Fuente: Elaboración propia)

Parámetro	Procedimiento	Método	Lugar de medición
ST	Secado a 105°C	Anexo 2	Laboratorio de RILES USM
SST	Secado a 105°C	Anexo 2	Laboratorio de RILES USM
SV	Incineración a 550°C	Anexo 2	Laboratorio de RILES USM
SSV	Incineración a 550°C	Anexo 2	Laboratorio de RILES USM
DQO Total	Titulación Directa	Anexo 3	Laboratorio de RILES USM
DQO Soluble	Titulación Directa	Anexo 3	Laboratorio de RILES USM

pH		Anexo 4	Laboratorio de RILES USM
Nitrógeno	Espectromatografía amonio	Anexo 5	Laboratorio de RILES USM
Fósforo	Espectromatografía fosfato	Anexo 6	Laboratorio de RILES USM

- **pH**

Fue el primer parámetro a medir, tanto de las mezclas como de las biomásas que la componen. Para esto se utilizó un pH-metro de la marca Arquimed, modelo *Orion Star A211*, donde su principio de funcionamiento se basa en una técnica con luz ultravioleta midiendo la absorbencia del nitrato a 200 nm (**ilustración 18**).

Para que las bacterias (principalmente la *Thiobacillus Denitrificans*) se encuentren en un ambiente apto para su crecimiento, el pH de la muestra debe ser lo más neutro posible, idealmente en un rango de trabajo entre 6 y 8, siendo 7 el óptimo. Si lo mencionado con anterioridad no se cumple, las muestras se pueden neutralizar aplicando una solución buffer pH 7.



Ilustración 18: Medición de pH (Fuente: Elaboración propia)

- **SST**

Representa la cantidad de materia (la que puede ser orgánica o inorgánica) resultante luego de un proceso de filtrado y posterior secado a 105 °C en la estufa (**ilustración 19**) a una porción de muestra.



Ilustración 19: Secado de muestra en estufa (Fuente: Elaboración propia)

La metodología utilizada en el laboratorio de RILES consistió en poner a secar papeles filtros en la estufa a 105°C durante 60 minutos, para posteriormente dejarlos enfriar en un desecador para evitar que absorban humedad del ambiente. Finalmente el papel filtro se pesa en una balanza.

Luego que se anota la tara del papel seco, se procede a poner una cierta cantidad de muestra sobre el papel para filtrarla mediante un sistema que posee una bomba de vacío (**ilustración 20**). Una vez realizado el filtrado, se procede a volver a poner el papel, pero esta vez con la muestra resultante, en la estufa durante una hora. Se deja enfriar en la desecadora y se obtiene el peso del papel con los sólidos en la balanza.



Ilustración 20: Filtrado de muestra con bomba de vacío (Fuente: Elaboración propia)

Los SST se obtienen a partir de la ecuación.

$$SST \left[\frac{g}{L} \right] = \frac{M_p - M_{ps}}{V_m} \times 1000 \quad (3.2.1)$$

Donde:

M_p : Tara papel filtro [g].

M_{ps} : Tara papel filtro con sólidos [g].

V_m : Volumen de muestra [ml].

- **SSV**

Es la materia que se desprende a partir de los SST, tras someter a altas temperaturas el material insoluble que quedo en el filtro. La composición de estos sólidos es orgánica y representa la cantidad de materia susceptible a ser degradada durante la digestión.

El papel filtro con la muestra donde se obtuvieron los SST se dobla cuidadosamente y se introduce en un crisol previamente pesado (**ilustración 21**). El crisol es puesto en una mufla (**ilustración 22**) que se encuentra a una temperatura de 550°C por una hora.

Por último, el crisol es retirado de la mufla y se deja en el desecador hasta que se enfríe para obtener su tara.



Ilustración 21: Papel filtro en el crisol (Fuente: Elaboración propia)



Ilustración 22: Mufla (Fuente: Elaboración propia)

Los SSV se obtienen a partir de la siguiente fórmula (3.2.2):

$$SSV \left[\frac{g}{L} \right] = \frac{M_{sst} - (M_{cm} - M_c)}{V_m} \times 1000 \quad (3.2.2)$$

M_{sst} : $M_p - M_{ps}$ [g].

M_{cm} : Tara crisol con muestra calcinada [g].

M_c : Tara crisol [g].

V_m : Volumen de muestra [ml].

- **ST**

Son todos los sólidos presentes en la muestra, los que se obtienen poniendo esta última en un crisol, para posteriormente secar la muestra en la estufa a 105°C durante un día. Pasado este tiempo se saca de la estufa y se deja enfriar en la secadora, para finalmente obtener su peso en la balanza.

Los ST se obtienen a partir de la siguiente fórmula (3.2.3):

$$ST \left[\frac{g}{L} \right] = \frac{P_f - P_i}{V_{muestra}} * 1000 \quad (3.2.3)$$

Dónde:

P_f : Peso final del crisol con la muestra seca [gr]

P_i : Peso del crisol [gr]

$V_{muestra}$: Volumen de la muestra [ml]

- STV

Los sólidos totales volátiles corresponden a la materia orgánica total que se obtiene al someter la muestra de ST a altas temperaturas. Se toma el crisol con la muestra seca y se introduce a la mufla que se encuentra a 550°C durante una hora, transcurrido el tiempo se saca y deja enfriar en el desecador. Una vez frío se registra su peso con la balanza. Se calcula mediante la fórmula (3.2.4)

$$STv \left[\frac{g}{L} \right] = \frac{P_f - P_{fv}}{V_{muestra}} * 1000 \quad (3.2.4)$$

P_f : Peso final del crisol más muestra seca [g].

P_{fv} : Peso del crisol [g].

$V_{muestra}$: Volumen de la muestra [ml].

- **Demanda Química de Oxígeno**

La demanda química de oxígeno (DQO) determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica y compuestos oxidables, presentes en la muestra de RIL que se está analizando, bajo ciertas condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra se oxidan en un tubo para DQO, mediante reflujo en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), en presencia de sulfato de plata ($AgSO_4$) que actúa como catalizador, y de sulfato mercurico ($HgSO_4$) adicionado para remover la interferencia de cloruros (**ilustración 23**).



Ilustración 23: *Tubos de DQO con las soluciones catalíticas y digestoras y con la muestra de RIL (Fuente: Elaboración propia)*

Transcurridas las 2 horas en que se produce la digestión de los tubos con la muestra a 150°C (**ilustración 24**), el remanente de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sin reducir se titula con sulfato ferroso de amonio (FAS) utilizando como indicador el complejo ferroso de ortofenantrolina (ferroína).



Ilustración 24: *Digestión de las muestras de DQO (Fuente: Elaboración propia)*

La DQO se calcula tomando en cuenta un blanco de referencia realizado con el mismo proceso mencionado, aplicado esta vez, a una muestra compuesta por agua destilada. La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente (mgO_2/L).

Sin embargo, la desventaja de este parámetro es que no diferencia la materia orgánica biodegradable de las otras que igual son oxidables. Si se quiere medir la cantidad de materia orgánica biodegradable se utiliza como parámetro la DBO (Demanda

bioquímica de oxígeno), pero la duración de este proceso es mucho mayor comparado con la DQO, siendo de alrededor 5 días.

Una vez obtenida la DQO de la muestra permitirá calcular:

1. La concentración de carbono presente en el RIL mediante:

$$C \left[\frac{mg}{L} \right] = DQO \left[\frac{mg}{L} \right]$$

2. El porcentaje de biodegradabilidad anaerobia que se produce dentro del biodigestor, con una muestra de entrada y salida de este. Se calcula empleando al siguiente fórmula (3.2.5):

$$\% \text{ de Biodegradabilidad anaerobia} = \frac{(DQO_{inicial} - DQO_{final})}{DQO_{inicial}} \times 100 \quad (3.2.5)$$

3.3 Ensayo de Biodegradabilidad Anaerobia.

Este ensayo consiste en someter a la muestra de cochayuyo + heces, contenida en un mini reactor, a una digestión anaerobia controlada por variables como el tiempo de duración del ensayo, temperatura del baño donde estarán los mini reactores y volumen de la muestra. Por otro lado, se obtendrán variables a medir, como lo es el caso de la producción de metano, el porcentaje de remoción de sólidos y la biodegradabilidad anaerobia (**Anexo 7**).

La biodegradabilidad anaerobia se define como la fracción máxima de materia orgánica susceptible de ser eliminada por digestión anaerobia, en unas determinadas condiciones de operación.

3.3.1 Potencial Biometanogénico del Sustrato (alga + heces).

Para determinar la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia del sustrato, las mezclas serán sometidas a ensayos tipo BMP (Biomethane Potential), específicamente a dos.

3.3.1.1 Ensayo BMP botella invertida.

Luego de realizar la caracterización inicial a las biomasas que componen el sustrato cada una por separado y también al inóculo, se procede a armar las mezclas que serán sometidas al ensayo de BMP.

Se trabajará con una **co-digestión de biomasa algal y heces de perro**, evaluando el impacto que tiene en la generación de biogás, variando el porcentaje que ocupa cada componente del sustrato dentro del volumen efectivo del mini reactor.

Descripción del ensayo

Este es un ensayo tipo batch (**ilustración 25**), en el cual se utilizaron mini reactores de 250 [cc]. El biogás que se genera fluye desde el mini reactor (1) hacia un frasco tipo Mariotte invertido (5) que contiene una solución alcalina (NaOH 2,5%), pasando previamente por un depósito anti-retorno (4). El CO_2 que se produce en la digestión es absorbido por la solución alcalina, por lo que el volumen desplazado en el frasco Mariotte es producido por la presión que ejerce principalmente el metano al interior del frasco y que provoca que la solución se desplace hacia la probeta (6). La producción de metano puede medirse a través del volumen desplazado de solución alcalina hacia la probeta graduada. La salida para toma de muestras se indica en (2) y (3) es por donde sale el biogás.

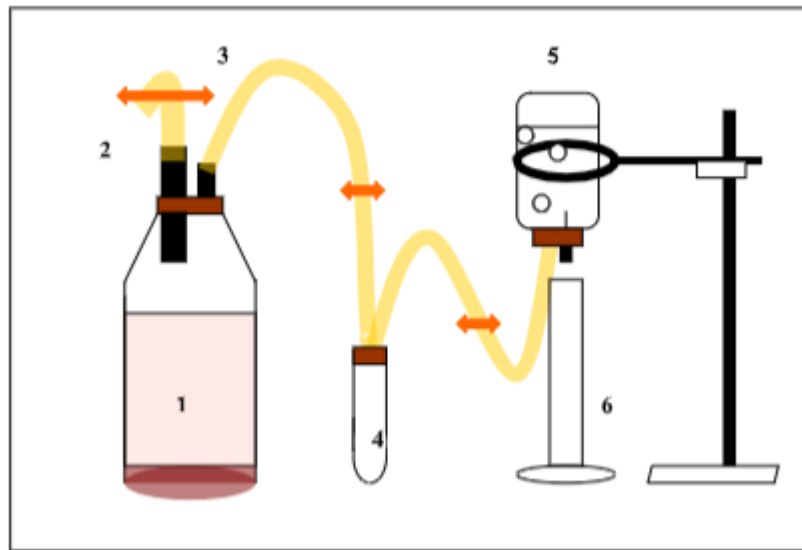


***Ilustración 25:** Esquema de equipos para ensayo de biodegradabilidad (Fuente: Guerrero, 2014)*

Armado de mezclas en mini reactores.

Se decide trabajar con 3 proporciones de mezclas diferentes para realizar el montaje de los mini reactores: 90-10, 50-50 y 20-80 (basado en la relación porcentual cohayuyo – heces sobre el volumen efectivo del mini reactor). La decisión de escoger estas tres proporciones fue de tomar los dos casos extremos en cuanto a relación de una biomasa con la otra y además tener un punto medio (50-50) a modo de referencia, para finalmente conocer cuál de estas genera una mayor producción de biogás.

Los mini reactores utilizados corresponden a botellas de vidrios que poseen un volumen efectivo de 250 ml. Se trabajará con muestras en duplicado para cada caso a estudiar, más dos blancos que solo contendrán el inóculo y agua destilada dando un total de 8 botellas.

Primero se parte por adicionar la misma cantidad de inóculo a cada botella, con el fin que esta tenga el mismo efecto en la producción de biogás. El volumen de inóculo a

adicionar se calcula en base a que la concentración de SSV de inóculo en la muestra debe estar en el rango 1,5 y 5 [gr/L]. Para este caso en específico se utiliza una concentración de SSV de inóculo igual a 3 [gr/L].

Luego se procede a calcular mediante la fórmula 3.3.1 el volumen de RIL a adicionar al mini reactor:

$$V_{Ril} = V_{efectivo} - V_{inóculo} \quad (3.3.1)$$

El paso siguiente es calcular la cantidad específica de biomasa algal y de heces que se adicionara en la mezcla. Esto se realiza tomando la proporción de cada sustrato y multiplicarla por el volumen de RIL calculado anteriormente.

Con la caracterización inicial, se puede calcular la cantidad de nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo específicamente) teórica que van a tener las mezclas inicialmente a partir de la fórmula (3.3.2):

$$\bar{X}_{Nutriente} = (V_{alga} \times A) + (V_{heces} \times B) + (V_{inóculo} \times C) \quad (3.3.2)$$

Donde:

$\bar{X}_{Nutriente}$: Cantidad del nutriente (C, P, N) teórica presente en el mini reactor [mg].

V_{alga} : Volumen de biomasa algal presente en el mini reactor [L].

V_{heces} : Volumen de heces presente en el mini reactor [L].

$V_{inóculo}$: Volumen de inóculo presente en el mini reactor [L].

A: Concentración del nutriente presente en la biomasa algal [mg/L].

B: Concentración del nutriente presente en las heces [mg/L].

C: Concentración del nutriente presente en el inóculo [mg/L].

Con lo anterior podemos saber si nuestra mezcla en el mini reactor le sobra o es carente de una cantidad “X” de nutriente, considerando que para una digestión óptima se recomienda que la proporción de C: N: P para digestión anaerobia sea 400:5:1 respectivamente. En caso de que sobre se recomienda volver a diluir la mezcla y si falta adicionárselos con un suplemento.

Una vez listos todos los mini reactores, se procede a realizar el montaje del sistema, poniendo las botellas en el baño con agua destilada a 37°C.



***Ilustración 26:** Montaje de mini reactores ensayo botella invertida. (Fuente: Elaboración propia)*

3.3.1.2 Ensayo de BMP frasco Serum con sello hermético.

Similar al ensayo con botella invertida, pero esta vez ocupando como mini reactores unos frascos Serum. Estos frascos poseen un volumen total de 100 [ml], que están tapados con un septum PTFE/Butyl y un sello hermético de aluminio, en donde va la mezcla sustrato-inóculo como se observa en la figura.

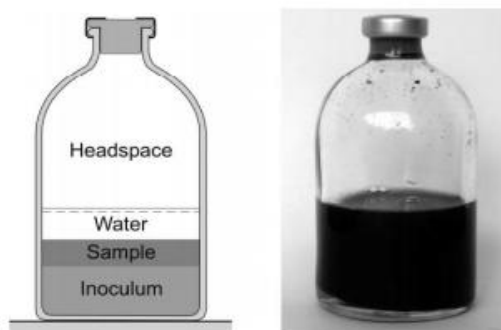


Ilustración 27: Frasco Serum (Fuente: Guerrero, 2014)

El biogás generado se acumula en la zona indicada como “*Headspace*”, por lo que debe destinarse entre el 40 y el 60% del volumen total del frasco para esta zona, siendo la parte resultante el volumen efectivo del digestor. Para este trabajo el volumen efectivo utilizado fue de 73,2 ml, dejando el resto para la acumulación del biogás.

Las mezclas y los blancos fueron puestos en un baño, al igual que el ensayo anterior, a 37°C.

a) Armado de mezclas primer montaje.

El primer montaje de este ensayo se realizó con una metodología distinta al de botella invertida pero las proporciones alga – heces sobre el volumen efectivo en los frascos fueron las mismas.

Luego de la caracterización inicial del alga, heces e inóculo, la cantidad de sustrato a adicionar en los frascos tiene que cumplir tres condiciones:

- i. DQO mezcla (alga-heces) = 5 [g/L]
- ii. SSV inóculo = 3 [g/L]
- iii. Relación C: N: P = 400: 5 :1

Posterior a esto, las botellas fueron puestas en el baño y dejaron transcurrir tres días antes de tomar la primera medición.

Para realizar la medición de generación de metano del ensayo se utiliza un presurímetro electrónico, el cual relaciona la señal medida en mV por el instrumento con la presión medida en mbar (**Ilustración 28**). Las mediciones de presión se deben tomar a cada frasco durante los días que dure el ensayo.



Ilustración 28: Medición de presión a mezclas en frascos Serum (Fuente: Elaboración propia)

Además de lo anterior, aproximadamente en la mitad del ensayo, se llevaron las botellas a un cromatógrafo de gases del laboratorio de IQYA de la UTFSM, sede San Joaquín, con la finalidad de obtener el porcentaje de metano presente en el volumen de biogás generado.



Ilustración 29: Cromatógrafo de gases, UTFSM Campus San Joaquín (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente se calcula el volumen de metano generado utilizando la ley de Dalton y la ley de los gases ideales (medición a temperatura y presión ambiente).

Observación: Una vez transcurridos los 3 días, se procede a medir y registrar las mediciones de presión. Aquí se observa que los valores de presión son negativos o ceros, por lo que no hay generación de biogás.

Por la observación anterior se plantean dos hipótesis de porque el ensayo no obtuvo resultados positivos:

- i. La pared celular del alga (en este caso *Durvillae* Antártica) es muy gruesa para que las bacterias puedan degradar la materia orgánica.
- ii. La metodología utilizada para armar las mezclas no es la adecuada para este tipo de ensayo.

A partir de la primera hipótesis se decide realizar un pretratamiento previo a una cantidad de biomasa algal con la finalidad de modificar la pared celular de la que está compuesta. El pretratamiento consiste en aplicar temperatura y presión en un Autoclave.

De la segunda hipótesis se decide aplicar otra metodología, la cual consiste, al igual que en el caso del ensayo de botella invertida, que los SSV del inóculo de la muestra sea 3 [gr/L] y además que la relación SSV inóculo /SSV RIL sea igual a 2.

Se realizan dos ensayos más, esta vez en paralelo, utilizando las mismas proporciones antes mencionada y cada una en triplicado, más un blanco en triplicado, esto de un total de 24 botellas entre los dos ensayos. Un ensayo utiliza una co-digestión con el alga con pretratamiento y otra sin pretratamiento y en ambos ocupando la metodología que en el caso del ensayo con botella invertida.

CAPÍTULO 4

4. Resultados experimentales.

4.1 Caracterización inicial.

Los parámetros medidos para la macro alga, las heces y el inóculo para el inicio de la experimentación se muestran en la tabla 5:

Tabla 5: Caracterización inicial de cada biomasa (Fuente: Elaboración propia)

Biomasa	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
Durvillae Antártica	6,18	4,4	2,2	6,4	5,6	23,5	18
Heces	6,56	14,2	3,9	21,5	13,9	20,2	15,1
Inóculo	8,33	71,5	2,4	122,5	69,9	12,8	64,5

También se realiza la medición de los nutrientes a las biomasas, específicamente nitrógeno y fósforo. El valor de la cantidad de nitrógeno en las muestras se obtiene a partir de la medición de nitrato y la del fósforo a través del fosfato. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 6: Nutrientes en cada biomasa (Fuente: Elaboración propia)

Biomasa	Nitrógeno [mg/L]	Fósforo [mg/L]
Durvillae Antártica	1,196	8,485
Heces	77,54	1110,02
Inóculo	1032,18	2375,55

4.2 Resultados BMP ensayo de botella invertida.

Los volúmenes de cada biomasa al interior de las botellas vienen dados en la **tabla 7**, junto con los nutrientes que posee y lo que se necesita adicionar para cumplir la relación C: N: P. Volumen de Inóculo para todas las botellas igual a 0,010472 [L].

Tabla 7: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas de 250 [ml]. Ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)

				necesito		tengo	
Mezclas	vol cochayuyo [l]	vol heces [l]	mg C	mg nitrogeno	mg fosforo	mg nitrogeno	mg fosforo
90-10	0,215352	0,023928	2239,971214	27,99964018	5,599928035	13,17790771	53,8537163
50-50	0,11964	0,11964	3145,108147	39,31385184	7,862770368	20,48494464	159,283834
20-80	0,047856	0,191424	3823,960847	47,79951058	9,559902117	25,96522234	238,356423
blanco			877,7112228	10,97139028	2,194278057	11,0649696	25,465896

Medición en las mezclas de los **parámetros de entrada:**

Tabla 8: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas 500 [ml], ensayo BMP
botella invertida (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	6,7	10,7	3,3	16,2	11,1	42,6	28,6
50%-50%	6,8	12	4,4	48	37,2	138,8	102,1
20%-80%	7,1	26,1	2,9	48,3	35,1	123,8	85,5
Blanco	6,7	4,4	0,7	8,9	7	-	-

La presión fue medida diariamente durante 62 días, a las 12:00 horas con un rango de variación de ± 1 hora. Los datos fueron ingresados en una planilla del programa Excel para generar el gráfico que se muestra en la **ilustración 26:**

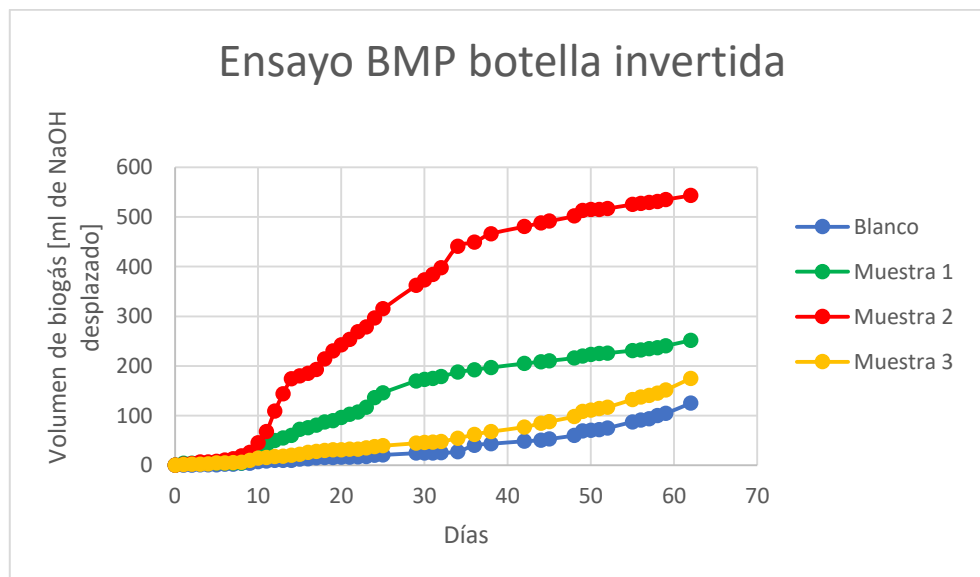


Ilustración 30: Volumen de biogás producido en botellas ensayo BMP botella invertida
(Fuente: Elaboración propia)

La siguiente tabla resumen muestra los [ml] de NaOH total desplazados hacia la probeta graduada, que equivalen al volumen de metano generado por las muestras.

Tabla 9: Volumen de metano generado en ensayo BMP ensayo botella invertida (Fuente: Elaboración propia)

Muestra	Volumen de Metano [ml]
Mezcla 1	252
Mezcla 2	543
Mezcla 3	175
Blanco	125

A continuación se presentan las mediciones de los **parámetros de salida** en las mezclas (**tabla 10**):

Tabla 10: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	7,6	3,5	1,1	6,5	4,5	7,2	4
50%-50%	7,1	4,7	1,3	9,7	7,6	8,4	5
20%-80%	7,1	9,2	2,5	13,8	11,5	11,3	7,2
Blanco	7,1	2.2	0,7	4,1	3,7	-	-

Finalmente se calcula la biodegradabilidad de cada mezcla. Esta se calcula con la DQO total medida antes y después del ensayo de BMP utilizando la fórmula (4.2.1)

$$\%Biodegradabilidad = \frac{DQO_{INICIO} - DQO_{FINAL}}{DQO_{INICIO}} \times 100 \quad (4.2.1)$$

Los resultados se muestran en la siguiente **tabla 11**

Tabla 11: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP botella invertida (Fuente: Elaboración propia)

Mezcla	DQO total inicial [g/L]	DQO total final [g/L]	Biodegradabilidad anaerobia [%]
1 (90-10)	10,7	3,5	67,3
2 (50-50)	12	4,7	60,8
3 (20-80)	26,1	9,2	64,8

4.3 Resultados BMP con frascos Serum sin tratamiento previo.

Los volúmenes de cada biomasa y cantidad de nutrientes al interior de las botellas vienen dados en la **tabla 12**. Volumen de inóculo igual a 0,0035 [L] para todas las botellas.

Tabla 12: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP Frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

				necesito		tengo	
Mezclas	vol cochayuyo [l]	vol heces [l]	mg C	mg nitrogeno	mg fosforo	mg nitrogeno	mg fosforo
90-10	0,018	0,0008	383,3841937	4,792302422	0,958460484	3,69619	9,355171
50-50	0,01	0,004	390,8583321	4,885729151	0,97714583	3,93475	12,839355
20-80	0,004	0,0065	397,8843714	4,973554642	0,994710928	4,121424	15,563495
blanco			286,5661642	3,582077052	0,71641541	3,61263	8,314425

Medición en las mezclas de los **parámetros de entrada (tabla 13):**

Tabla 13: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	8,1	7,9	1,5	13,8	9,5	7,6	4,7
50%-50%	7,9	12,7	1,8	20,6	14,2	14,8	9,2
20%-80%	7,9	12,3	1,5	20,3	13,2	19,1	12,3
Blanco	8,9	8,6	0,8	12,3	7,7	7,6	3,7

La presión fue medida diariamente durante 49 días con el presurímetro, a las 12:00 horas con un rango de variación de ± 1 hora. Los datos fueron ingresados en una planilla del programa Excel para generar el gráfico que se muestra en la **ilustración 27**:

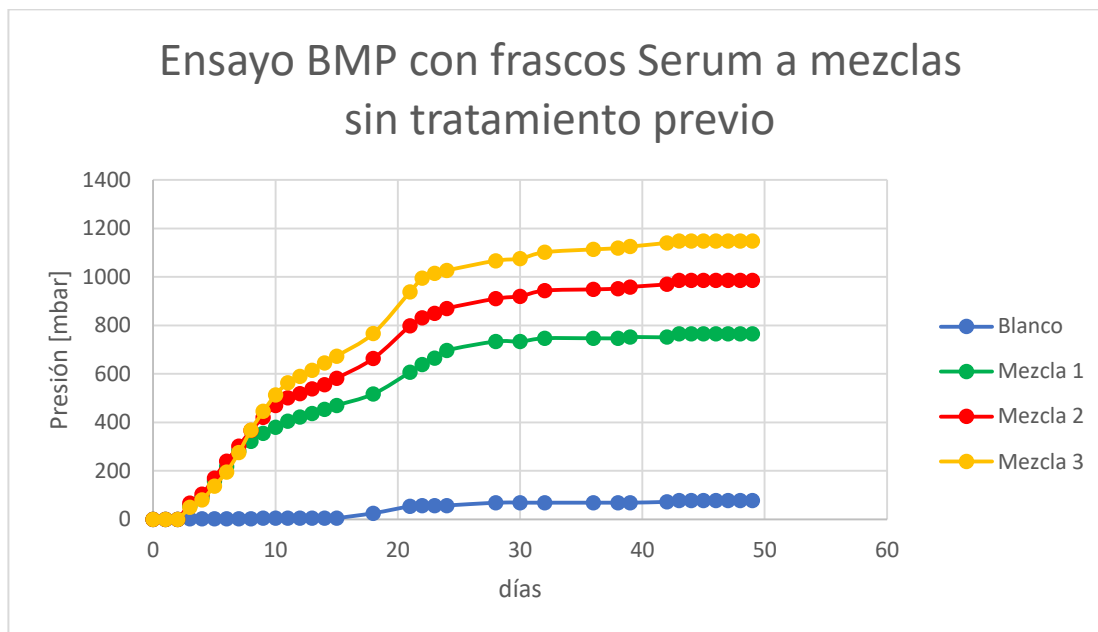


Ilustración 31: Presión acumulada en botellas ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Para obtener el volumen de biogás generado en cada mini reactor lo consideramos como un gas ideal (4.3.1). Debemos encontrar los moles del biogás a partir de la formula (4.3.2), considerando el volumen efectivo del mini reactor, al temperatura a la cual se encuentra el baño térmico, la presión registrada por el presurímetro en atmósferas y la constante de gas ideal (condiciones del ensayo BMP).

$$P \times V = n \times R \times T \quad (4.3.1)$$

$$n = \frac{P_p \times V_r}{R \times T_b} \quad (4.3.2)$$

P_p : Presión registrada por el presurímetro en [atm].

V_r : Volumen efectivo del mini reactor [L].

T_b : Temperatura del baño térmico [K°].

R : Constante de gas ideal [atm L/mol K°]

n : Moles de biogás [mol].

Una vez obtenido los moles del biogás, volvemos a utilizar la fórmula pero esta vez se despeja el volumen que será el del biogás considerando condiciones normales de operación (presión de 1 [atm] y temperatura ambiente de 293,15 [K°]). Se muestra la generación de volumen de biogás diario en [ml] en el gráfico:

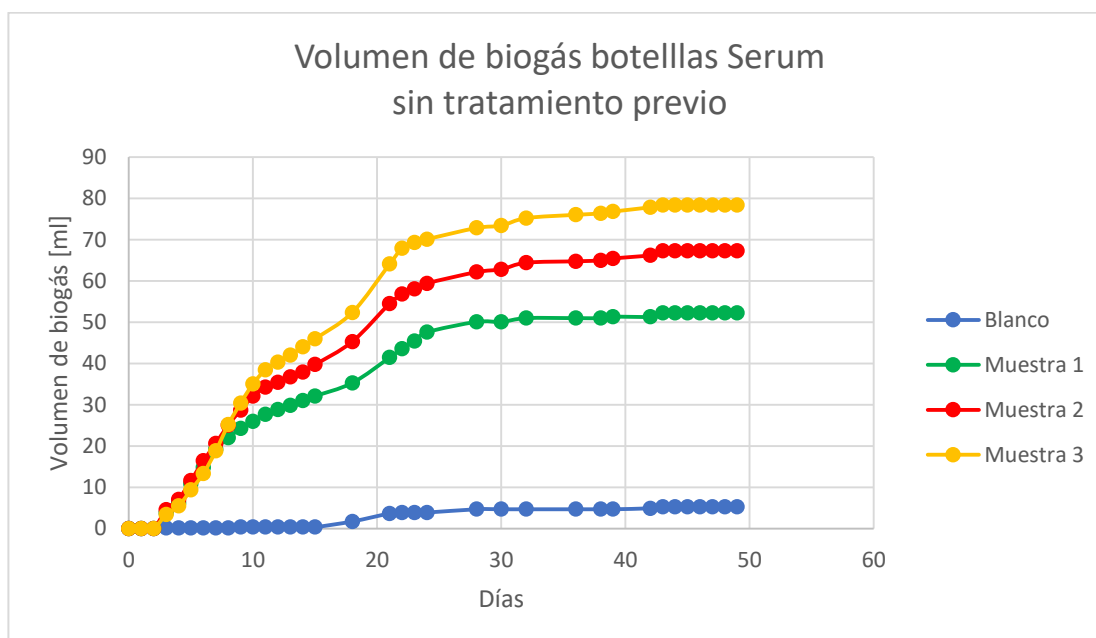


Ilustración 32: Volumen de biogás generado durante el ensayo de BMP frascos Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

La **tabla 14** resumen muestran los [ml] de biogás totales producidos para cada mezcla transcurridos los días de experimentación:

Tabla 14: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo de BMP sin tratamiento previo.

Muestra	Volumen de biogás total [ml]
Muestra 1	52
Muestra 2	67
Muestra 3	78
Blanco	5

A continuación se presentan las mediciones de los **parámetros de salida (tabla 15)** en las mezclas:

Tabla 15: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	7,3	3,3	0,6	6,4	5,6	5,4	3,5
50%-50%	7,3	5,2	0,6	12,5	9,6	7,5	4,3
20%-80%	7,4	5	0,4	8,2	5,6	8,6	5
Blanco	7,7	1,7	0,6	5,6	5,2	3,4	2

Al igual que en el caso anterior, se ocupa la fórmula (4.2.1) para obtener el porcentaje de biodegradabilidad anaerobia. Los resultados se muestran en la tabla:

Tabla 16: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

Mezcla	DQO total inicial [g/L]	DQO total final [g/L]	Biodegradabilidad anaerobia [%]
1 (90-10)	7,9	3,3	58
2 (50-50)	12,7	5,2	59
3 (20-80)	12,3	5	59

4.4 Resultados BMP con frascos Serum con tratamiento previo.

Los volúmenes de cada biomasa y cantidad de nutrientes al interior de las botellas vienen dados en la **tabla 17**. Volumen de inóculo igual a 0,0035 [L] para todas las botellas.

Tabla 17: Volúmenes de biomasa y nutrientes en las botellas ensayo BMP Frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

				necesito		tengo	
Mezclas	vol cochayuyo [l]	vol heces [l]	mg C	mg nitrogeno	mg fosforo	mg nitrogeno	mg fosforo
90-10	0,024	0,0008	404,3296482	5,054120603	1,010824121	3,724294	9,373465
50-50	0,0135	0,004	403,2335846	5,040419807	1,008083961	3,950708	12,850706
20-80	0,0065	0,0065	407,711139	5,096389238	1,019277848	4,130082	15,575874
blanco			286,5661642	3,582077052	0,71641541	3,61263	8,314425

Medición en las mezclas de los **parámetros de entrada (tabla 18):**

Tabla 18: Medición de los parámetros de entrada en mezclas botellas ensayo BMP frasco
Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	7,7	8,7	1,8	12,1	5,3	16,5	6,7
50%-50%	7,5	9,3	1,4	18,2	9,6	23,2	10,6
20%-80%	6,8	11,2	1,4	47,5	15,6	86,7	22,5
Blanco	8,1	13,7	0,6	17,5	6,2	30,6	12,3

La presión fue medida diariamente durante 47 días con el presurímetro, a las 12:00 horas con un rango de variación de ± 1 hora. Los datos fueron ingresados en una planilla del programa Excel para generar el gráfico que se muestra a continuación:

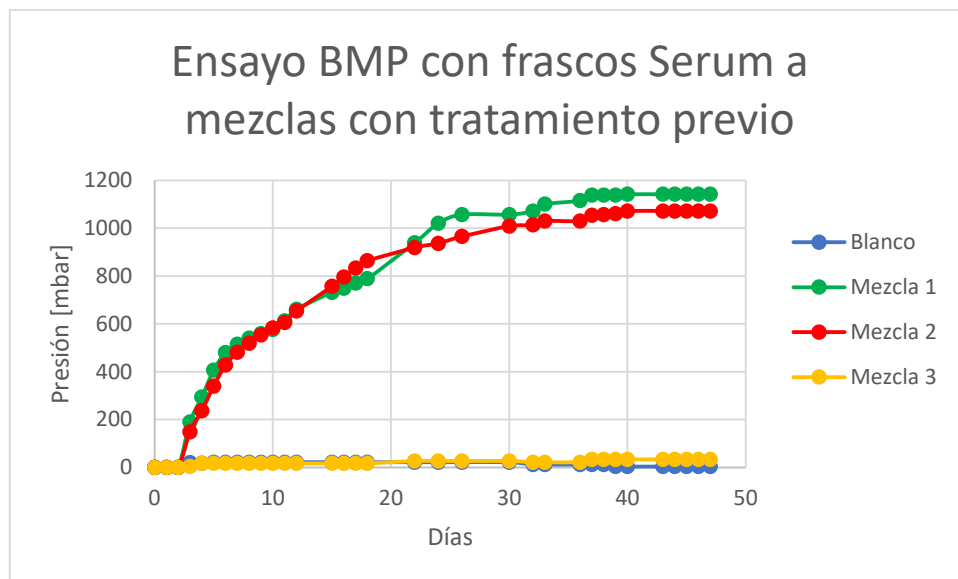


Ilustración 33: Presión acumulada en botellas ensayo BMP frasco Serum con tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Para calcular el volumen de biogás generado a partir de la presión, se sigue el mismo procedimiento que en el caso del ensayo de BMP sin tratamiento previo. La siguiente gráfica muestra el volumen de biogás acumulado en la duración del ensayo:

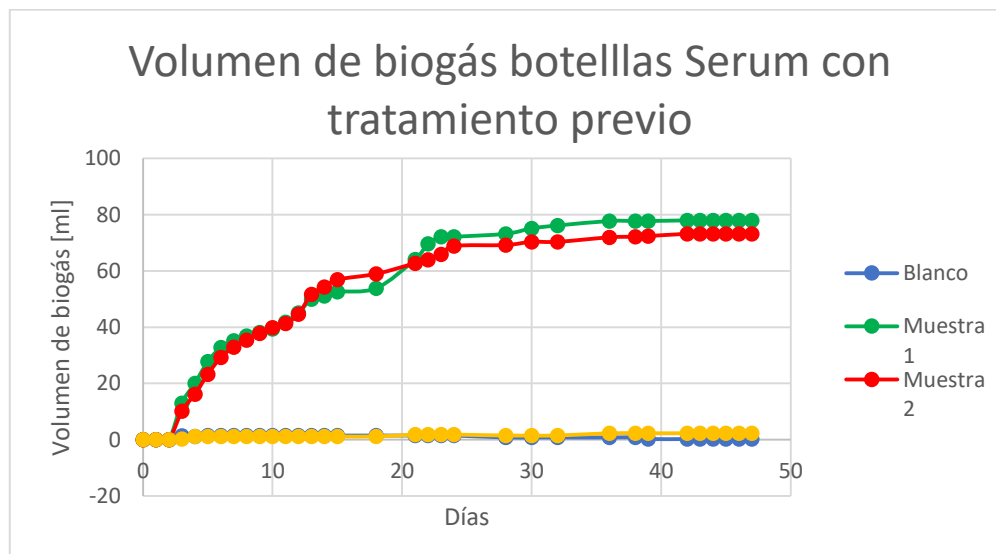


Ilustración 34: Volumen de biogás generado durante el ensayo de BMP frascos Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

La **tabla 19** muestra los [ml] de biogás totales producidos para cada mezcla con tratamiento previo a la *Durvillae Antártica*.

Tabla 19: Valor de volumen de biogás generados durante el ensayo de BMP con tratamiento previo.

Muestra	Volumen de biogás total [ml]
Muestra 1	78
Muestra 2	73
Muestra 3	2
Blanco	0

A continuación se presentan las mediciones de los **parámetros de salida** en las mezcla (**tabla 20**)

Tabla 20: Mediciones de los parámetros de salida, concluido el ensayo de BMP frasco Serum sin tratamiento previo (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas %Macro alga-% Heces	pH	DQO total [g/L]	DQO soluble [g/L]	SST [g/L]	SSV [g/L]	ST [g/L]	STV [g/L]
90%-10%	7,3	4,5	0,7	10,8	7,9	11,2	6,7
50%-50%	7,4	1,4	0,5	12,2	10,1	7,9	4,2
20%-80%	6,6	7,8	1,3	22,6	11,1	63,4	2,6
Blanco	7,3	2,3	0,4	13,7	11,1	12,3	9

La **tabla 21** resume los valores de biodegradabilidad anaerobia para las mezclas con pretratamiento de la biomasa algal:

Tabla 21: Resultados de biodegradabilidad anaerobia ensayo BMP frasco Serum sin tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

Mezcla	DQO total inicial [g/L]	DQO total final [g/L]	Biodegradabilidad anaerobia [%]
1 (90-10)	8,7	4,5	48
2 (50-50)	9,3	1,4	85
3 (20-80)	11,2	7,8	30

4.5 Resultados cromatografía de gases.

Las muestras de los ensayos de BMP con frascos Serum fueron llevadas al laboratorio de IQYA de la Universidad Federico Santa María campus San Joaquín, Santiago de Chile. En ella se hizo un análisis en un cromatógrafo de gases para ver principalmente el porcentaje de gases en el volumen de gas generado. Los resultados del análisis son mostrados en la **tabla 22 y 23** para cada caso:

Tabla 22: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras sin tratamiento previo

Mezcla	Presión	Aire [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	H2S [%]
Sin tratamiento	Transductor [mbar]				
1	45	41	48	11	0
2	80	32	55	13	0
3	90	31	57	12	0
Blanco	20	100	0	0	0

Tabla 23: Resultados análisis cromatografía de biogás, muestras con tratamiento previo

Mezcla con tratamiento	Presión Transductor [mbar]	Aire [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	H2S [%]
1	50	35	52	13	0
2	50	36	52	12	0
Blanco	20	100	0	0	0

Observación: En las mezclas son tratamiento previo no se realizó el análisis en el cromatógrafo de los blancos, puesto que se tomó como referencia los blancos de la parte sin tratamiento, ya que poseen la misma composición. Las mezclas 3 no se analizaron puesto que en la etapa de medición de presión previa al análisis, su valor fue cero.

A partir de la **tablas 22 y 23** que resume los datos arrojados del cromatógrafo, se calcula el volumen de metano presente en cada muestra en el volumen total de biogás. Al volumen de biogás para las muestras de ambos experimentos se les debe restar el blanco para restar el efecto del inóculo añadido previa experimentación (**tabla 24**).

Tabla 24: Volumen de metano generado al finalizar el ensayo de BMP con frascos Serum
(Fuente: Elaboración propia)

	<i>Sin tratamiento previo</i>			<i>Con tratamiento previo</i>		
Mezcla	Volumen de biogás efectivo [ml]	CH4 [%]	Volumen de CH4 presente en la muestra [ml]	Volumen de biogás efectivo [ml]	CH4 [%]	Volumen de CH4 presente en la muestra [ml]
1	47	48	22,56	78	52	40,56
2	62	55	34,1	73	52	37,96
3	73	57	41,61	2	-	-

CAPÍTULO 5

5. Análisis y discusión de resultados experimentales.

En cuanto al **ensayo de BMP de botella invertida**, se puede decir que en cuanto a la generación de biogás, **la muestra 2** fue predominante sobre las otras dos **muestras, 1 y 3**, con **53%** y **68%** más de generación con respecto a cada una respectivamente.

En cuanto a la **biodegradabilidad anaerobia** se puede notar que en las tres muestras gira en torno a un **60%**, esto si lo comparamos con los volúmenes de metano generados por cada muestras podría dar señales de que pudiese haber errores en el ensayo del tipo experimental, puesto que se debiese esperar que por el porcentaje de biodegradabilidad similar de cada muestra los volumen de metano generado no debiesen diferir en porcentajes muy elevados.

De la **ilustración 26**, se observa la forma que las curvas de generación de biogás difieren de lo que teóricamente es esperable. Teóricamente se espera que la generación de biogás en el transcurso de los primeros días sea una línea recta y posteriormente su pendiente empieza a decaer. Cuando la generación está por finalizar, se debe observar un pequeño pick en la curva, para luego volver a disminuir su pendiente hasta la estabilización. De la gráfica se observa que al finalizar el experimento las muestras aún estaban tendiendo al alza, lo que puede dar una señal de posibles fugas en el sistema durante la experimentación.

De la **caracterización de sólidos** se observan que todos tendieron a la baja, lo cual era de esperarse debido a la remoción de materia orgánica e inorgánica, por parte de las bacterias durante la digestión anaerobia.

Del **ensayo de BMP con frascos Serum sin tratamiento previo** a la biomasa algal, se observa que en cuanto a la generación de biogás **la muestra 3** estuvo por sobre la **1 y la 2**, con **33% y 14% más de generación por sobre la otra respectivamente**.

De la **biodegradabilidad anaerobia**, se observa que esta ronda sobre el 59% para las tres muestras, un porcentaje bastante aceptable.

De la **ilustración 28**, que muestra las curvas de generación de biogás, se observa que esto se asemeja mucho más en cuanto a lo teórico, a diferencia del ensayo de BMP botella invertida, ya que se puede ver claramente cada zona del proceso de digestión anaerobia mencionada con anterioridad.

En cuanto a la **caracterización de sólidos** se puede ver que todos, al igual que el caso anterior, tienden a la baja, debido a la remoción de materia durante el ensayo.

En el **ensayo de BMP con frasco Serum con tratamiento previo**, se tiene que la **muestra 1** generó una mayor cantidad de biogás con respecto a la **muestra 2**, alrededor de un **6%** más específicamente. Se observa además una particularidad ocurrida en este ensayo que tiene que ver con la casi nula generación de biogás en la **muestra 3**.

Para los resultados de **biodegradabilidad anaerobia**, se observa que a diferencia de los casos anteriores, difieren bastante una mezcla de otra. La **muestra 2** es la que posee una mayor porcentaje de biodegradabilidad con un **85%**, seguido por la **muestra 1** con un **48%** y por último la **muestra 3** con un **30%**.

De la **caracterización de sólidos** se observa que en todos los casos disminuyeron, salvo en la **mezcla 3**, que los SSV aumentaron al finalizar el experimento, y esto puede deberse a un crecimiento de bacterias al interior que quedaron inactivas, ya que por lo mencionado anteriormente se observó una nula generación de biogás.

Del **análisis de cromatografía** se observa que la que posee más metano en su composición es la **muestra 3 sin tratamiento previo con un 57%**, pero las demás no

se quedan tan atrás con porcentajes mayores al **50%**, salvo la **muestra 1 sin tratamiento previo con un 48%**.

Con los resultados obtenidos no se puede realizar una selección definitiva sobre cuál es la mejor mezcla, debido a que no existe una tendencia clara en cuanto a la generación de biogás, biodegradabilidad y porcentaje de metano que predomine en cada experimento realizado en esta investigación. Lo que sí se puede observar es que la cantidad de metano generado pareciera aumentar si se realiza un tratamiento previo a la biomasa algal, salvo en la **muestra 3** que con tratamiento previo no generó biogás.

Cálculo de poder calorífico e intercambiabilidad de gases.

Para calcular el poder calorífico se debe considerar el análisis entregado por el cromatógrafo de gases, ya que el biogás es una mezcla de gases y este análisis nos entrega cada porcentaje de estos presentes en el volumen de la mezcla (**tabla 22 y 23**).

El poder calorífico inferior de una mezcla de gases se calcula con la **fórmula 5.1**:

$$LHV = \sum_1^N LHV_{Mi} \times Y_{Mi} \quad (5.1)$$

Donde:

LHV : Poder calorífico inferior del biogás [KJ/Kg].

LHV_{Mi} : Poder calorífico inferior del compuesto presente en el biogás [KJ/Kg].

Y_{Mi} : Fracción másica del compuesto presente en el biogás [-].

Para obtener la masa de cada compuesto debemos considerar el peso molecular de cada uno de estos y multiplicarlo por el número de moles. Para este caso realizamos el supuesto que se queman 100 moles del biogás en estudio en condiciones normales.

La **tabla 25** muestra los valores de peso molecular y LHV para cada compuesto presente en el biogás:

Tabla 25: Valores de peso molecular y LHV para cada compuesto en el biogás obtenido. ([1]
Se consideró el peso molecular de aire seco. Fuente: Elaboración propia.)

Compuesto	Peso molecular [gr/mol]	LHV [KJ/Kg]
Aire	28.966 [1]	0
CH_4	16,04	49956,96
CO_2	44,01	0
H_2S	34,1	15192,104

Como se puede observar para el dióxido de carbono y el aire el poder calorífico inferior es cero, además, si observamos la composición del biogás entregada por el cromatógrafo, se observa que el porcentaje de ácido sulfhídrico es cero. Considerando lo anterior la **fórmula 5.1** para el cálculo de poder calorífico de biogás generado puede reescribirse de la siguiente manera:

$$LHV = LHV_{CH_4} \times Y_{CH_4} (5.2)$$

La siguiente **tabla 26** muestra los valores de LHV para cada mezcla realizada en la experimentación:

Tabla 26: Valores de LHV para cada muestra de la experimentación (Fuente: Elaboración propia)

Mezclas sin tratamiento previo		Mezclas con tratamiento previo	
Muestra	LHV [KJ/Kg]	Muestra	LHV [KJ/Kg]
1	15484,06	1	16964,39
2	18254,35	2	17061,71
3	19252,51		

Para este trabajo solo se consideró el poder calorífico inferior, es decir, el calor neto producido al suponer que se quema el combustible como tal, sin considerar el calor que aporta el vapor de agua producido durante la combustión.

A continuación se muestra la **tabla 27** con valores de poder calorífico inferior para diversos combustibles utilizados cotidianamente a modo de tener una referencia:

Tabla 27: Valores de LHV de combustibles más utilizados (Fuente: ACR Latinoamérica)

Combustibles sólidos	kcal/kg	kJ/kg
Madera	2700	11230
Carbón vegetal	6500	27040
Carbón turba	3300	13728
Carbón hulla	5000	20800
Carbón antracita	7000	29120
Combustibles líquidos	kcal/l	kJ/l
Diesel o Gas Oil C	10000	41600
Fuel-Oil	9000	37440
Combustibles gaseosos	kcal/kg	kJ/kg
Gas butano	11800	49337
Gas propano	12000	49920
Gas de ciudad	4200	17470
Gas Natural (0,7 kg/m ³ N)	12000	50000
Otros	kcal/kWh	kJ/kWh
Electricidad	860	~3600

Se observa que el LHV del biogás generado por las mezclas en la experimentación se encuentra muy por debajo de los combustibles gaseosos que se utilizan cotidianamente, pero a su vez, se encuentran cercanos o por sobre los combustibles sólidos.

Por otra parte se procede a calcular la intercambiabilidad del biogás mediante el **índice de Wobbe (fórmula 2.4)** para el poder calorífico inferior. Para esto se necesita encontrar un valor de densidad específica de referencia para el biogás, por eso se toma un estudio de la Universidad Veracruzana, en donde el biogás presenta una densidad relativa de 0,83 (Ruíz, 2013). La **tabla 28** muestra los resultados del cálculo del índice de Wobbe:

Tabla 28: Valores para índice de Wobbe de las muestras realizadas en la experimentación
(Fuente: Elaboración propia)

Mezclas sin tratamiento previo		Mezclas con tratamiento previo	
Muestra	Índice de Wobbe [KJ/Kg]	Muestra	Índice de Wobbe [KJ/Kg]
1	16995,96	1	18620,84
2	20036,76	2	18727,66
3	21132,37		

CAPÍTULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Una vez finalizada la experimentación se puede señalar que la biomasa algal en estudio *Durvillae Antártica* es **potencialmente metanogénica**, ya que dentro de la composición entregada en el cromatógrafo se tiene que esta posee un **porcentaje de metano mayor al 50%**, que según lo estudiado en el fundamento teórico, ya por sobre este porcentaje se pueden realizar aplicaciones con el biogás generado.

Al realizar una **co-digestión con heces de perro en distintas proporciones**, no se observa una diferencia fundamental sobre cuál de estas proporciones es la más óptima, considerando parámetros como la generación de volumen de biogás, composición de metano en cada muestra y biodegradabilidad anaerobia, ya que estos datos difieren bastantes en cada **ensayo de BMP**.

El realizar un **tratamiento previo** a la biomasa algal pareciera ser beneficio en cuanto a la **generación de biogás**, ya que si dejamos de lado la particularidad mencionada en **la muestra 3, se observa un aumento en la muestra 1 de un 44% y en la muestra 2 de un 10%**, más **no se observa una mejora en cuanto a la proporción de metano en cada una de ellas**.

Realizar un tratamiento previo reduce el tiempo de adaptación de las bacterias, aumentando la velocidad de degradación de la materia orgánica y con ellos aumentando la velocidad de generación de biogás, lo que resulta beneficio en el **tiempo de retención**, ya que este último al disminuir provoca que el sustrato este menos tiempo

dentro de un biodigestor, permitiendo que el volumen del biodigestor sea más compacto.

6.2 Recomendaciones.

Si bien es cierto que la biomasa estudiada resultó ser potencialmente metanogénica, dicho porcentaje aún es bajo si se compara con otra biomasa, tales como las mismas heces o biomasa de origen vegetal. Se puede mejorar el rendimiento ya sea probando otra co-digestión con otro sustrato, utilizar otra biomasa algal con mejores propiedades o bien evaluar realizar otro tipo de tratamiento previo.

Dentro de los ensayos realizados, resulta ser más confiable el de BMP con frascos Serum, ya que estos poseen un sello más hermético que en el caso de botella invertida que induce más error humano y experimental debido a que el sello de este último se realiza aplicando silicona que se ve afectada por las condiciones de humedad y temperatura del ensayo, por lo que si se decide realizar se debe tener en consideración este punto.

Del análisis de cromatografía realizando en el campus San Joaquín, se realiza la recomendación a Casa Central, de la misma UTFSM, el cambiar el tipo de sello de aluminio de los frascos Serum por otro más hermético que impide el paso de aire dentro de la muestra que se encuentra actualmente en el mercado.

CAPÍTULO 7

7. Trabajos Futuros.

A partir de este trabajo se desprenden los siguientes trabajos futuros:

- Evaluar la factibilidad técnica-económica, y como afecta en la producción de biogás, el realizar diferentes pre-tratamientos a la biomasa algal.
- Realizar el diseño y la factibilidad técnica- económica de la instalación de un biodigestor solar térmico en el LER de la UTFSM, sede Viña del Mar.
- Evaluar el uso de otras especies de biomasa algal endémicas de Chile para la generación de biogás combustible.
- Evaluar el uso del biogás generado a partir de biomasa algal, ya sea como aplicación directa en un proceso o como aditivo en otro combustible.

8. Referencias

- Aiyuk, S., Amoako, J., Raskin, L., Van Haandel, A., & Verstraete, W. (2004). Removal of carbon and nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept. En J. Amoako, L. Raskin, A. Van Haandel, & W. Verstraete, *nutrients from domestic wastewater using a low investment, integrated treatment concept*. (págs. 3031-3042). Water research.
- Analytic, B. (s.f.). *biocombustibles*. Obtenido de Beta Analytic Web site: <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/biodiesel-biomezclas.html>
- AQUAE FUNDACIÓN; WIKI EXPLORA. (s/f). *Wiki Explora: Aquae fundación*. Obtenido de Aquae fundación Web site: https://www.fundacionaquae.org/wiki-explora/41_algas/index.html
- Asociación de Generadoras de Chile. (2019). *Boletín del mercado eléctrico sector generación*. Santiago: Dirección de estudios y contenidos Generadoras de Chile.
- Burgos, A. D. (2013). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia)*. Bolivia.
- Cuesta, M., Martín, F., Vicente, G., & Villar, S. (s.f.). *Informe de Vigilancia Tecnológica madri+d*. Madrid: Fundación madri+d para el Conocimiento.
- Cummins Engines. (Septiembre de 2017). Obtenido de <https://cumminsengines.com/dual-fuel>

- de Lucas, A., & del Peso, C. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. En A. de Lucas, & C. del Peso, *Bloque 1: Materias Primas* (págs. I-8 - I-9). ITAGRA.CT.
- EBA. (s.f.). *Producir energía con la biomasa*. Obtenido de Estructuras bioclimáticas avanzadas S.L Web Site: <http://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/>
- FAO. (2004). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura parte 3*. Roma: Grupo de la producción y diseño editorial Servicio de Gestión de las Publicaciones FAO.
- FAO. (2018). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*. Roma.
- Fernández Rey, J. (s.f). *Energía de la biomasa: tipos de biomasa y su aprovechamiento energético*. Ciudad Habana: Centro de Inmunología Molecular.
- Flórez, D. (s.f.). *Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural-Syngas en quemadores de pre mezcla de régimen laminar: Un artículo de revisión*. Medellín.
- Galizia, A. G. (2013). *México Patente nº WO 2013/089544 A1*.
- Garay, O. (2011). *Análisis técnico - económico de una planta de generación eléctrica en base a biogás*.
- ICYT. (2014). *Informe Final: "Incorporación de la industria alimentaria de consumo humano directo como fuente de agregación de valor para las macroalgas nacionales"*. Puerto Montt: Universidad Arturo Prat.
- IDAE. (Octubre de 2007). *idae.es*. Obtenido de IDAE Web site: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

- Lopez Gajardo, M. F. (2016). *Diseño de un sistema de pre-mezcla e inyección de biogás con gas natural para tecnología de generación termo-eléctrica*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Mansilla, A. (2017). *Investigando las propiedades de las macroalgas y uso sustentable de M.Pyrifera*. Magallanes : Universidad de Magallanes Chile, IEB.
- Mella, V. (2016). *Análisis técnico y financiero del uso de residuos orgánicos de una cervecería artesanal para la producción de biogás con apoyo de energía solar*. Valparaíso : UTFSM.
- Montalvo, S., & Guerrero, L. (s.f.). *Tratamiento anaerobio de residuos*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Saravanan N, N. G. (2010). Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with diesel as an ignition source. *Applied Energy* 87, 2218-29.
- SERNAPESCA. (2017). *Informe Final Control Cuota Algas Pardas III Y IV Región, año 2017*. Santiago: Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura.
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. (2018). *Informe sectorial de pesca y acuicultura, agosto del 2018*. Santiago de Chile.

9. Anexos

9.1 Anexo 1: Funcionamiento de biodigestor propuesto por Alejandro Galizia.

El biodigestor es un tanque con tapa roscada en su parte superior o cerrado, preferentemente de algún tipo de polímero, con al menos un tubo de entrada en donde entra la materia orgánica, que se encuentra en la parte lateral inferior del biodigestor. El tubo de descarga se encuentra en la parte lateral superior opuesta al del tubo de entrada, con un ángulo de 45° que funciona como una trampa para mantener el nivel de sustrato dentro del biodigestor.

El sustrato es depositado en un drenador y a través de una malla colocada en la parte superior de este y un colador poroso situado en la parte inferior, separan la humedad del sustrato saliente para su posterior aprovechamiento como composta o fertilizante.

Dentro del biodigestor se encuentra el serpentín, desde la parte superior hasta el fondo de este, para homogenizar la distribución térmica de calor y es alimentado de agua por un inyector de corriente de agua caliente situado en la parte superior del biodigestor.

El agua sale por una descarga de corriente de agua tibia ubicada en la parte inferior del biodigestor. El serpentín permite elevar y mantener la temperatura del sustrato para iniciar el proceso de fermentación del desecho orgánico. Esta temperatura es registrada por un medidor de temperatura colocado en la parte lateral central del biodigestor.

El calor para llevar a cabo este proceso es suministrado por una fuente de calor, y esta puede ser un calentador solar, una caldera, un banco de resistencias

eléctricas o algún combustible que produzca calor. El calor eleva la temperatura del agua y esta es desplazada por diferencia de densidades a una tubería de salida de la fuente de calor para alimentar el inyector de corriente de agua caliente. Esta corriente es controlada a través de una válvula de paso situada en la tubería de salida de la fuente de calor y el agua que pasa por el serpentín es descargada hacia una tubería de entrada de la fuente de calor que se encuentra en el lado opuesto a la tubería de salida, con la finalidad de recircular el agua y evitar su desperdicio.

Este proceso hace homogénea la temperatura dentro del biodigestor y permite que el biogás generado por la descomposición natural ascienda hacia una brida de descarga ubicada en la parte superior del biodigestor, a través de la cual el biogás es conducido hacia un filtro por medio de un inyector situado en la parte lateral inferior del filtro.

El filtro, que está configurado con barreras escalonadas de cal y hierro, permite disminuir las impurezas que el biogás pueda contener y sale por una descarga ubicada en la parte lateral superior hacia una tubería de entrada al tanque de almacenamiento. Dicho tanque es un contenedor rígido el cual en su parte superior está provisto con una válvula de alivio que desfoga el biogás si es excedida la presión máxima de operación.

Para el aprovechamiento del biogás, el tanque de almacenamiento tiene una tubería de descarga colocada en la parte superior del mismo y la cual conduce el biogás hacia un generador de energía eléctrica a través de un inyector de biogás, para su posterior combustión.

9.2 Anexo 2: Procedimientos laboratorio de RILES, UTFSM, Casa Central para la caracterización de sólidos

Determinación sólidos totales:

Procedimiento

Colocar los crisoles en la estufa a una temperatura de alrededor de 105[° C] durante una hora.

Retirar los recipientes con una pinza y dejar enfriar en la desecadora.

Masar cada recipiente en la balanza analítica.

Agregar 10 ml. de muestra bien homogeneizada a cada recipiente.

Colocar los recipientes en la estufa a 105 [° C] durante una hora.

Enfriar en desecador para equilibrar la temperatura y pesar. Repetir procesos de secado, enfriado, desecación hasta obtener un peso constante.

Cálculos

$$ST\left[\frac{mg}{L}\right] = \frac{P_f - P_i}{V_{muestra}} * 1000$$

Dónde:

ST: Concentración sólidos totales (masa/volumen)

P_f: Peso final del recipiente con la muestra seca (masa)

P_i: Peso del crisol (tara)

V muestra: Volumen de la muestra agregada (volumen)

Determinación de sólidos totales volátiles:

Procedimiento:

1 Colocar el crisol que contiene los sólidos totales secos en el horno a una temperatura de 550[° C] por una hora.

1.2 una vez concluido el tiempo, sacar el crisol de la mufla y dejar por unos minutos a temperatura ambiente (dos minutos), enfriar en desecador hasta equilibrar temperatura. Pesar el crisol.

1.3 colocar nuevamente en la estufa por un tiempo determinado, ambas pesadas no varían en más de 0,1 g se asume peso constante. De lo contrario repetir proceso.

Cálculos

$$STv[\frac{mg}{L}] = \frac{P_f - P_{fv}}{V_{muestra}} * 1000$$

Dónde:

STv: Concentración sólidos totales volátiles

Pf: Peso final del crisol más muestra seca

Pfv: Peso del crisol (tara)

V muestra: Volumen de la muestra agregada

Determinación de sólidos suspendidos totales:

Procedimiento:

Preparación del disco de fibra de vidrio:

1 Colocar el disco en el aparato de filtración, aplicar vacío y lavar con tres porciones sucesivas de 20 ml de agua destilada.

1.1 Continuar la succión para remover totalmente el agua, y descartar el agua de lavado.

1.3 Sacar con pinzas el filtro del aparato de filtración y colocarlo sobre una placa Petri o acero inoxidable que servirá como soporte. Secar en estufa a 103 [°C] – 105[°C], durante una hora

1.4 Enfriar en desecador y pesar. Registrar masa B.

1.5 Repetir procedimiento indicado en 1.3 y 1.4 hasta obtener masa constante. En caso de no ocupar inmediatamente almacenar en desecador.

Selección del filtro y tamaño de muestra

1.6 El volumen de muestra debe ser tal, que el residuo seco obtenido tenga una masa entre 2,5 mg y 200 mg

1.7 Si el tiempo utilizado en la filtración es mayor a 10 min, es necesario aumentar el diámetro del filtro o disminuir el volumen de muestra a tomar.

Procedimiento de análisis

- 1.8 Colocar el filtro preparado de acuerdo a en el aparato de filtración y aplicar vacío.
- 1.9 Humedecer el filtro con una pequeña porción de agua destilada.
- 1.10 Filtrar un volumen medido (v) de muestra homogeneizada a través del filtro de fibra de vidrio.
- 1.11 Lavar con tres porciones sucesivas de 10 ml de agua destilada y continuar la succión por aproximadamente 3 min después que la filtración se ha completado.
- 1.12 Sacar con pinzas el filtro del aparato de filtración y colocarlo sobre la placa Petri o de acero inoxidable.
- 1.13 Secar el filtro por una hora en la estufa a 103 [°C]– 105[°C].
- 1.14 Enfriar en desecador y pesar. Registrar masa A.
- 1.15 Repetir el procedimiento indicado en **1.13** y **1.14** hasta obtener masa constante.

Cálculos

$$SSt\left[\frac{mg}{L}\right] = \frac{A - B}{v} * 1000$$

Dónde:

SSt = Sólidos suspendidos totales (mg/L)

A = masa del filtro más residuo seco, mg, obtenida en 1.14

B = masa del filtro, mg, obtenida en el 1.4

v = volumen de muestra utilizado, ml, en 1.10

Determinación Sólidos Suspendidos Volátiles

Procedimiento

Doblar cuidadosamente el papel filtro obtenido en la determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y colocarlo en un crisol previamente tarado.

Poner el crisol en la mufla por una hora a 550 [°C]

Dejar en el desecador y pesar cuando se encuentre frío.

Cálculos

$$SSV[\frac{mg}{L}] = \frac{Msst - (Tcm - Tc)}{vm} * 1000$$

Dónde:

Msst = masa del papel filtro obtenido de SST, (mg)

T_{cm} = Tara del crisol más la muestra calcinada, (mg)

T_c = Tara crisol, (mg)

V_m = Volumen de muestra

9.3 Anexo 3: Procedimientos laboratorio de RILES, UTFSM Casa Central para la medición de DQO.

Determinación de DQO total por titulación directa

Equipos y materiales

- Bureta graduada 50 m L
- Tubos digestores
- Digestor con la capacidad de llegar a 150 °C.
- Matraz Erlenmeyer 50 mL .
- Material de uso común en laboratorio.

Reactivos y soluciones

- Ácido sulfúrico concentrado
- Dicromato de potasio
- Sulfato de hierro II y amonio (FAS)
- Ferrioxina indicador

Solución digestora

Se disuelven en 500mL agua destilada las siguientes cantidades de reactivos:

-10,216 g Dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$, previamente secado por dos horas a $105^\circ C$.

-167 mL de ácido sulfúrico concentrado.

-33,3 gramos de sulfato de mercurio $HgSO_4$ (esta cantidad depende de la cantidad de cloruros presentes en la muestra la cual debe ser de una relación $HgSO_4:Cl^-$ igual o superior a 10:1

-Dejar enfriar y aforar.

Solución catalítica

Disolver en un litro de ácido sulfúrico 10,7 gramos de sulfato de plata ($AgSO_4$) dejando en agitación por 48 horas.

Solución patrón Dicromato de Potasio (0,0250 N)

Disolver 1,2258 g de $K_2Cr_2O_7$, previamente secado en estufa durante dos horas a $105^\circ C$, aforar a 1 L.

Solución Sulfato ferroso amoniacal (FAS) (0,0250 N)

Disolver 9,8 g de $Fe(NH_4)_2(SO_4) \cdot 6H_2O$, en 500 mL de agua destilada, añadir cuidadosamente 20 mL de H_2SO_4 concentrado, dejar enfriar y aforar a 1L. Esta solución debe ser valorada diariamente solución patrón de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$).

Solución ferroína (indicador):

Disolver 1,486 gramos de 1,1 monohidrato de fenatrolina, junto con 0,695 gramos de sulfato de hierro heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), en 50 mL de agua destilada, aforar a 100mL.

Procedimiento

En un tubo de digestión limpio y seco se depositan, en orden indicado:

-1,5 mL de solución digestora.

-3,5 mL de solución catalítica.

-2,5 mL de muestra con DQO inferior a 900 mgO₂/L, en caso que la muestra presente una DQO elevada se debe diluir hasta el rango que el análisis permite.

-Sellar el tubo con teflón y luego cerrar herméticamente con la tapa.

-Agitar el contenido del tubo suavemente, colocar este en digestor durante dos horas a 150°C. (La cantidad de tiempo puede variar en el caso que las muestras se degraden fácilmente, esto se comprueba experimentalmente).

-Concluido el tiempo de digestión, enfriar los tubos a temperatura ambiente, posteriormente traspasar cuantitativamente a matraz Erlenmeyer de 50 mL, enjuagando el tubo con pequeñas porciones de agua (1 ó 2).

-Agregar al matraz una gota del indicador ferroína y valorar con FAS 0,025 N, hasta el viraje del indicador de verde-calipso o rojo rubi.

-Realizar el mismo procedimiento para el blanco, tomando 2,5 de agua destilada en lugar de muestra. Las muestras y los blancos son tratados de la misma manera.

Valoración del FAS

Se pipetea 10 ml de la solución patrón de dicromato 0,0250. Agregar 3mL de H₂SO₄, una gota de indicador y titular hasta el viraje de este. Anotar gasto. Realizar duplicado.

Calculo:

Normalidad FAS:

$$N_{fas} = \frac{10 * N_{patrón\ dicromato}}{V_{volumen\ fas\ consumidos\ en\ estadarización}}$$

$$DQO[mg/L] = \frac{(V_{blanco} - V_{muestra}) * 8000 * N_{fas} * F_{actordilución}}{2,5}$$

Para la DQO soluble es el mismo procedimiento, pero la muestra es filtrada previamente.

9.4 Anexo 4: Procedimiento Laboratorio de RILES UTFSM, Casa Central para la medición de pH.

pH (referencia)

Principios

La medición del pH se efectúa para controlar la estabilidad del reactor, al ser esta una variable crítica ya que al bajar de los 6,5, se considera que el medio se está acidificando y la población de bacterias podría disminuir al no estar en el rango óptimo de crecimiento, y por lo tanto su capacidad de degradación que las caracteriza disminuye, en este escenario se aumenta el pH agregando un exceso de bicarbonato para aumentar la alcalinidad de alimentación preparada para el reactor.

Este procedimiento se realiza a fin de verificar que el valor se mantenga entre 6 y 8, que es el rango que permite el crecimiento de *Thiobacillus Denitrificans* óptimamente.

Equipos y materiales:

-Vaso precipitado 100mL

-Pizeta.

-Soluciones calibración buffer pH 4, 7,10

- pH Thermo Scientific Orion 370 PerpHecT® LogR Meter

Procedimiento

-Efectuar calibración del pH metro entre las medidas de pH 7-10

-Sumergir electrodo y esperar a que se estabilice se anota la medida.

Cálculo:

Directamente de la lectura entregada por el equipo.

9.5 Anexo 5: Procedimiento laboratorio de RILES, UTFSM Casa Central para la determinación de nitritos.

Determinación de nitritos por método espectrofotométrico.

Principio

Se fundamenta en la base de la formación de un colorante azo purpura rojizo (compuesto azo), el cual se desarrolla en un pH ácido por acoplamiento de

sulfanilamida diazotizada con N-(1-Naftil)- etilendiamina dihidriclorada (diclorhidrato de NED).

El rango de aplicación de este método va desde los 10 a 1000 ug/L.

El sistema de color obedece la ley de Lambert-Beer hasta 180 ug/L con 1 cm de paso de luz a 543 nm.

El Colección, preservación y almacenaje de muestras:

Las muestras pueden colectarse en frascos de plástico o vidrio, no agregar preservantes ácidos, analizar dentro de un plazo máximo de 48 horas para prevenir la conversión bacterial de nitrito a nitrato, refrigerada a 4°C, de lo contrario congelar no más allá de 1-2 días.

Equipos y materiales

- Espectrofotómetro ultravioleta UV-VIS para trabajar entre 500-600 nm

- Celda de 1 cm de diámetro (se pueden utilizar celdas plásticas.

- Material de vidrio de uso habitual en laboratorio.

Reactivos y soluciones

- Agua exenta de nitrito

- Ácido fosfórico (Sigma Aldrich art. 100317)

- Sulfanilamida (Merck art. 100731)

-Permanganato de potasio (Merck art. 105084)

-N-(1-Naftil)- etilendiamina dihidriclorada (Merck art. 106237)

-Patrón Nitrito (Merck art. 106549)

Procedimiento

Preparación del reactivo.

Disolver 100 mL ácido fosfórico al 85% en 800 ml de agua destilada y 10 gramos de sulfanilamida, luego de disolver completamente agregar 1 gramo de N-(1-Naftil)-etilendiamina dihidriclorada, aforar a 1 litro en botella ámbar. Refrigerar.

Solución stock de nitrito.

Pipetear 0,1 mL de la solución patrón de NO_2 (1000 mg/L), y se aforran a 500 mL (esta solución tiene una concentración 200 ug/L).preparar en el momento

En caso de no contar con solución patrón, se deben disolver 1,232 gramos de NaNO_2 (1mL=250ug), previamente secado a 105 °C, por una hora, al menos y enfriar en desecador (20 minutos) y ser retrovalorado con permanganato de potasio. Aforar a 1000 mL.

Tratamiento de la muestra

Filtrar para eliminar cualquier solido suspendido con un filtro de membrana (filtro pirinola) de 0,45 μm , en caso de ser necesario.

Tomar 50 mL de muestra de agua y se agregan 2 mL de reactivo de color (reactivo de NED), dejar actuar por 10 minutos.

Medir la absorbancia a 543 nm de la muestra y de los estándares.

Cálculo

Directamente de la curva de calibración realizada, se debe contar dilución en caso de ser necesario.

Referencia

Standard Methods for the examination of water and wastewater 20th edition, method 4500-NO₂⁻ Colorimetric Method.

9.6 Anexo 6: Procedimiento laboratorio de RILES, UTFSM Casa Central para la determinación de fosfatos.

Determinación de fosfatos por espectrofotometría.

Principios:

En aguas naturales y residuales, el fósforo se encuentra mayormente en forma de fosfatos, los cuales son clasificados: ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y otros polifosfatos) y fosfatos enlazados orgánicamente. En su mayoría a causa de contaminación antropogénicas.

En este método, en medio ácido el molibdato de amonio y el tartrato doble de antimonio y potasio reaccionan con ortofosfato con formación de un heteropoliácido fosfomolibdico, el cual es reducido por el ácido ascórbico a azul de molibdeno, complejo azul intensamente coloreado. La absorbancia del complejo medida a una longitud de onda de 880 nm, resulta proporcional a la concentración de ortofosfatos en la muestra.

La conservación y almacenaje de muestras puede ser en envases de vidrio o polipropileno, el análisis debe realizarse dentro de 48 horas (muestra refrigerada), de lo contrario congelar no más allá de 4 días. Sino no se congela la muestra, debe ser almacenada en envase de vidrio.

No utilizar detergentes comerciales en el lavado de materiales, se debe hacer con HCl diluido y caliente y enjuagar varias veces con agua destilada.

Equipos y materiales

- Material común de vidrio, de uso en laboratorio, ejemplo volumétrico, vasos de precipitado.

- Espectrofotómetro ultravioleta UV-VIS para trabajar entre 800 a 900 nm

- Celda plástica de 1 cm de diámetro.

Reactivos y soluciones:

- Ácido sulfúrico pa. (Merck art. 100731)

- Tartrato de antimonio y potasio pa. (Merck art 108092)

- Molibdato de amonio pa (Merck art 101182)

- Ácido ascórbico pa (Merck art. 100127)

- Ácido clorhídrico 0,1 N

- Fosfato dihidrogenado de potasio pa. (Merck art. 104873)

- Solución de ácido sulfúrico 5N.

-Fenolftaleína.

-Solución patrón fosfato

Preparación de los reactivos

Solución de tartrato de antimonio y potasio:

Pesar 1,3715 g del reactivo en cristales. Se disuelven en 400 ml de agua en un matraz aforado de 500 mL y se afora. Se agita vigorosamente y se almacena en frasco ámbar, refrigerar.

Solución de molibdato de amonio:

Pesar 20 g de molibdato cristalizado y disolver en 500 ml de agua destilada y se almacena a 4°C.

Solución de ácido ascórbico 0,1M:

Pesar 1,7600 g de ácido ascórbico y disolver. Se lleva a matraz de aforo de 100 mL (duración máxima 1 semana).Refrigerar.

Solución reactivo combinado:

Pipetear en vaso de precipitado de 250 ml: 50 ml de ácido sulfúrico 5 N, 5 mL de solución tartrato de antimonio y potasio, 15 mL de molibdato de amonio y 30 mL de solución de ácido ascórbico. Esta solución es estable por 4 horas.

Solución de fosfato stock:

Pipetear 1 mL de la solución patrón de fosfato aforar a 100 mL, esta solución tiene una concentración de 10 mg/L de $\text{PO}_4\text{-P}$.

En caso de no contar con la solución patrón se pesan 219,5 mg de fosfato dihidrogenado de potasio anhidro, previamente secado en estufa y desecador. Se trasvasijan a matraz aforado de 1L y se diluyen.

Solución de fosfato estándar:

Pipetear 50 mL de solución de fosfato stock y se llevan a matraz aforado de 1L. Se afora.

Procedimiento

Tratamiento de la muestra:

Se recoge 1L de muestra de agua y se agregan 40 mg de HgCl_2 para preservarla en caso de ser necesario. Luego se filtra la muestra con filtro de membrana de 0,45 μm tipo HA.

Preparación curva de calibración

Tomar 1 mL de la solución stock de fosfato (1000 mg/L), aforar a 500 mL, esta solución tiene una concentración de 2 mg/L

Calcular estándares entre 0,15 a 1,30 mg/L aforar a 50mL.

Pipetear 50 mL del estándar en un matraz Erlenmeyer. Se repite esto con alícuotas de cada uno de los estándares preparados.

Preparar un blanco con una alícuota de 50 ml de agua destilada.

Agregar a cada matraz Erlenmeyer 1 o 2 gotas de fenolftaleína. Si se presenta coloración se acidifica con ácido sulfúrico 5N.

Pipetear 8 mL de reactivo combinado en cada matraz y se agita.

Reposar por 10 minutos y no superior a 30 minutos. Se debe desarrollar un color azul.

Medir en espectrofotómetro y se configura en una longitud de onda entre 880 y 900 nm.

Con la ayuda de un blanco se leen y registran los estándares, se construye la curva de calibración de absorbancia v/s concentración.

Para las muestras, se pipetea 50 ml en matraces Erlenmeyer, y se repiten los pasos de ajuste de pH y adición del reactivo combinado.

Se lee la muestra en el espectrofotómetro.

Cálculo

Directamente de la curva de calibración considerar dilución en caso de ser necesario.

Referencia

Standars Methods for the examination of water and wastewater 20th edition, 4500-P E. Ascorbic Acid Method.

9.7 Anexo 7: Procedimientos de ensayo de BMP, Laboratorio de RILES, UTFSM Casa Central.

Ensayo de biodegradabilidad anaerobia

Potencial biometanogénico de sustratos.

Los ensayos de BMP (Biomethane Potential) es un test utilizado para determinar la generación de biogás a partir de la digestión anaerobia de diversos residuos sólidos orgánicos. Estos ensayos son parámetros claves para evaluar temas de diseño, económicos y de gestión en la implementación a escala completa de los procesos de digestión anaerobia.

El proceso involucra las hidrólisis de carbohidratos, grasas y/o proteínas complejas de alto peso molecular en polímeros solubles por medio de la acción enzimática de bacterias hidrolíticas fermentativas y la conversión de estos polímeros en ácidos orgánicos, alcoholes, H_2 y CO_2 . Los ácidos grasos volátiles (AGV) y los alcoholes luego son convertidos a ácido acético por las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, y finalmente las bacterias metanogénicas convierten el ácido acético y el hidrógeno gaseoso en CO_2 y CH_4 . La estabilidad del proceso depende del balance crítico que existe entre el crecimiento simbiótico de los principales grupos metabólicos de bacterias i.e. las bacterias formadoras de ácidos, las acetogénicas obligadas a producir hidrógeno y a las metanogénicas.

El presente protocolo fue propuesto por Angelidaki *et al.*, (2009). A continuación se presentan los pasos necesarios para el desarrollo del test.

Sustrato

Se deben determinar los sólidos totales (ST) y volátiles (SV), la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno y fósforo. Luego, puede ser calculada la razón DQO/SV, la cual es típicamente consistente con las características de un sustrato dado.

Claramente, la determinación de la DQO para sustratos sólidos heterogéneos es difícil y abierta a algunas incertidumbres, por lo cual se recomienda en este caso triturar los sólidos de mayor tamaño con la ayuda de un mortero.

Toda la información relacionada con la caracterización del sustrato debe ser reportada en el informe del ensayo final.

En el caso de los residuos ácidos, se debe prestar atención durante el secado de las muestras, ya que los compuestos volátiles pueden ser perdidos durante la determinación de los sólidos totales.

El volumen efectivo ocupado por la mezcla líquida debe ser el 60% del volumen del frasco, por lo cual se dejan los otros 40 ml de éste para que se genere el biogás.

Caracterizar los SSV del sustrato y del inóculo

El sistema consta de un frasco serum de 100 ml tapado con un septum PTFE/Butyl y un sello hermético de aluminio, dentro del cual se tiene la mezcla sustrato-inóculo, tal como se aprecia en la Figura 1. De este modo, el biogás generado por la digestión anaerobia del residuo será acumulado en el headspace disponible de cada mini-reactor

Montaje de ensayos

Añadir a frascos serum de 100 ml una cantidad de inóculo **fija**, tal que la concentración del inóculo en los frascos sea alta en comparación a la del sustrato en términos de SSV (calcular cantidad luego de la caracterización de ambos).

Calcular y añadir cantidad de sustrato correspondiente a cada frasco.

Agregar agua (con solución tampón si fuese necesario) hasta completar los 60 ml, de manera de dejar 40 ml libres para el gas a generar.

Montar dos frascos “blancos” llenados solo con inóculo y agua para contrarrestar.

Aplicar a cada frasco un flujo constante de 3 [L/min] de nitrógeno por 30 segundos para remover el oxígeno presente y así generar el ambiente anaerobio.

Tapar y sellar herméticamente. Se cierran con tapón de goma de butilo que es sostenido en su lugar por medio de un precinto de aluminio.

Etiquetar frascos para llevar registro de las mediciones y dejar en baño termostático a 35°C con agitación constante.

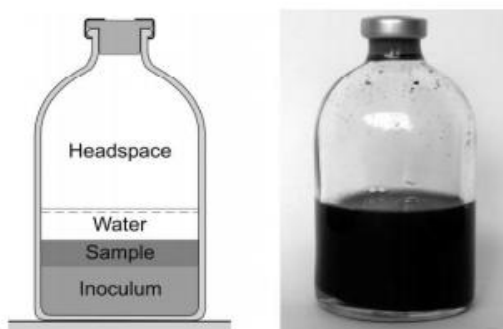


Figura 35: Esquema ensayo BMP

Medición de generación de metano

La variable principal a medir en esta investigación es la generación de metano en cada frasco, lo cual se realizará de la siguiente manera:

Calibración del presurímetro, se realiza para obtener la relación entre la señal de voltaje medida por el instrumento [mV] y la presión correspondiente [mmHg].

Tomar mediciones de presión con el presurímetro en cada frasco, durante los días que dure el ensayo.

Tomar muestras de gas de cada frasco para llevarlas a un cromatógrafo de gases y determinar su composición.

Calcular cantidad de metano generada utilizando ley de Dalton y ley de los gases ideales (mediciones a temperatura y presión ambiente).