



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

# PREFACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y SOCIAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS AGROPECUARIOS Y MACROALGAS PARA LA COMUNIDAD MAPUCHE JOSÉ PAINECURA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO E INGENIERO CIVIL EN  
BIOTECNOLOGÍA

ALEXANDER AUGUSTO POSADA VENERIO

PROFESORA GUÍA:  
MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARÍA SALAZAR AGUIRRE  
MARÍA GUERRA HEVIA

Este trabajo de título ha sido financiado por el Programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de  
Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile

SANTIAGO DE CHILE  
2021

---

# Resumen

Este trabajo de título consiste en una evaluación técnica, económica y social para la producción de biogás en co-digestión de purines de porcino y residuos algales para la comunidad Mapuche José Pinecura en la comuna de Carahue. Los objetivos específicos incluyen: evaluar las necesidades de gas combustible y la cantidad de residuos agrícolas y algales disponibles en la comunidad, caracterizar el sustrato adecuado a digerir, diseñar el proceso productivo de biogás considerando ambiente y comunidad, dimensionar un biodigestor anaeróbico y realizar evaluación económica-social del proceso productivo. Se inicia con un estudio de mercado de las macroalgas y purines de porcino, describiendo el potencial que estos residuos tienen en la producción de biogás para la comunidad Mapuche. Se identifican las necesidades energéticas, aprovechamiento eficiente de los recursos y su relación con el impacto ambiental. Se describe el proceso productivo de producción de biogás y condiciones operacionales que afectan su eficiencia y rendimiento.

La visita de terreno a la comunidad Mapuche José Painecura permite definir el formato del proceso productivo y la oportunidad de negocio. El formato consiste en instalar un biodigestor en una vivienda. La evaluación técnica considera un flujo de purines de porcino de  $23.980[g/d]$  y un flujo de descartes de algas secas de  $2.509[g/d]$ . El modelo planteado entrega un volumen de 1.011 litros, con un margen de seguridad del 20 % y una producción de metano de  $23[kg/mes]$ . Se sugiere la compra de un biodigestor comercial, cotizado en el mercado por un precio de \$266.500 de 1.100 litros de capacidad, al cual se recomienda instalar un filtro para la purificación del biogás. Además, se realizan las recomendaciones de instalación y operación.

Se realiza la caracterización del efluente, calculando las composiciones de salida del biogás y la corriente líquida. Con el balance de energía, se encuentra que para un biodigestor enterrado a  $2[m]$  en el subsuelo (aprovechando el gradiente geotérmico), la temperatura que se alcanza en invierno es de  $14^{\circ}C$ .

La evaluación económica privada entrega un VAN positivo para el caso base a  $25^{\circ}C$  de \$1.004.628, TIR de 47 % y PayBack de 1,5 años. El análisis de sensibilidad incluye tres alternativas, las cuales consisten en una combinación de reducción de sólidos volátiles y temperatura. Estos resultados señalan que el rendimiento económico se ve afectado a temperaturas inferiores a  $16^{\circ}C$ . Como propuesta a esta problemática se realiza una evaluación económica social general de la alternativa I, entregando un VAN positivo, ya sea con financiamiento o subsidio estatal. Además, se propone la instalación de un biodigestor a mayor profundidad para alcanzar temperaturas favorables de  $22^{\circ}C$ .

Se recomienda instalar el biodigestor cotizado con financiamiento estatal del 100 % a la comunidad Mapuche José Painecura, previo a algunos estudios experimentales y una evaluación económica social que identifique detalladamente los beneficios y externalidades del proyecto.

---

# Agradecimientos

A Dios por permitirme vibrar en armonía con el Universo. A mi Padre Emilio, a quien cada día miraba en la lejanía del cielo, sobre las puertas de Beauchef 850, el recuerdo de noches y días de sabiduría, ajedrez uniendo nuestros sueños, aquellos que sentí desvanecer, que con solo pensar en mi Padre querido en otra sintonía, mi corazón en agonía. Perseverando nuestros sueños vuelven y poco a poco en realidad se convierten. «Cómo no anhelar, pensarte y verte sosteniendo la respiración en una jugada desafiante, soltando entre lágrimas, esta vez derramadas en un camino de dicha, orgullo y alegría».

A mis hermanos: Franceska, Emilio, Sabrina y Celina, nos abrazamos, hasta en pensamientos, con corazones cálidos, un núcleo de fuerza y esperanza, desde nuestros inicios, un regalo tropical. A mi Nonna Emilia, quien me enseñó a soñar y mi Mamita Francisca, quien me enseñó la resiliencia, aire y tierra. A mi madre Juana, quien ahora entrega lo mejor de sí misma, un oasis de alivio de un camino cansado.

A Pablo Andrés, quien entregó a mi familia estabilidad y apoyo en momentos adversos. A mis amigos: José Miguel, Felipe, Luis Manuel, quienes me abrazaron en sus hombros, contención, tristezas y frustraciones, quienes confiaron y se quedaron conmigo hasta verme llegar a la meta. A mis amigos Nestor y Rob, ni la distancia limita su ayuda incondicional, nuestros reencuentros como el primer día, alimentan el cariño y futuros planes. A mi amigo Mapuche José Andrés, quien me rescató de largos periodos de estrés y ansiedad mediante caminatas, bicicleta, paseos y consejos.

A mi prima Alejandra y su hijo Nicolás, quienes me abrigaron en su hogar, formando parte de mi aprendizaje en Inglés, siendo cómplices de áureas experiencias, risas y anheladas proyecciones.

A mi amigo Jorge, quien conocí en Chicago en mi proceso de aprendizaje. Me entregó apoyo y confianza desde el primer instante. Nuestros caminos se cruzaron, en una laguna de recuerdos de seres amados que trascienden. Mi más profunda gratitud por compartir historias y respeto a su lucha.

A mi profesora María Elena Lienqueo, quien siempre admiré, por su hermosa energía, fortaleza, inteligencia y convicciones, aprendizajes que se integran a mi formación. Un especial agradecimiento al Programa de Pueblos Indígenas que me entregó herramientas intelectuales y económicas para el desarrollo de mi trabajo de título.

Difícil explicar en pocas palabras todo el sacrificio y perseverancia detrás de este gran camino que decidí tomar. Mis más cercanos sufrieron mi ausencia, ni llorar tras bambalinas calmaba la abrumadora presión sobre mi, sino más bien, debía secar aquellas lágrimas al instante, respirar profundo y volverme de acero. La función tenía que continuar, para nuevamente entrar en un bucle de vigilia y sobre exigencia. Se podría pensar erróneamente que odio Beauchef por “destruir” constantemente mis alas de volar por otras fronteras de la vida, cambiar mi cuerpo y pagar un alto costo de oportunidad, o por deglutir asaz indolencia e individualismo en la comunidad científica, docentes y profesionales del mañana. No obstante, piso ese suelo y mi mente se ilumina de conocimiento, que no tiene relación con inteligencia emocional. Me tomó tiempo asimilar la divergencia y entender la esencia del nexo, aquel que no tiene fórmula, aquel que germina de algunas semillas, con el cual pretendo propiciar una sociedad intelectualmente justa.

Por esto, llevo con orgullo tu estampa, gracias Beauchef por transformar mi mente.

# Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                      | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .                                   | 3         |
| <b>2. Objetivos y limitaciones</b>                          | <b>4</b>  |
| <b>3. Marco teórico</b>                                     | <b>5</b>  |
| 3.1. Contexto de las algas . . . . .                        | 5         |
| 3.1.1. Estado del arte de las algas . . . . .               | 5         |
| 3.2. Contexto de purines . . . . .                          | 6         |
| 3.2.1. Estado del arte del abono . . . . .                  | 7         |
| 3.3. Medio ambiente . . . . .                               | 7         |
| 3.3.1. Medio ambiente y metano . . . . .                    | 7         |
| 3.3.2. Medio ambiente y algas . . . . .                     | 8         |
| 3.3.3. Medio ambiente y abono . . . . .                     | 8         |
| 3.4. Producción de biogás . . . . .                         | 8         |
| 3.4.1. Consorcio de microorganismos . . . . .               | 9         |
| 3.5. Proceso productivo . . . . .                           | 11        |
| 3.5.1. Materia prima . . . . .                              | 12        |
| 3.5.2. Pre-tratamiento . . . . .                            | 13        |
| 3.5.3. Tipos de biodigestores . . . . .                     | 14        |
| 3.5.4. Factores que afectan el proceso productivo . . . . . | 14        |
| 3.5.5. Post-tratamiento . . . . .                           | 15        |
| 3.5.6. Producto . . . . .                                   | 16        |
| 3.5.6.1. Biogás . . . . .                                   | 16        |
| 3.5.6.2. Bioabono . . . . .                                 | 17        |
| 3.6. Evaluación de proyectos . . . . .                      | 17        |
| 3.6.1. Análisis FODA . . . . .                              | 17        |
| 3.6.2. Retorno de la inversión (Payback) . . . . .          | 17        |
| 3.6.3. Valor actual neto (VAN) . . . . .                    | 18        |
| 3.6.4. Tasa interna de retorno (TIR) . . . . .              | 18        |
| 3.7. Marco legal . . . . .                                  | 18        |
| <b>4. Justificación, Oportunidad y contexto</b>             | <b>20</b> |
| <b>5. Metodología</b>                                       | <b>22</b> |
| <b>6. Evaluación técnica, resultados y discusión</b>        | <b>23</b> |
| 6.1. Caso base . . . . .                                    | 23        |
| 6.2. Materia prima . . . . .                                | 23        |
| 6.3. Pre-tratamiento . . . . .                              | 23        |
| 6.4. Dimensionamiento del biodigestor . . . . .             | 24        |
| 6.4.1. Ecuación de diseño . . . . .                         | 24        |
| 6.4.2. Parámetros y cinética de crecimiento . . . . .       | 24        |
| 6.5. Flujo de metano, gases de salida y agitación . . . . . | 26        |
| 6.6. Post-tratamiento . . . . .                             | 28        |
| 6.6.1. Esponja de hierro . . . . .                          | 28        |
| 6.6.2. Filtración con medio filtrante KDF 85 . . . . .      | 28        |
| 6.6.3. Filtro de carbón activado . . . . .                  | 28        |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.6.4. Bioabono . . . . .  | 29        |
| <b>7. Biodigestor, instalación y condiciones de operación</b>              | <b>30</b> |
| 7.1. Componentes del biodigestor . . . . .                                 | 30        |
| 7.2. Instalación del Biodigestor . . . . .                                 | 31        |
| 7.3. Modo de operación . . . . .   | 32        |
| 7.4. Efluentes . . . . .   | 32        |
| 7.5. Recomendaciones . . . . .   | 32        |
| <b>8. Marco legal y financiamiento</b>                                     | <b>34</b> |
| 8.1. Marco legal . . . . .   | 34        |
| 8.2. Financiamiento . . . . .  | 34        |
| <b>9. Evaluación económica-social y discusión</b>                          | <b>35</b> |
| 9.1. Modelo Canvas . . . . .   | 35        |
| 9.2. Análisis FODA . . . . .   | 35        |
| 9.3. Evaluación económica privada y análisis de sensibilidad . . . . .     | 36        |
| 9.3.1. Caso base . . . . .   | 36        |
| 9.3.2. Alternativa I . . . . .   | 37        |
| 9.3.3. Alternativa II . . . . .  | 37        |
| 9.3.4. Alternativa III . . . . .   | 38        |
| 9.4. Evaluación económica social . . . . .                                 | 39        |
| 9.4.1. Alternativa I: Fondo Estatal . . . . .                              | 40        |
| 9.4.2. Alternativa I: Subsidio . . . . .                                   | 40        |
| <b>10. Conclusiones y recomendaciones</b>                                  | <b>42</b> |
| 10.1. Conclusiones . . . . .   | 42        |
| 10.2. Recomendaciones a la comunidad Mapuche José Painecura . . . . .      | 44        |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>45</b> |
| <b>Anexo A. Reacciones de acetogénesis y metanogénesis</b>                 | <b>50</b> |
| <b>Anexo B. Temperatura</b>  | <b>50</b> |
| B.1. Temperatura para microorganismos . . . . .                            | 50        |
| B.2. Temperatura del subsuelo . . . . .                                    | 51        |
| <b>Anexo C. Visita de terreno</b>  | <b>52</b> |
| <b>Anexo D. Caracterización del sustrato</b>                               | <b>54</b> |
| <b>Anexo E. Co-digestión de purines de pollo y paja de trigo</b>           | <b>57</b> |
| <b>Anexo F. Dimensionamiento del biodigestor</b>                           | <b>58</b> |
| F.1. Balance global . . . . .  | 58        |
| F.2. Balance de biomasa . . . . .  | 59        |
| F.3. Balance de sustrato . . . . .   | 59        |
| F.4. Balance de producto . . . . .   | 60        |
| F.5. Parámetros y cinética de crecimiento de los microorganismos . . . . . | 60        |
| F.6. Cálculo del rendimiento $Y_{P/S}$ y flujo másico de metano . . . . .  | 61        |
| <b>Anexo G. Energía y temperatura</b>                                      | <b>64</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Anexo H. Composición de metano</b>        | <b>66</b> |
| <b>Anexo I. Criterios de diseño</b>          | <b>68</b> |
| <b>Anexo J. Agitación</b>                    | <b>68</b> |
| <b>Anexo K. Efluentes</b>                    | <b>69</b> |
| K.1. Balances de masa . . . . .              | 70        |
| K.2. Caracterización del efluente . . . . .  | 71        |
| <b>Anexo L. Biodigestor marca Durman®</b>    | <b>72</b> |
| L.1. Partes y dimensiones . . . . .          | 72        |
| L.2. Recomendaciones de excavación . . . . . | 72        |
| <b>Anexo M. Evaluación Económica privada</b> | <b>73</b> |
| M.1. Caso base . . . . .                     | 73        |
| M.2. Alternativa I . . . . .                 | 74        |
| M.3. Alternativa II . . . . .                | 74        |
| M.4. Alternativa III . . . . .               | 75        |
| <b>Anexo N. Evaluación Económica Social</b>  | <b>75</b> |
| N.1. Alternativa I: Fondo estatal . . . . .  | 76        |
| N.2. Alternativa I: Subsidio . . . . .       | 77        |
| <b>Anexo Ñ. Propiedades de mezcla</b>        | <b>77</b> |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| 1. Capacidad instalada y generada de ERNC al sistema eléctrico el mes de febrero del 2021 [6]. . . . .  | 2  |
| 2. Desembarque pesquero nacional: Período 2000-2018. Fuente: Sernapesca. . . . .  | 6  |
| 3. Esquema general de las etapas metabólicas en la digestión anaeróbica [24]. . . . .   | 11 |
| 4. Diagrama de bloques para la producción de biogás. Fuente: Elaboración propia. . . . .  | 12 |
| 5. Ubicación geográfica de la comunidad José Painecura [36] . . . . .   | 20 |
| 6. Esquema de la metodología del proyecto. El esquema contempla cinco etapas generales: Idea del proyecto, Estudio técnico/mercado (búsqueda bibliográfica), oportunidad de negocio, Evaluación técnica/económica (teórico) y análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia . . . . .  | 22 |
| 7. Producción de biogás $B[L/gSV]$ en función de los días a distintas temperaturas [27]. Esto a partir de la digestión anaeróbica de <i>Laminaria digitata</i> . . . . .  | 24 |
| 8. Variación de $\mu_{max}$ respecto a la temperatura a partir de la digestión anaeróbica de <i>Laminaria digitata</i> . . . . .  | 26 |
| 9. Esquema del biodigestor y sus componentes. 1. Tubería de entrada. 2. Tubería de salida del biogás (respiradero). 3. Acceso para registro y limpieza. 4. Tubería de salida. 5. Biodigestor de polietileno. 6. Tubería de extracción de lodos. 7. Caja de registro de lodos. 8. Base de concreto. 9. Relleno (en capas de 0,2 [m]). 10. Capa de mortero reforzado con malla. [50]. . . . . | 30 |
| 10. Campo de infiltración [48]. . . . .   | 31 |
| 11. Análisis FODA. . . . .  | 36 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 12.  | Flujo de caja caso base. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos, ya que equivalen a los mismos valores que los otros periodos. . . . .    | 37 |
| B.1. | Tasa de crecimiento relativo de microorganismos Piscrófilos, Mesófilos y Termófilos [8].   | 51 |
| B.2. | Evolución de la temperatura respecto a la profundidad del suelo [8]. . . . .   | 52 |
| C.1. | Ubicación geográfica de la comunidad José Painecura [36] . . . . .   | 53 |
| C.2. | Borde costero de la comunidad José Painecura. . . . .  | 53 |
| C.3. | vista superior del lugar de extracción de algas en la comunidad José Painecura. . . .  | 54 |
| E.1. | Producción de biogás B [L/kg SV] en función de los días [27]. . . . .  | 57 |
| E.2. | Producción de biogás B [L/kg SV] en función de los días para distintas proporciones de paja de trigo (RS) y purines de pollo (CM)[10]. . . . . | 58 |
| F.1. | Ajuste lineal de los datos experimentales a 25°C. . . . .  | 62 |
| G.1. | Corte transversal del biodigestor con las capas de transferencia de calor y representación de las resistencias asociadas. . . . .              | 65 |
| J.1. | Correlación entre el número de potencia y el Reynold para tres tipos de turbinas. . .  | 69 |
| L.1. | Partes del biodigestor Durman. . . . .   | 72 |
| M.1. | Flujo de caja caso base. . . . .   | 74 |
| M.2. | Flujo de caja Alternativa I. . . . .   | 74 |
| M.3. | Flujo de caja Alternativa II. . . . .  | 75 |
| M.4. | Flujo de caja Alternativa III. . . . .   | 75 |
| N.1. | Flujo de caja social de la Alternativa I, considerando financiamiento estatal. . . . .   | 77 |
| N.2. | Flujo de caja social de la Alternativa I, considerando subsidio del 90 %. . . . .  | 77 |

## Lista de Tablas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | Composición de algas pardas de mayor interés comercial. Porcentaje expresado en base seca [15]. . . . .   | 5  |
| 2.  | Composición de purines utilizadas para producción de biogás. Promedios expresado en base seca [8]. . . . .  | 7  |
| 3.  | Contribución relativa de los gases al efecto invernadero [8]. . . . .   | 7  |
| 4.  | Características generales del biogás [15]. . . . .  | 9  |
| 5.  | Ejemplos de bacterias que participan en las etapas [8]. . . . .   | 11 |
| 6.  | Producción de biogás teórica de algunos compuestos orgánicos [8]. . . . .   | 12 |
| 7.  | Rendimientos promedios teóricos en la producción de biogás a partir de algunas materias primas [26][27]. . . . .  | 13 |
| 8.  | Rendimientos promedios teóricos en la producción de biogás a partir de algunas materias primas [10][28]. . . . .  | 13 |
| 9.  | Ventajas y desventajas de algunos tratamientos físicos, químicos y biológicos. [9]. . .   | 14 |
| 10. | Composiciones usuales de algunos compuestos del biogás [26]. . . . .  | 16 |
| 11. | Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de $C$ , $H$ , $O$ , $N$ y $S$ están calculados respecto a los $SV$ . . . . .   | 23 |
| 12. | Resumen de parámetros cinéticos a distintas temperaturas. . . . .   | 25 |
| 13. | Resumen de parámetros de diseño. . . . .  | 27 |
| 14. | Flujos máxicos y composición del gas a partir del flujo de metano calculado. . . . .  | 27 |
| 15. | Flujos máxicos en la corriente de efluente. $M_E$ : Flujo máxico total del efluente. $M_{E,SV}$ : Flujo máxico de sólidos volátiles en el efluente. $M_{E,H_2O}$ : Flujo máxico de agua en el efluente. $M_{E,C}$ : Flujo máxico de carbono en el efluente. $M_{E,N}$ Flujo máxico de nitrógeno en el efluente. . . . . | 29 |
| 16. | Caracterización del efluente. $R_C$ y $R_N$ es la reducción de carbono y nitrógeno respectivamente, en relación al carbono y nitrógeno de la corriente de entrada $M_T$ . . . .   | 29 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 17.  | Eficiencia de remoción del biodigestor Rotoplás [50]. . . . .  | 32 |
| 18.  | Modelo Canvas. . . . .   | 35 |
| 19.  | Conceptos y precios. . . . .   | 36 |
| 20.  | Indicadores económicos del caso base. . . . .  | 37 |
| 21.  | Indicadores económicos de la alternativa I. . . . .  | 37 |
| 22.  | Indicadores económicos de la alternativa II. . . . .   | 38 |
| 23.  | Indicadores económicos de la alternativa III. . . . .  | 38 |
| 24.  | Valor actual neto en función de la temperatura. . . . .  | 39 |
| 25.  | Criterio de ejecución de proyecto social y privado [52]. . . . .   | 39 |
| 26.  | Indicadores económicos de la alternativa I con fondo estatal. . . . .  | 40 |
| 27.  | Indicadores económicos de la alternativa I con subsidio. . . . .   | 41 |
| A.1. | Reacciones de acetogénesis [58]. . . . .   | 50 |
| A.2. | Reacciones de metanogénesis [58]. . . . .  | 50 |
| B.1. | Rangos de temperatura y tiempos de retención hidráulico (THR) [8]. . . . .   | 51 |
| D.1. | Composición y caracterización de las macroalgas [27]. . . . .  | 55 |
| D.2. | Composición y caracterización de purines de porcino [26]. . . . .  | 55 |
| D.3. | Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de $C, H, O, N$ y $S$ están calculados respecto a los $SV$ . . . . . | 56 |
| F.1. | Resumen de parámetros cinéticos. . . . .   | 63 |
| H.1. | Moles calculados con la ecuación de Buswell y Boyle. . . . .   | 67 |
| H.2. | Moles, gramos y composiciones teóricas. . . . .  | 67 |
| H.3. | Flujos másicos y composición del gas a partir del flujo de metano calculado. . . . .   | 67 |
| I.1. | Fuentes de información distintas a las bibliográficas. . . . .   | 68 |
| I.2. | Criterios de diseño. $SV$ se refiere a los sólidos volátiles, $L_{CH_4}$ a los litros de metano y $d$ a los días . . . . .     | 68 |
| I.3. | Pesos moleculares. . . . .   | 68 |
| K.1. | Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de $C, H, O, N$ y $S$ están calculados respecto a los $SV$ . . . . . | 71 |
| L.1. | Algunas dimensiones del biodigestor Durman. . . . .  | 72 |
| L.2. | Radio del biodigestor y los rellenos. . . . .  | 73 |
| M.1. | Conceptos y precios. . . . .   | 73 |
| N.1. | Factores de corrección [61]. . . . .   | 76 |
| N.2. | Conceptos y precios. . . . .   | 76 |
| Ñ.1. | Correlación para calcular la densidad ( $\rho$ ). . . . .  | 78 |
| Ñ.2. | Correlaciones para calcular el calor específico $c_p$ . . . . .  | 78 |
| Ñ.3. | Correlaciones para calcular la conductividad térmica ( $k$ ). . . . .  | 78 |
| Ñ.4. | Composición de purines y Huiro en base seca. La cuarta columna es el promedio de las composiciones [8][15]. . . . .            | 78 |
| Ñ.5. | Composición de purines y Huiro. . . . .  | 79 |
| Ñ.6. | $\rho, c_p$ y $k_{mezcla}$ calculados. . . . .   | 79 |



# 1. Introducción

Chile es el país más centralizado de América Latina, un fenómeno político-social que contribuye a los altos niveles de desigualdad [1]. Este fenómeno se encuentra contemplado en el enfoque de pobreza multidimensional de la agenda 2030 de desarrollo sostenible por la ONU. En el año 2017 la región de la Araucanía alcanzó niveles de pobreza del 25,4%, medido en cuatro dimensiones: educación, trabajo y seguridad, salud y vivienda [2]. Esta brecha se acentúa en comunidades rurales mapuches, donde los lineamientos del estado de Chile respecto a los derechos de las comunidades indígenas han legitimado la pobreza, debido a la ocupación de sus tierras y actividades económicas incompatibles con su cultura y estilo de vida [3].

La comunidad mapuche José Painecura se ubica en la región de la Araucanía a 45 km al oeste de la comuna de Carahue. En ella, residen 44 familias dedicadas en su gran mayoría a la agricultura de auto consumo, recolección de algas y mariscos [4]. La comunidad trabaja en conjunto al programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para formar de manera integral a sus profesionales. Al entendernos como parte de la naturaleza, se asume una postura y cosmovisión de respeto, evaluando soluciones integrales, innovadoras y sustentables que impulsan el desarrollo mutuo de la comunidad y la facultad [5].

La demanda de combustibles fósiles, su escasez y contaminación ambiental han concentrado los esfuerzos por la búsqueda de nuevas fuentes de energía. La combustión a leña es de las principales fuentes de contaminación local de la zona centro-sur de Chile, representando un 82% de todas las emisiones de material particulado fino y casi un 10% de las emisiones de óxidos de nitrógeno [6]. Las energías renovables no convencionales (ERNC) buscan disminuir la huella de carbono en comparación a las energías convencionales. Las ERNC incluyen: la térmica, hídrica, eólica, solar, biomasa y geotermia. Las políticas públicas en Chile entre el 2008 y el 2021 han impulsado el desarrollo de ERNC, alcanzando un creciente aumento del 18,8% [7]. En la Figura 1 se muestra la capacidad instalada y generada de ERNC en Chile al mes de febrero del 2021 [6].

Un campo poco explotado de las ERNC es la generación de energía eléctrica a partir de biomasa, la cual alcanza un 1,7% de capacidad instalada en Chile [6]. La producción de biogás a partir de biomasa presenta ventajas respecto a otras ERNC al no requerir grandes áreas de terreno para su implementación, además de generar valor agregado, esto por el manejo de desechos orgánicos que contribuyen a la contaminación ambiental. Los descartes de algas y el estiércol de porcino, constituyen residuos orgánicos que pueden utilizarse como materia prima para la producción de biogás. Dentro de sus ventajas se incluye el manejo de residuos orgánicos locales, producción de energía en zonas de difícil acceso, aprovechamiento eficiente de los recursos, disminución de la huella de carbono y gases que contribuyen al efecto invernadero.

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica, aunque, se debe tener en cuenta que los residuos orgánicos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico [8].

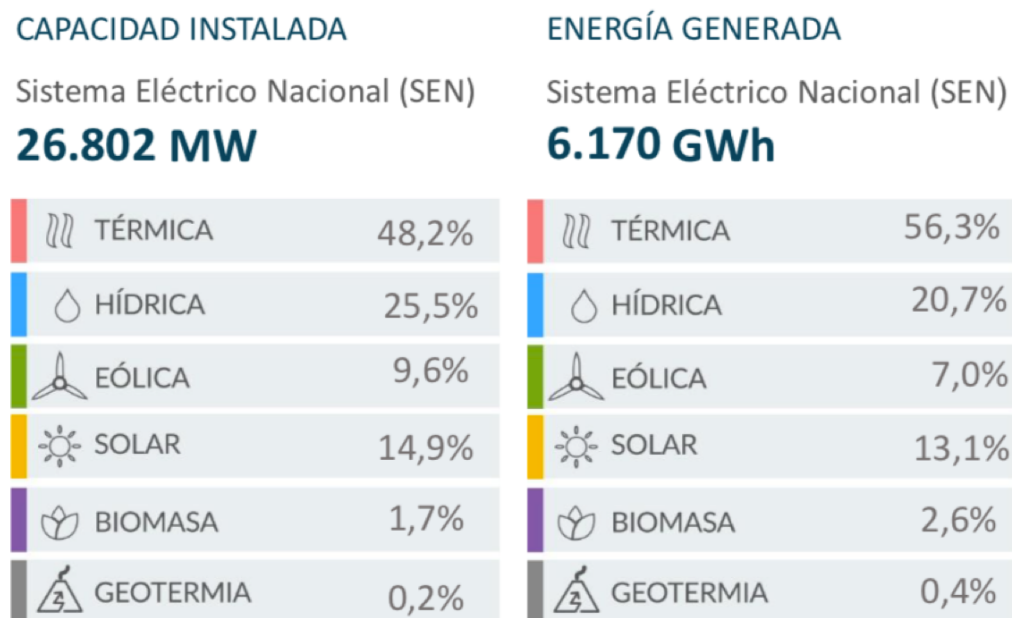


Figura 1: Capacidad instalada y generada de ERNC al sistema eléctrico el mes de febrero del 2021 [6].

Los purines han sido ampliamente utilizados para la producción de biogás, ya que contiene nutrientes para la digestión anaeróbica en proporciones adecuadas. Las macroalgas han despertado gran interés para la producción de biocombustibles por su abundante biomasa y rápido crecimiento, incluso si se encuentran en estado de descomposición [9]. Las algas presentan un alto potencial para la producción de biogás en comparación con los purines, esto por poseer bajo contenido de lignina y altos niveles de carbohidratos y proteínas. Sin embargo, el bajo contenido de nitrógeno y la hidrólisis de compuestos complejos, disminuye el rendimiento productivo de biogás. Objeto de estudio han sido las co-digestiones, es decir, formulación y mezcla de sustratos en proporciones adecuadas, para aprovechar las ventajas y propiedades de los distintos tipos de materia orgánica, de esta manera, una mezcla de algas y estiércol en cierta proporción, puede aumentar el rendimiento en la producción de biogás [10].

La recolección de algas en la comunidad Mapuche José Painecura conforma una fuente importante de ingresos. La temporada dura ocho meses, de Septiembre a Mayo, recolectando en promedio  $300[\text{kg}/\text{mes}]$ , de los cuales, el 20 % corresponden a descartes. Otra actividad importante de la comunidad es la crianza de animales como aves, porcino, bovino y ovino. Solo en porcino, se producen  $2,18[\text{kg}/\text{día}]$  de estiércol por animal, materia orgánica que junto a los descartes de algas, se puede utilizar para la producción de biogás.

## 1.1. Motivación

Chile importa el 97% de necesidades en petróleo, 84% de necesidades en carbón y 78% de necesidades en gas natural. Es por esto que, resulta de urgencia la producción de energías sostenibles que puedan suplir la demanda de combustibles en el país. Otra problemática atingente, es la necesidad de aprovechar al máximo los recursos orgánicos, con el fin de combatir las problemáticas medioambientales locales y globales [11]. En Chile, mediante la ley de fomento a las ERNC, se busca fomentar, impulsar y desarrollar la producción de biogás a partir de residuos orgánicos provenientes de actividades agropecuarias, forestales, industriales y domésticas. Esta fuente de energía se considera carbono-neutral, ya que se equilibra con el dióxido de carbono absorbido por las plantas [11].

La actividad económica de la comunidad José Painecura, genera residuos orgánicos como descartes de algas y purines de porcino, los cuales son potencialmente útil para la producción de biogás. Aprovechar estos residuos contribuye a la economía circular e impulsa el desarrollo de la comunidad al generar fuentes de energía.

Hay dos formas de obtener las algas: mediante recolección en la orilla (actividad practicada por la comunidad) o extracción (buzos extraen el alga con un chuzo, actividad conocida como barroteo). La última técnica representa una amenaza para el ecosistema marino ya que las algas conforman bosques marinos que albergan diversidad de seres vivos. En una visita realizada a La comunidad Mapuche, se observa que vive en armonía con el ecosistema, valoran y prefieren las actividades que les permiten vivir en equilibrio con los recursos de la naturaleza. Es por esto que, cobra relevancia analizar un proyecto alineado con su forma de vivir y costumbres.

A partir de lo mencionado, surge la propuesta de evaluar la pre-factibilidad técnica, económica y social en la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y macroalgas para la comunidad Mapuche José Painecura. Para esto, se propone que el biogás y bioabono (subproducto de la digestión) sean producidos en un biodigestor en condiciones anaeróbicas. El estudio técnico contempla la caracterización de la biomasa de acuerdo a las necesidades y recursos disponibles en la comunidad, el dimensionamiento de un reactor CSTR anaeróbico, parámetros y recomendaciones de funcionamiento. El estudio económico incluye análisis FODA, impacto económico-social y ambiental en la comunidad, propuestas de financiamiento e indicadores de rentabilidad como VAN y TIR. Además de una revisión a leyes y normas en materias de biogás.

## 2. Objetivos y limitaciones

### Objetivo general

- Estudiar y evaluar la pre-factibilidad técnica, económica y social en la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y macroalgas para la comunidad Mapuche José Painecura.

Para ello, se proponen los siguientes objetivos específicos:

### Objetivos específicos

1. Evaluar las necesidades de gas combustible y la cantidad de residuos agropecuarios y algales disponibles en la comunidad.
2. Caracterizar el sustrato adecuado a digerir.
3. Diseñar el proceso productivo de biogás considerando ambiente y comunidad.
4. Dimensionar un digestor anaeróbico.
5. Realizar evaluación económica-social del proceso productivo.

### Limitaciones

Este trabajo de título se encuentra restringido a los recursos bibliográficos disponibles. Consiste en una revisión bibliográfica que no necesariamente es reproducible o ejecutable como proyecto.

Un paso previo a la implementación, consiste en realizar pruebas a nivel laboratorio que comprueben las hipótesis que se proponen.

Algunos supuestos para resolver los balances de masa, energía y ecuaciones de diseño podrían conducir a subestimar o sobreestimar los cálculos.

Además del biodigestor, se requieren otros equipos para la purificación del biogás y de no ser posible el dimensionamiento mediante una ecuación de diseño, la información será obtenida por catálogo.

## 3. Marco teórico

### 3.1. Contexto de las algas

Japón y China son los mayores productores, consumidores y cultivadores de algas a nivel mundial [12]. En occidente, Chile es el principal exportador de algas pardas, extrayendo y recolectando especies como *Lessonia trabeculata* (huiro palo), *Agarophyton chilensis* (pelillo) y *Lessonia berteorana* (huiro negro). Gran parte de las algas son utilizadas en la industria para la producción de ficocoloides, polímeros que debido a sus características fisicoquímicas confieren volumen, textura y viscosidad a una amplia gama de productos cosméticos, médicos y alimentarios [13].

En Chile existen alrededor de 550 especies de algas bentónicas [14], de las cuales seis especies son de gran interés comercial: *Durvillaea antártica* (Cochayuyo), *Macrocystis pyrifera* (Huiro), *Macrocystis integrifolia* (Huiro), *Lessonia berteorana* (Huiro negro), *Lessonia trabeculata* (Huiro palo). La morfología de las algas pardas es muy variable, siendo algunas especies filamentosas pequeñas, hasta especies de estructuras complejas y varios metros de longitud como el Huiro.

Las algas pardas son organismos fotosintéticos abundantes en la naturaleza, constituyendo aproximadamente la mitad de la biomasa mundial [9]. En general, se componen de proteínas (ver Tabla 1), carbohidratos, minerales y vitaminas, composición que cambia durante el año. En general, las proteínas de las algas son ricas en glicina, arginina, alanina y ácido glutámico. El contenido de minerales es alto, sobre un 36 % de peso seco, dentro de los cuales se incluyen sodio, calcio, potasio, cloro, sulfuro y fósforo. Presentan una alta cantidad de polisacáridos (E.N.N) y bajo contenido de lípidos y lignina [14].

Tabla 1: Composición de algas pardas de mayor interés comercial. Porcentaje expresado en base seca [15].

| Alga      | Proteínas<br>N*6.25 (%) | Lípidos<br>(%) | Cenizas<br>(%) | E.N.N<br>(%) |
|-----------|-------------------------|----------------|----------------|--------------|
| Huiro     | 13,2                    | 0,7            | 10,8           | 75,3         |
| Cochayuyo | 10,4                    | 0,8            | 17,9           | 70,9         |

#### 3.1.1. Estado del arte de las algas

Las macroalgas producen ficocoloides, un grupo de polisacáridos naturales utilizados ampliamente en la industria debido a sus características físico-químicas, las cuales confieren volumen, textura, viscosidad y otras características a diferentes productos como son los alimentos, fármacos, cosméticos, pinturas, etc. Los ficocoloides de mayor aplicación son los agares, las carrageninas, los alginatos y las fucoidinas [16].

La demanda de algas ha crecido considerablemente en los últimos años (Figura 2). Tan solo 2014 se extrajeron más de 300.000 toneladas de algas, con un valor de mercado de más de USD 70 millones [17]. Para el año 2018 los desembarques de algas en Chile alcanzaron las 237.000 toneladas, las cuales representan el 70 % de los recursos bentónicos del país [18]. La industria vinculada a la elaboración de productos y subproductos en base a las algas ascendió a los USD 183 millones el 2011, con tendencias crecientes. Los principales productos de exportación se catalogan en: algas secas (Huiro y Lugas), carrageninas (Lugas), Agar (Pelillo), polímeros naturales (Huiros) y alginatos (Huiros) [19].

El comercio de algas en Chile es un entramado complejo con diversas figuras y roles en las caletas y plantas de procesamientos. Es un negocio con una estructura jerarquizada, mezcla de formalidad e informalidad, economía de monopolio y subcontrataciones en los distintos niveles. Por un lado, se sitúan los exportadores, en total doce empresas que conforman un lobby, siendo algunas de sociedad anónima, destacando entre ellas Prolamar S.A, quien según el resto de los actores, fija los precios de algas en Chile. En el otro extremo se sitúan los algueros, ya sea recolectores o buzos, que incluso organizados en sindicatos, se ven obligados a vender las algas a distintos intermediarios [17].

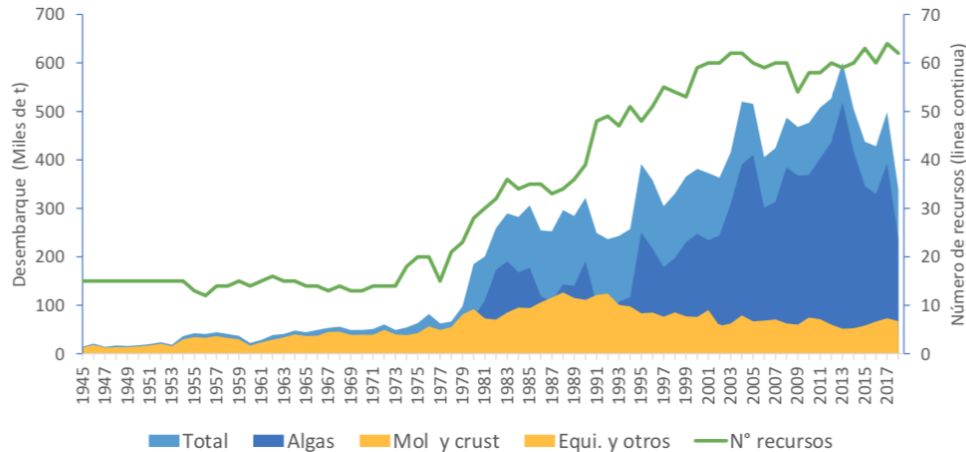


Figura 2: Desembarque pesquero nacional: Período 2000-2018. Fuente: Ser-napesca.

El precio de las algas se disparó el año 2005, alcanzando un máximo en el 2017 de \$400 por kilogramo y \$1.000 por kilogramo de alga seca, sin embargo, el año 2018 se produce una caída abrupta, pagándose la mitad del precio, apuntando como motivo el sobre-stock en China y la competencia del alga peruana [17].

### 3.2. Contexto de purines

La producción de biogás a partir de purines de animales ha sido ampliamente estudiado, especialmente en instalaciones agropecuarias, ya que la depuración del purines permite disminuir la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ) hasta en un 95% [20][21]. Además, el efluente es utilizado como biofertilizante agrícola de alta calidad, rico en fósforo, nitrógeno y potasio [22]. En general, las purines de animales poseen un alto contenido de agua, carbohidratos y proporciones adecuadas de nitrógeno. En la Tabla 2 se muestra la composición en proteínas, lípidos, cenizas y E.N.N (Carbohidratos y celulosa).

Tabla 2: Composición de purines utilizadas para producción de biogás. Promedios expresado en base seca [8].

| Purines | Proteínas<br>N*6.25( %) | Lípidos<br>( %) | Cenizas<br>( %) | E.N.N<br>( %) |
|---------|-------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Bovino  | 9,05                    | 3,23            | 19,66           | 68,06         |
| Porcino | 10,95                   | 11,50           | 23,67           | 53,88         |
| Aves    | 9,56                    | 2,84            | 17,23           | 70,37         |

### 3.2.1. Estado del arte del abono

El uso de abono orgánico a partir de purines, tiene como principal objetivo la restitución al suelo de la materia orgánica estable, debido a compuestos orgánicos presentes en el bioabono como fósforo, nitrógeno, potasio, celulosa y hemicelulosa, que estimulan el crecimiento vegetativo, contribuyen a la formación de humus estable y aumentan la permeabilidad del suelo. Cabe destacar que las purines sin tratamiento y evaluación microbiana adecuada, pueden representar un riesgo para la salud, debido a la transmisión de enfermedades. Es por esto que, su uso como bioabono requiere de tratamientos previos que disminuyan la carga bacteriana mediante la depuración de los mismos [8].

Con la digestión anaeróbica se obtienen dos productos: el biogás como fuente de combustible y el lodo orgánico estabilizado, utilizado como acondicionador y/o biofertilizante de terrenos para cultivos. La composición del bioabono depende del sustrato a digerir, condiciones de operación en el biodigestor, microorganismos presentes, tiempo de estabilización y condiciones climáticas de la zona. Entre los principales parámetros que permiten entregar información de la calidad y seguridad del bioabono, se mencionan, la capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica y nutrientes, relación carbono-nitrógeno, contenido de sales solubles y pH [8].

## 3.3. Medio ambiente

### 3.3.1. Medio ambiente y metano

El gas metano contribuye en un 20 % al efecto invernadero antropogénico. Entre las fuentes de metano de origen humano, más del 50 % se asocia a la ganadería y un 30 % al cultivo de arroz [8]. Para comparar el efecto de los gases contaminantes en la atmósfera se asigna un puntaje, tomando como referencia el  $CO_2$ . En la Tabla 3 se muestra los puntajes asignados a los principales gases que contribuyen al calentamiento global.

Tabla 3: Contribución relativa de los gases al efecto invernadero [8].

| Gas        | Potencial de calentamiento |
|------------|----------------------------|
| $CO_2$     | 1                          |
| $CH_4$     | 21                         |
| $N_2O$     | 310                        |
| <i>PFC</i> | 9200                       |
| <i>HFC</i> | 11700                      |
| <i>SF4</i> | 23900                      |

### 3.3.2. Medio ambiente y algas

Existen dos formas de obtener las algas: mediante recolección en la orilla o extracción (buzos extraen el alga con un chuzo, actividad conocida como barroteo). La última técnica representa una amenaza para el ecosistema marino ya que las algas conforman bosques marinos que albergan diversidad de seres vivos. Las macroalgas conforman grandes bosques, que albergan diversidades de especies, permiten la colonización de otras algas marinas e invertebrados como erizos de mar, lapas y caracoles que a su vez, atraen otras especies depredadoras como el loco, la estrella de mar y el pejeperro. Además, cumplen funciones de protección en las costas frente a eventos climáticos como marejadas, tsunamis y ciclones.

Producto del aumento en la demanda de algas, la actividad extractiva o barroteo ha crecido en el tiempo, representando con ello un peligro al ecosistema debido a la deforestación de hábitas cruciales para la vida marina. Pese a que actores estatales como Subpesca y Sernapesca avanzan en marcos regulatorios, carecen de fiscalizaciones efectivas, dándose altos niveles de extracción ilegal [17].

### 3.3.3. Medio ambiente y abono

La fertilización de los suelos es uno de los pilares de la revolución verde, sin embargo, existe conciencia que el uso indiscriminado puede representar una seria amenaza al medio ambiente. Solo entre un 18 % y 40 % del nitrógeno aplicado como fertilizante, es utilizado por los cultivos, perdiéndose el resto debido a lluvias, percola o volatilización producida por procesos de desnitrificación biológica. En el 2005 se estimó que el 17 % de 100[MT] de N sintético usado en la agricultura, fueron consumidas por humanos y el resto terminó disperso en el medio ambiente. Por otra parte, el uso de fertilizantes sintéticos puede causar contaminación, ya que algunos presentan trazas de elementos pesados que pueden terminar en aguas subterráneas [23].

La materia orgánica del suelo se encuentra principalmente en la parte superficial de éste. Cerca del 40 % de los suelos agrícolas tienen grados de erosión, reducción de fertilidad o sobrepastoreo, causando grandes modificaciones en el ciclo biogeoquímico del carbono, nitrógeno y fósforo. Los manejos de la agricultura convencional son los responsables de la reducción de la materia orgánica en los suelos [23].

En el contexto de la agricultura orgánica, se busca elevar el potencial productivo de los suelos, generando condiciones para una mayor actividad biológica, mejorando su estructura y perfil bioquímico, además de contribuir a la disminución de la erosión. Las ventajas medioambientales que esto implica son: aumento de la biodiversidad y equilibrio de los elementos del sistema, uso eficiente de los recursos, mantención de la flora y fauna, estímulo al reciclaje, protección de aguas subterráneas, fortalecimiento de la cultura local, mejoramiento del autoestima, estímulo e ingenio de los agricultores rurales [23].

## 3.4. Producción de biogás

El tratamiento y manejo de residuos orgánicos permite transformar la materia orgánica en biogás y bioabono, esto con la participación de un consorcio de microorganismos. Los microorganismos pueden seguir un metabolismo aeróbico o anaeróbico. En una digestión anaeróbica, la población microbiana transforma la materia orgánica en presencia de oxígeno, mientras que una digestión



anaeróbica carece de oxígeno para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica.

Dentro de las principales ventajas en una digestión aeróbica se encuentran, la fácil operación, no se generan malos olores, produce un clarificado con baja  $DBO_5$ , pocos residuos sólidos y bajo contenido de fósforo. Las desventajas de este tipo de digestión se deben principalmente a los altos costos de operación por consumo de energía (50 % de consumo del proceso), además de la falta de parámetros y criterios de diseños en el proceso productivo [8].

Dentro de las ventajas de una digestión anaeróbica se encuentra que, más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiendo sólo el 10 % de la energía en crecimiento bacteriano. Y pese a que requiere de un elevado costo inicial de inversión, se justifica con una mayor producción de metano [8].

El biogás generado suele estar compuesto de diferentes elementos que pueden complicar el manejo y disminuir la calidad del producto. La composición final dependerá del material digerido y las condiciones de operación. Algunas de las composiciones usuales de biogás se muestran en la Tabla 4. Cabe destacar que, cuando el biogás tiene un contenido de metano mayor al 45 % es inflamable y puede ser utilizado para combustión con capacidad de encendido [15].

Tabla 4: Características generales del biogás [15].

| Característica             | Valor   |
|----------------------------|---|
| Composición                | 55-70 % metano<br>30-45 % dióxido de carbono y<br>trazas de otros gases |
| Contenido energético       | 6,0-6,5 kW h $m^{-3}$   |
| Equivalente de combustible | 0,60-0,65 L petróleo/ $m^3$ biogás                                      |
| Límite de explosión        | 6-12 % de biogás en el aire   |
| Temperatura de ignición    | 650-750 °C  |
| Presión crítica            | 74-88 atm   |
| Temperatura crítica        | -85,5 °C  |
| Densidad normal            | 1,2 kg $m^{-3}$   |
| Olor                       | Sulfurado   |
| Masa molar                 | 16.043 kg $mol^{-1}$  |

### 3.4.1. Consorcio de microorganismos

La digestión anaeróbica es un proceso complejo que involucra gran cantidad de reacciones bioquímicas (Ver anexo A). A modo general, es posible dividir el proceso de producción de metano en cuatro etapas:

1. Hidrólisis: Se hidrolizan compuestos de mayor peso molecular tales como proteínas, carbohidratos y lípidos, por la acción de enzimas extracelulares de microorganismos hidrolíticos como amilasas, lipasas y proteasas. Esta etapa depende de la temperatura del proceso, tiempo de retención hidráulico, composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasa), tamaño de partículas, pH, concentración de amonio y la cantidad de productos hidrolizados. La tasa de hidrólisis se ve disminuida por la presencia de carbohidratos complejos como lignina, celulosa y hemicelulosa [8].
2. Etapa fermentativa o acidogénica: En esta etapa, se lleva a cabo la fermentación mediante bacterias formadoras de ácido, las cuales transforman compuestos orgánicos en otros que

serán utilizados por bacterias acetogénicas. Además, se eliminan trazas de oxígeno disuelto en el sistema [8].

3. Etapa acetogénica: Los compuestos que no pueden ser utilizados directamente por organismos metanogénicos, deben ser transformados en productos más sencillos como acetato e hidrógeno, mediante bacterias acetogénicas [8].
4. Etapa metanogénica: En esta etapa, un gran grupo de bacterias metanogénicas, actúan sobre productos monocarbonados (acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas) de las etapas anteriores para formar metano [8].

En la Figura 3 se muestra un esquema general de las etapas metabólicas. De las cuatro etapas mostradas, la hidrólisis suele ser la etapa limitante, especialmente cuando el sustrato presenta mayor cantidad de lignina y celulosa [9]. La mayoría de los organismos acidogénicos participan de la hidrólisis, siendo dominantes en la fase de acidogénesis. Por otra parte, las bacterias que participan en la acetogénesis, sólo viven en simbiosis con el género que consume hidrógeno y su período de regeneración es de hasta 84 horas. Las bacterias que participan en la etapa de metanogénesis se caracterizan por el co-factor  $F_{420}$  (en su forma oxidada absorbe la luz de 420 nm y emite fluorescencia), el cual es un donador de electrones en varios pasos de la reducción de  $CO_2$  [8].

Algunos de los microorganismos que participan en cada etapa se presentan en la Tabla 5. La formulación o composición de los microorganismos en un biodigestor varía de acuerdo a las condiciones de operación, materia orgánica a digerir y el proveedor donde se extrae el cultivo.

Cabe mencionar algunos de los microorganismos presentes que participan indirectamente en la degradación tal como *Staphylococcus sp.*, pueden provocar riesgos para el personal que opera un digestor si no se toman las medidas sanitarias correspondientes [8].

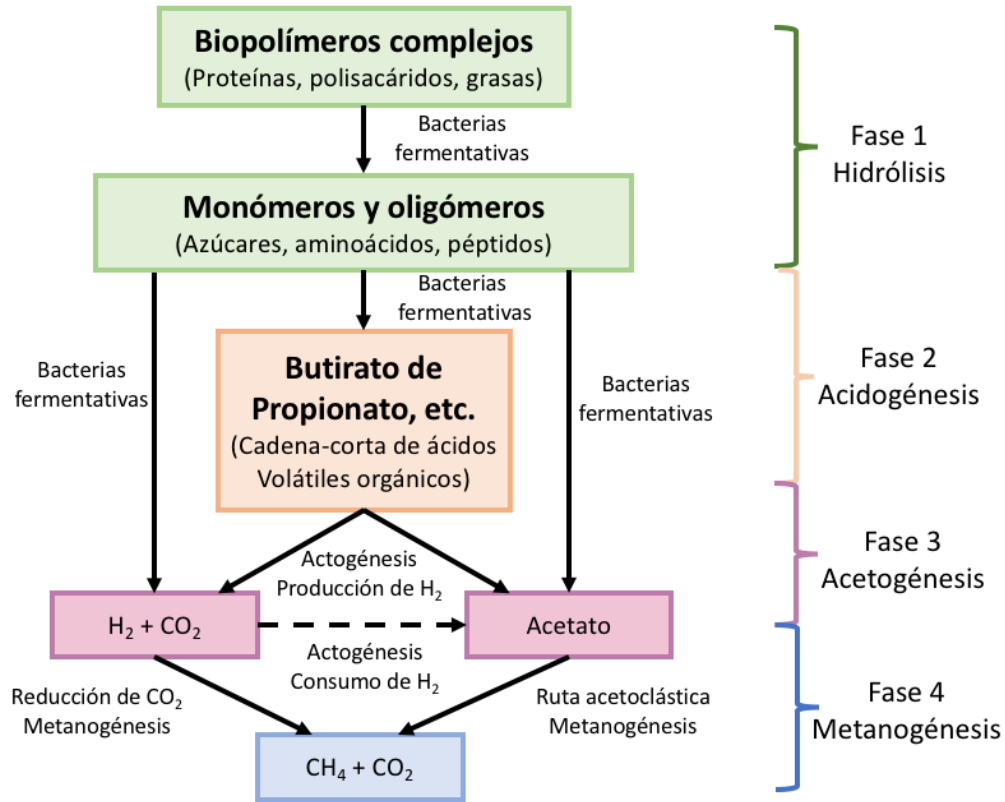


Figura 3: Esquema general de las etapas metabólicas en la digestión anaeróbica [24].

Tabla 5: Ejemplos de bacterias que participan en las etapas [8].

| Etapas        | Bacterias   |
|---------------|---|
| Hidrólisis    | <i>Bacteroides, lactobacillus, Propioni-bactrerium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bificobacterium.</i>                         |
| Acidogénesis  | <i>Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus.</i><br><i>Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides.</i>   |
| Acetogénesis  | <i>Syntrophomonas wolfei, Syntrophobacter wolini.</i>   |
| Metanogénesis | <i>Acetobacterium woodii, Clostridium aceticum:</i> Homoacetogénicos<br><i>Methanobacterium, Methanospirillum hungatii, Methanosarcina.</i> |

### 3.5. Proceso productivo

En la figura 4 se muestra un diagrama global del proceso. Cuando el sustrato contiene mayor cantidad de celulosa y/o sal, es recomendable una etapa de pre-tratamiento de la materia orgánica, el cual puede incluir lavado y cortado. En la etapa de alimentación se formula la materia primas a utilizar y se opera el caudal de entrada. La etapa de digestión ocurre en el biodigestor, donde se ajustan las condiciones de operación y el manejo de las corrientes de entrada y salida. Finalmente, la etapa de post-tratamiento consiste en el refinado del producto, que incluye procesos de purificación del gas y tratamiento subproductos (abono y gases contaminantes).

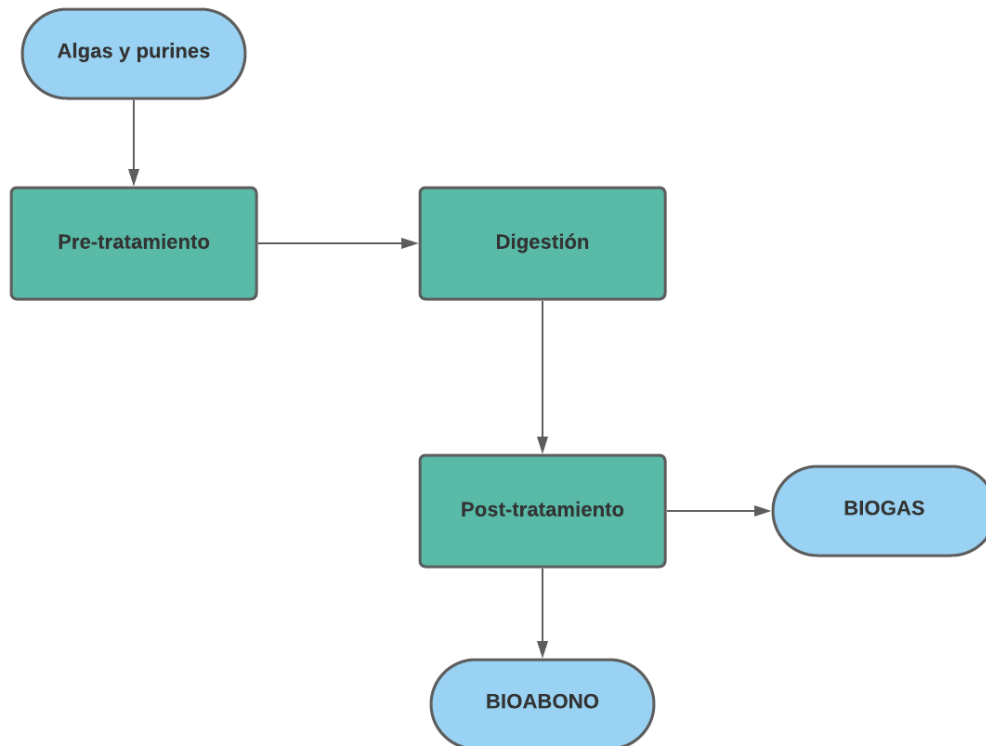


Figura 4: Diagrama de bloques para la producción de biogás. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.1. Materia prima

Es posible utilizar una diversidad de materia orgánica para la producción de biogás tal como vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico etc. La composición final, rendimiento y producción de biogás depende de la materia prima y su composición. La fuente de carbono más utilizada por los microorganismos quimiotróficos son los carbohidratos [8]. En la Tabla 3.5.1 se muestra el rendimiento teórico de biogás a partir de algunos compuestos orgánicos y en la Tabla 7 se muestra el rendimiento teórico de biogás a partir de diferentes materias primas.

La materia orgánica, además de nutrientes, contiene agua. La fracción sólida se conoce como sólidos totales ( $ST$ ). El porcentaje de  $ST$  es un factor a considerar al momento de cargar el sustrato, ya que la movilidad bacteriana se ve limitada con el aumento de la cantidad de sólidos, disminuyendo la eficiencia del proceso [8]. Los sólidos volátiles ( $SV$ ) corresponden a una porción de los  $ST$  que se volatilizan al ser calentados a  $600^{\circ}\text{C}$ . Los sólidos volátiles son un indicador de la materia orgánica que es transformada a metano en el proceso de digestión anaeróbica [8].

Tabla 6: Producción de biogás teórica de algunos compuestos orgánicos [8].

| Compuesto     | Fórmula química      | Biogás [ $m^3/kgSV$ ] |
|---------------|----------------------|-----------------------|
| Carbohidratos | $C_6H_{10}O_5$       | 0,75                  |
| Lípidos       | $C_{16}H_{32}O_2$    | 1,44                  |
| Proteínas     | $C_{16}H_{24}O_5N_4$ | 0,98                  |

Los cuatro azúcares más abundantes en algas pardas son alginato, laminarina, manitol y fucoi-

dano. Los principales carbohidratos hidrolizables son el alginato y el manitol, los cuales representan entre un 40 y 55 % del total de carbohidratos [25]. La baja bioconversión de metano en algas es atribuible a la presencia de polisacáridos complejos difíciles de fermentar, relación carbono/nitrógeno bajo 20:1, altos niveles de sulfuro, polifenoles y salinidad [9].

Tabla 7: Rendimientos promedios teóricos en la producción de biogás a partir de algunas materias primas [26][27].

| <b>Materia orgánica</b> | <b>Biogás[m<sup>3</sup>/kgSV]</b> |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Algas pardas            | 0,29                              |
| Purines                 | 0,39                              |
| Silo maíz               | 0,63                              |
| Silo trigo              | 0,49                              |
| Orujo de uvas           | 0,68                              |

Es posible mezclar distintas materias orgánicas y realizar una co-digestión, de esta forma, se aprovechan las propiedades y ventajas de los distintos sustrato. En la Tabla 8, se muestran los rendimientos en la co-digestión de distintas materias primas y las proporciones de sólidos volátiles alimentados.

Tabla 8: Rendimientos promedios teóricos en la producción de biogás a partir de algunas materias primas [10][28].

| <b>Materia orgánica</b>               | <b>Proporción SV</b> | <b>Biogás[m<sup>3</sup>/kgSV]</b> |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Paja de trigo + purines de pollo      | 1:1                  | 0,25                              |
| Paja de trigo + purines de pollo      | 1:2                  | 0,24                              |
| Residuos de maíz + purines de porcino | 1:1                  | 0,45                              |
| Residuos de papel + macroalgas        | 1:1                  | 0,37                              |

### 3.5.2. Pre-tratamiento

La materia orgánica con alto contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y otros azúcares complejos, debe ser sometida a tratamientos previos como cortado, macerado o compostaje con el objetivo de aumentar la velocidad hidrólisis. En el caso de purines, la degradación dependerá del tipo de animal y la alimentación que este reciba. Existe una variedad de pre-tratamientos, mecánicos, biológicos y químicos. En la tabla 9 se muestran las ventajas y desventajas de algunos pre-tratamientos aplicados a sustratos con alto contenido de celulosa y lignina [8].

Tabla 9: Ventajas y desventajas de algunos tratamientos físicos, químicos y biológicos. [9].

| Tratamiento   | Ventajas   | Desventajas   |
|---|--|---|
| <b>Físico:</b><br>-Cortado<br>-Molino de bolas              | -Fácil operación.<br>-Incrementa la superficie para la hidrólisis.<br>-Alto rendimiento. | -Alto costo energético.<br>-Compra de equipos especializados. |
| <b>Enzimático:</b><br>-Celulasas<br>-Proteasas              | -Bajo costo energético.<br>-Amigable con el medio ambiente.                              | -Alto costo de enzimas.                                       |
| <b>Químico:</b><br>-Bajo costo energético<br>-Ácido cítrico | -Bajo costo energéticos.<br>-Bajo rendimiento.   | -Cambios de pH en el reactor.<br>-Compuestos corrosivos.      |

### 3.5.3. Tipos de biodigestores

Los biodigestores pueden diseñarse a diferentes escalas, según la cantidad de materia prima disponible y las demandas energéticas requeridas. Los biodigestores más comunes son:

- Biodigestor de globo. Es de forma tubular, compuesto de plástico y completamente sellado. Son de bajo costo, fácil transporte e instalación. La desventaja es que las presiones alcanzadas son relativamente bajas y su vida útil es corta [8].
- Biodigestor de domo fijo. Consiste en una construcción de concreto o ladrillo, compuesto de un domo fijo. Presenta una larga vida útil y sus costos de construcción son moderados. La desventaja de este tipo de biodigestor es que la presión del gas no es constante, dificultando su manejo [8].
- Biodigestor de domo flotante. Consiste en una construcción de concreto o ladrillo, compuesto de un domo móvil. Es de fácil manejo y se opera a presión constante. La desventaja de este tipo de biodigestor es que los costos de construcción y mantención son elevados [8].
- Biodigestor de tanque CSTR. Consiste en un tanque con agitación homogénea. El tiempo de retención de sólidos es igual al tiempo de retención hidráulico. En este tipo de reactores se recomienda no superar el 15 % de sólidos totales [26].

### 3.5.4. Factores que afectan el proceso productivo

El proceso metanogénico no solo requiere una fuente de carbono y nitrógeno, sino que hay factores y parámetros que condicionan la obtención de metano, entre los cuales se encuentran:

- Naturaleza y composición de la materia prima. Casi toda la materia orgánica se puede utilizar para producir biogás, sin embargo, la calidad y cantidad de biogás, dependerá de la composición de la materia orgánica a digerir. Ésta debe contener sales minerales necesarias para el desarrollo y actividad microbiana como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno y níquel [8].

- Relación carbono/nitrógeno. El carbono constituye la fuente de energía, mientras que el nitrógeno es utilizado para la formación de células. Una relación entre 30:1 y 20:1 de carbono:nitrógeno, es un rango óptimo para el crecimiento y reproducción de los microorganismos [8].
- Contenido de sólidos totales. El porcentaje de sólidos condiciona la movilidad de las bacterias en el digestor. En digestores semicontinuos, el porcentaje de sólido no debe superar el 8-12 %, mientras que en un digestor batch, es posible alcanzar 40-60 % de sólidos totales [8].
- Tasa de carga orgánica (OLR). Se define como los sólidos volátiles por unidad de reactor y unidad de tiempo. Los OLR se ajustan de acuerdo a la materia orgánica a digerir. Usualmente se utilizan OLR de  $1,6 - 4,8 [g/L \cdot d]$  [8]. En sustratos fácilmente degradables, las reacciones acidogénicas y los ácidos volátiles aumentan a mayores OLR, aumentando la concentración de hidrógeno [29].
- Temperatura de operación. Es uno de los parámetros principales de operación, ya que la actividad biológica de las bacterias se ve condicionada por la temperatura. En general, a media que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento y actividad de los microorganismos, y con ello se acelera el proceso de producción de biogás. Además, aumenta la solubilidad de las sales, provocando que la materia sea accesible a los microorganismos. Existen tres rangos de temperatura donde los microorganismos logran un crecimiento óptimo, Psicrófilo, Mesófilo y Termófilo (Ver Anexo B). Siendo el régimen Mesófilo el más utilizado, con un rango óptimo de temperatura de 25-35 °C [8].
- Tiempo de retención hidráulico. Es el parámetro que permite calcular el volumen del biodigestor y depende de otros valores como rendimiento, conversión y tasa de crecimiento de los microorganismos [26]. Generalmente, se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días [8].
- pH. Los microorganismos involucrados en la digestión anaeróbica requieren de un pH óptimo para realizar sus funciones metabólicas adecuadamente. Del consorcio de microorganismos, los metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH. Los niveles de actividad óptimo para el cultivo mixto se encuentra entre 6,8 y 7,4. Niveles bajos de pH producen acumulación de ácido acético, evitando la degradación del propionato y niveles altos de pH aumentan la concentración amoníaco, inhibiendo el crecimiento microbiano [8].
- Sales y otros compuestos. La digestión anaeróbica también es inhibida por ácidos grasos volátiles, hidrógeno, nitrógeno amoniacal, sulfatos y sulfuros, cationes y metales pesados. Particularmente, el cloruro de sodio en composición mayor al 4% inhibe la formación de metano. Sin embargo, se debe considerar que las bacterias anaeróbicas, presentan la capacidad de adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba severamente [8].

### 3.5.5. Post-tratamiento

El biogás generado por digestión anaeróbica posee otros gases contaminantes como ácido sulfhídrico, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno gaseoso e hidrógeno, algunos de los cuales son tóxicos y contaminan el medio ambiente. Particularmente, el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) debe ser eliminado o reducido de la corriente de salida ya que al mezclarse con agua, forma ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), el cual es altamente corrosivo en los equipos y perjudicial para la salud.

El primer paso para la purificación del gas es eliminar las partículas sólidas líquidas arrastradas por la corriente de gas, luego se extraen los contaminantes gaseosos que puedan causar corrosión o

contaminación atmosférica. Las técnicas de post-tratamiento incluyen tratamientos físicos, químicos o biológicos.

En los tratamientos físicos destacan:

- Adsorción: El ácido sulfhídrico es generalmente adsorbido en compuestos como hidróxido de hierro, óxido de hierro, carbón activado, tamices moleculares etc. La adsorción puede verse afectada por la humedad, selectividad, temperatura, presión y presencia de partículas en suspensión, presentando altos costos operacionales en mantener estas condiciones [30].
- Filtración: Se utiliza un filtro membrana para separar algunos componentes del gas. La permeabilidad de la membrana es una función directa de la solubilidad química del gas específico en la membrana. Las membranas utilizadas son caras y muy frágiles al tener poros excesivamente pequeños [30].

En los tratamientos biológicos se utilizan bacterias sulfuro oxidantes que son capaces de metabolizar el  $H_2S$ . La ventaja de estos sistemas respecto a los físicos y químicos, es que tienen menores costos de inversión y operación, sin embargo, el metabolismo de los microorganismos es lento, con tiempos de residencia altos [30]. Algunos de los equipos utilizados son:

- Biofiltro de lecho fijo: Las bacterias son fijadas en un soporte poroso por el cual pasa el gas a tratar.
- Biofiltro de lecho escurrido: Las bacterias son fijadas en un soporte sintético y se recircula una corriente con una solución para absorber algunos componentes.

En sistemas de absorción química se utilizan reactivos alcalinos que reaccionan con los gases ácidos. Para esto, se utiliza un absorbedor, un desorbedor, un calderín y un condensador. Los sistemas de remoción química suelen ser de altos costos debido a la utilización de solventes como aminas y carbonatos [8].

### 3.5.6. Producto

#### 3.5.6.1. Biogás

Los productos de la digestión anaeróbica son el biogás y el bioabono. Las composiciones del biogás dependen de varios factores como se mencionó anteriormente. En la Tabla 10 se muestran los gases más abundantes que forman el biogás y sus composiciones usuales

Tabla 10: Composiciones usuales de algunos compuestos del biogás [26].

| Compuesto | Porcentaje (%) |
|-----------|----------------|
| $CH_4$    | 55-70          |
| $CO_2$    | 30-45          |
| $N_2$     | 0-10           |
| $H_2$     | 0-1            |
| $O_2$     | 0-2            |
| $H_2S$    | 0-3            |



### 3.5.6.2. Bioabono

La clasificación como bioabono depende de las características bioquímicas de las materias primas utilizadas, de modo que si éstas contienen altos niveles de nutrientes, generan fertilizantes orgánicos de calidad.

Para prevenir riesgos de contaminación y obtener un producto seguro, es necesario un análisis bioquímico del efluente. La corriente de salida en un biodigestor se conecta a una cámara de registros de lodos y su tamaño depende del volumen del biodigestor. El diseño de la cámara de lodos puede ser de tal forma que los sólidos sedimenten y la corriente líquida se conecte a un campo de infiltración.

El análisis bioquímico en el efluente incluye los siguientes parámetros:

- pH: Los rangos de pH establecidos por la norma Chilena 1.333, están comprendidos entre 6,0 y 9,0 [31]. Fuera de este rango, se puede interpretar como vertidos incontrolados de origen industrial.
- Conductividad: La conductividad se relaciona con la salinidad. Para aguas destinadas a riego, la norma Chilena 1.333 establece un límite de  $750[\mu S/cm]$  [31]. Fuera de este rango, se afecta el proceso biológico de depuración.
- Los parámetros de contaminación más utilizados son los relacionados con el consumo de oxígeno disuelto:
  - $DBO_5$ : Es la demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días. Este parámetro se relaciona el oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación de la materia orgánica. Su valor establecido por la legislación chilena es de  $35[mg/L]$  [33]. Para valores cercanos a los  $200[mg/L]$ , el agua se recomienda para riego con restricciones.
  - $DQO$ : Es la demanda química de oxígeno. Se emplea para medir el contenido de materia orgánica. Se puede establecer que  $DBO/DQO = 1/2$ , denota un grado satisfactorio de biodegradabilidad [33].
  - $COT$ : Mide el carbono orgánico total. Este parámetro es indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica [34].
- Nitrógeno: En medios aerobios, la acción de las bacterias puede oxidar el nitrógeno amoniacal a nitratos y nitritos. El predominio de nitratos en aguas residuales es un fiel indicador de residuos que se han estabilizado respecto a la demanda de oxígeno [32].

## 3.6. Evaluación de proyectos

### 3.6.1. Análisis FODA

El análisis FODA consiste en identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto.

Para la evaluación económica del proyecto es necesario definir indicadores de desempeño económico, que entregan información de la factibilidad económica y ambiental de un proyecto en vías de desarrollo. Los indicadores más conocidos se describen a continuación.

### 3.6.2. Retorno de la inversión (Payback)

Con este indicador, se calcula el periodo en recuperar la inversión. Este se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$0 = -I_0 + \sum_T^{i=1} F_i \quad (1)$$

Donde  $I_0$  corresponde a la inversión inicial del proyecto,  $F_i$  al flujo de efectivo en el periodo  $i$  y  $T$  el periodo de retorno de la inversión.

### 3.6.3. Valor actual neto (VAN)

Este indicador actualiza todos los flujos del futuro a una tasa de descuento, que usualmente es fija para cada periodo. Al restar la inversión inicial, el VAN indica la rentabilidad económica del proyecto. Este se calcula con la siguiente ecuación:

$$VAN = -I_0 + \sum_N^{i=0} \frac{F_i}{(1+r)^i} \quad (2)$$

Donde  $r$  corresponde a la tasa de descuento,  $F_i$  al flujo de ingresos en el periodo  $i$ ,  $I_0$  la inversión inicial y  $N$  el horizonte del proyecto.

La inversión inicial se puede describir con la inversión en bienes de capital (CAPEX) y los flujos de ingresos, incluyen los costos operacionales del proyecto (OPEX).

### 3.6.4. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) corresponde a la tasa de descuento a la cual el proyecto posee VAN igual a cero.

## 3.7. Marco legal

La evaluación e implementación de un proyecto de producción de biogás se encuentra sujeto a leyes, normas, decretos y permisos ambientales. En Chile, mediante la ley 19.300 sobre las bases generales del medioambiente, se cuenta con un sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) que permite a las autoridades determinar si un proyecto cumple con la legislación ambiental vigente y se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos. Todo proyecto o actividad susceptible a causar impacto ambiental, incluida sus modificaciones, sólo se puede ejecutar o modificar previa evaluación de su impacto ambiental, esto mediante la presentación de una declaración de impacto ambiental (DIA) o un estudio de impacto ambiental (EIA) [35].

La descripción del proyecto debe contemplar factores de impacto ambiental como el emplazamiento o localización de las partes y obras del proyecto; acciones o actividades que interactúan con los componentes ambientales del lugar; emisiones y residuos; extracción, explotación, uso o intervención de recursos renovables; cierre de instalaciones etc. El titular es quien debe describir su proyecto de acuerdo a la escala, diseño y particularidades de éste. Para estimar los valores y características, se debe considerar el escenario más desfavorable para la evaluación [35].

A continuación, se mencionan algunas normas y decretos que se deben tener en cuenta al momento de evaluar un proyecto.

- Decreto 191: Reglamento de instaladores de gas: El presente reglamento tiene por objeto establecer los requisitos mínimos que se debe cumplir para obtener las licencias de instalador de gas, y fijar disposiciones para un adecuado desempeño profesional, con el fin de garantizar que las instalaciones de gas cumplan con las condiciones mínimas de seguridad y que no constituyan un peligro para las personas y las cosas.

- Decreto 119: Reglamento de seguridad de las plantas de biogás e introduce modificaciones al decreto 191.
- Decreto 4: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.
- PLADECO: Plan de desarrollo comunal. Se debe describir la forma en que el proyecto o actividad se relaciona con las políticas, planes y programas de desarrollo regional y con los planes de desarrollo comunal de conformidad al artículo 9 de la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente [35].

## 4. Justificación, Oportunidad y contexto

La comunidad mapuche José Painecura se ubica en la región de la Araucanía a 45 km al oeste de la comuna de Carahue. En ella, residen 44 familias dedicadas en su gran mayoría a la agricultura de auto consumo, recolección de algas y mariscos [4]. En la Figura C.1 se muestra la localización geográfica de la comunidad José Painecura, esta se encuentra en el borde oeste, contigua al mar (estrella amarilla en el mapa).

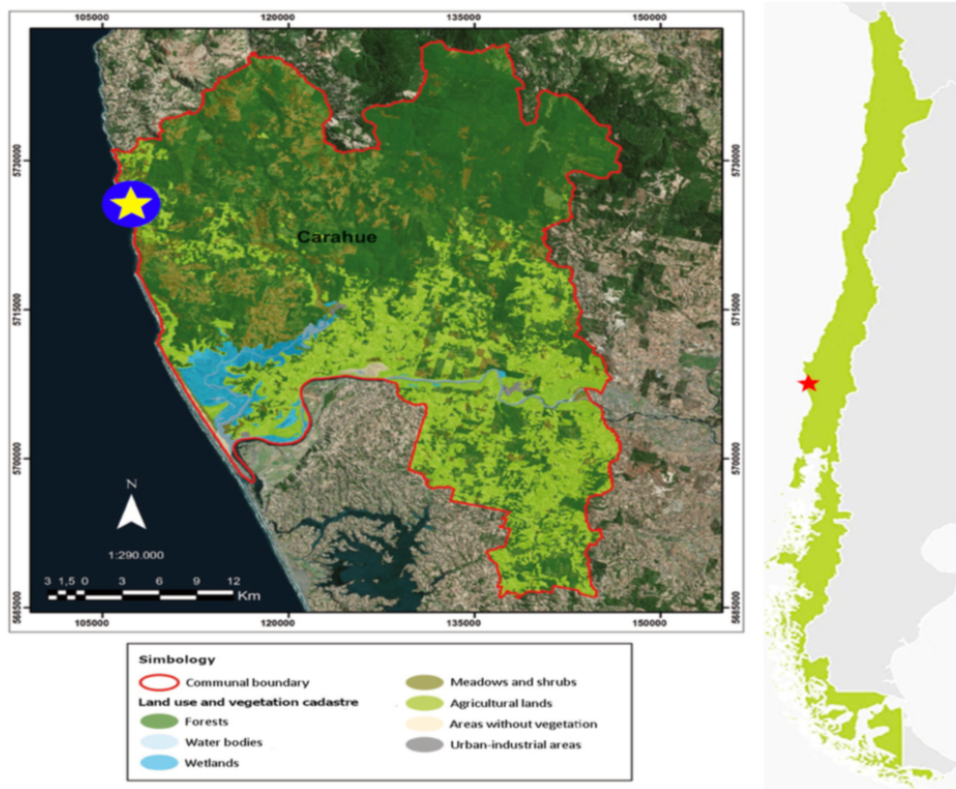


Figura 5: Ubicación geográfica de la comunidad José Painecura [36]

Una de las motivaciones de este trabajo de título es la necesidad de aprovechar los descartes algales producidos por la comunidad Mapuche José Painecura. La alternativa resulta atractiva desde el punto de vista de aprovechar los residuos orgánicos, generar valor agregado a las algas, tratar residuos agropecuarios y proporcionar acceso a otras fuentes de energías renovables.

La iniciativa preliminar contemplaba una planta piloto para proporcionar una fuente de energía renovable a los habitantes de la comunidad, sin embargo, por razones que se explican más adelante, este formato se cambia. La línea productiva general contempla una etapa de molienda y mezclado, fermentación con microorganismos (obtenidos de otro biodigestor en funcionamiento), etapa de purificación del biogás y almacenamiento, obteniendo biogás para combustión.

En el transcurso de la investigación bibliográfica, se encontró que, si bien las algas presentan un gran potencial en la producción de biogás, el proceso productivo se ve limitado por las bajas temperaturas de invierno, estacionalidad de las algas y los costos asociados al pre-tratamiento, los cuales pueden ser el lavado (debido al porcentaje de salinidad) y cortado (debido a la presencia de polisacáridos complejos resistentes a la hidrólisis).

Una solución a la problemática de estacionalidad consiste en almacenar los descartes en un lugar seco para mantener un stock anual. De esta manera, la co-digestión de algas con purines de porcino supone un flujo constante de materia orgánica durante el año. Por otra parte, el flujo constante de materia orgánica evita problemas de adaptación por parte de los microorganismos.

Se realizó una visita a la comunidad José Paineicura y conversando con miembros de la comunidad (ver Anexo C), se deduce lo siguiente:

- Cada habitante gestiona sus propios recursos, es decir, algunos se dedican a la agricultura de auto consumo, otros a la recolección de mariscos, extracción de algas etc.
- La comunidad se encuentra disgregada en espacio. Instalar un sistema común, como una planta piloto, implicaría altos costos de instalación de cañerías, bombas, gestión de materiales, personal y transporte.
- La comunidad se encuentra aledaña al mar. Lo que podría causar bajos rendimientos de producción de biogás por la salinidad y acarrear graves problemas de corrosión en los equipos.
- Los fuertes vientos, lluvias y bajas temperaturas dificultan el diseño e instalaciones.
- Las principales variedades recolectadas son la luga y el cochayuyo. Otras variedades como el pelillo y la chasca crecen en el borde costero sin ser recolectadas.
- Se recolectan en promedio  $300[kg]$  de algas al mes, de los cuales un tercio corresponde a la Luga.
- De las algas recolectadas, el 25 % corresponde a descartes.
- En una vivienda que cría 11 porcinos, se produce un aproximado de  $24[kg]$  de purines por día.

Se consultó en dos viviendas la opinión respecto a la instalación de un biodigestor para producción de biogás. La respuesta de los habitantes a la iniciativa resulta positiva, manifestando ser beneficioso para ahorrar costos de leña y/o gas. La comunidad utiliza leña para satisfacer gran parte de sus necesidades energéticas, esta se compra a \$18.000 el metro cuadrado, con rendimiento de una semana. Además, utilizan gas licuado para complementar el consumo de leña, el cual tiene un costo de \$25.500 el balón de  $15[kg]$ , con duración relativa al mes.

Tomando en cuenta los antecedentes señalados, se concluye que la alternativa viable a estas problemáticas es instalar un biodigestor por hogar. Para esto, se considera la instalación de un biodigestor a escala pioloto en una vivienda. Esto se puede extrapolar a otros hogares, dependiendo de los residuos orgánicos que cada habitante gestione. De la evaluación técnica se obtienen las dimensiones del biodigestor, gases de salida y caracterización del efluente en función de los residuos orgánicos presentados.

## 5. Metodología

En la figura 6 se muestra un diagrama de la metodología a seguir para la evaluación técnica y económica del proyecto. Esta inicia con la idea del proyecto, seguido de un estudio de mercado y estado del arte de los insumos y productos. El estudio técnico define las bases, condiciones, tratamiento y posibles limitantes técnicas. La oportunidad de negocio contempla una visita a la comunidad, el formato del producto y el diseño de la operación. En la evaluación técnica se calculan los balances de masa y energía, la cantidad producida, selección del biodigestor a partir de los cálculos, aspectos legales, ambientales y recomendaciones. La evaluación económica privada y social incluye el flujo de caja e indicadores económicos como VAN, TIR y Payback. El análisis de sensibilidad, considera cuatro escenarios posibles, combinando la temperatura y el índice de reducción de sólidos volátiles. Y la evaluación económica social que analiza la rentabilidad de una alternativa con VAN privado negativo.

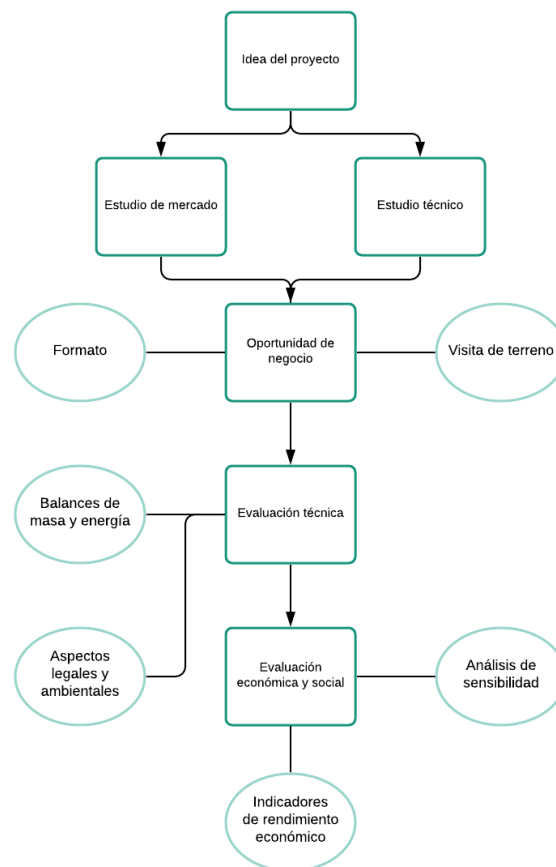


Figura 6: Esquema de la metodología del proyecto. El esquema contempla cinco etapas generales: Idea del proyecto, Estudio técnico/mercado (búsqueda bibliográfica), oportunidad de negocio, Evaluación técnica/económica (teórico) y análisis de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia

## 6. Evaluación técnica, resultados y discusión

### 6.1. Caso base

La visita de terreno (ver Anexo C) permite definir y establecer un flujo de purines de porcino de  $23.980[g/d]$  y un flujo de descartes de algas secas de  $2.509[g/d]$  por casa.

### 6.2. Materia prima

La materia prima a utilizar corresponde a una mezcla de algas y purines. Los purines se obtienen de una vivienda que cría 11 porcinos, esto corresponde a  $23.980[g/d]$ . La temporada de algas dura 8 meses, recolectando en promedio  $300[kg/mes]$  de alga seca, de los cuales, el 25% corresponde a descartes. Para la co-digestión, se alimenta con las mismas cantidades de sólidos volátiles de purines y alga seca (1:1), esto equivale a  $2.509[g/d]$  de alga seca (ver Anexo D).

En la Tabla 11 se resumen los cálculos de la composición de la mezcla (ver Anexo D). La mezcla contiene un 16,12% de sólidos totales (recomendable para biodigestores CSTR).

Tabla 11: Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de  $C, H, O, N$  y  $S$  están calculados respecto a los  $SV$ .

| Compuesto  | Valor [g/d] | Porcentaje % |
|------------|-------------|--------------|
| $M_T$      | 26.489      | 100          |
| $M_{agua}$ | 22.220      | 83,88        |
| $ST$       | 4.269       | 16,12        |
| $SV$       | 3.261       | 12,31        |
| $C$        | 1.441       | 44,20        |
| $H$        | 193         | 5,93         |
| $O$        | 1.515       | 46,46        |
| $N$        | 86          | 2,63         |
| $S$        | 26          | 0,79         |

Los purines contienen un importante porcentaje de agua, sin embargo, este porcentaje podría variar dependiendo del tiempo en que la materia prima queda expuesto al aire. Para mantener el porcentaje de humedad deseado, se propone utilizar agua lluvia o agua de mar en su defecto.

### 6.3. Pre-tratamiento

Los descartes de algas se deben lavar, teniendo cuidado que la composición de cloruro de sodio no sobrepase el 4%, ya que a concentraciones mayores, se inhibe la formación de metano. La salinidad del agua de mar en la zona presenta una composición de 3,5% [37]. Por esta razón, cuando sea posible, se recomienda el almacenado de agua lluvia para lavar las algas.

Las algas se deben almacenar en un lugar seco. Antes de mezclar con los purines, hay que majar las algas con un mortero para aumentar la velocidad de hidrólisis en el proceso de digestión. Posteriormente, se pesa la cantidad requerida de algas y se mezcla con los purines, teniendo cuidado de mantener el porcentaje de humedad o la relación agua:sólidos totales indicado en la Tabla 11.

## 6.4. Dimensionamiento del biodigestor

### 6.4.1. Ecuación de diseño

La fermentación se realiza en un reactor CSTR. De esta forma, el tiempo de retención hidráulico (THR) es igual al tiempo de retención de sólidos [38]. El parámetro de diseño para el dimensionamiento del biodigestor es el volumen, el cual se obtiene con la ecuación 3.

$$V_d = F_{out} \cdot THR \quad (3)$$

Conociendo el Flujo volumétrico de salida y el tiempo de retención hidráulico, se puede calcular el volumen del digestor. THR se obtiene con la ecuación 4.

$$\mu = \frac{1}{THR} \quad (4)$$

Donde:

$V_d$ : Volumen del digestor [L]

$THR$ : Tiempo de retención hidráulico [d]

$F_{out}$ : flujo volumétrico de salida [L/d]

$\mu$ : Velocidad específica de crecimiento de los microorganismos [1/d].

### 6.4.2. Parámetros y cinética de crecimiento

Los datos experimentales fueron obtenidos de la digestión anaeróbica de *Laminaria digitata* en un reactor batch de 180[L] a 25 °C, con un rendimiento de 0,32[L/gSV] de biogás, índice de reducción de sólidos volátiles de 87% [27] y OLR de 3[g/L · d]. En la Figura 7 se muestra la producción experimental de biogás a distintas temperaturas, expresado en litros por kilogramos de sólidos volátiles (B).

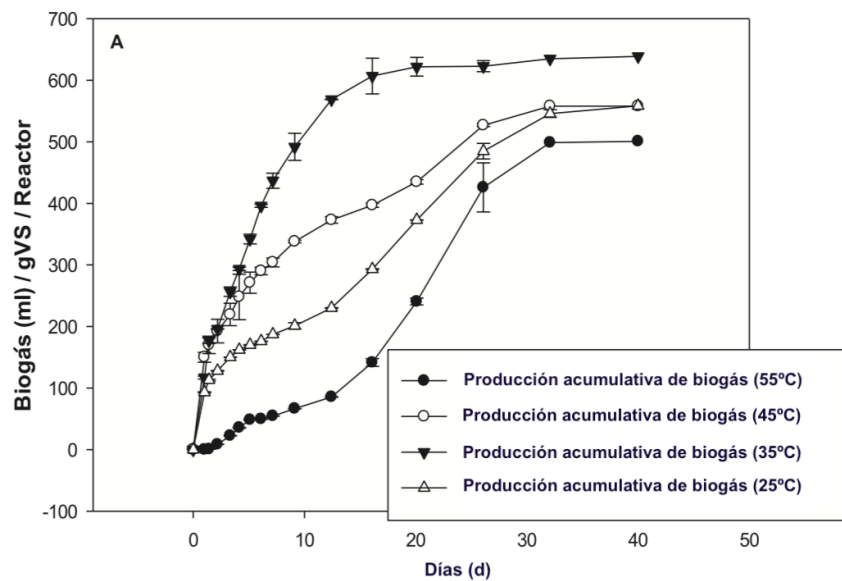


Figura 7: Producción de biogás  $B[L/gSV]$  en función de los días a distintas temperaturas [27]. Esto a partir de la digestión anaeróbica de *Laminaria digitata*.



La proporción de purines:algas 1:1, fue escogida de acuerdo a la co-digestión de purines de pollo y paja de trigo [10], esto por presentar mejor rendimiento ( $0,25[L/gSV]$ ) en la producción de biogás (ver Anexo E).

La velocidad de crecimiento de los microorganismos, considerando la hidrólisis como la etapa limitante y la inhibición por sustrato, esta dada por la ecuación de Contois[39][40]:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S_{out}}{\beta \cdot X_{out} + S_{out}} \quad (5)$$

Donde:

$\mu_{max}$ : Velocidad máxima específica de crecimiento [ $1/d$ ].

$S_{out}$ : Concentración de sólidos volátiles a la salida [ $g/L$ ].

$X_{out}$ : Concentración de biomasa a la salida [ $g/L$ ].

$\beta$ : Parámetro que caracteriza la afinidad de los microorganismos por el sustrato insoluble.

La concentración de sustrato se expresa en términos de los sólidos volátiles, ya que es la parte de la materia capaz de formar el producto (metano). El índice de reducción de sólidos (58,30%) permite calcular la concentración de salida. Éste se obtiene de la co-digestión de purines de rumiante y paja de maíz [41] en proporciones 1:1. Del balance de masa (ver Anexo F) y la ecuación 5 se obtiene la ecuación la siguiente expresión:

$$\frac{B_0}{B_0 - B} = \frac{\mu_{max} \cdot THR}{K} + \frac{K - 1}{K} \quad (6)$$

La ecuación 6 es una linealización que permite obtener  $\mu_{max}$  y  $K$  conociendo la producción de metano a distintos tiempos de retención hidráulico. No se encontró en la literatura un experimento que relacione THR con la producción de metano en co-digestión, sin embargo, se decide aplicar la ecuación 6 a todos los datos experimentales de la Figura 7 como aproximación. Se suprimen algunos puntos de las curvas sigmoideas con el objetivo de mejorar el ajuste.

Los puntos experimentales se extraen con MATLAB®. Se utiliza la ecuación 6 para realizar un ajuste lineal en Excel®. En la Tabla 12 se muestran los resultados de  $K$ ,  $\mu_{max}$  y  $THR$  a distintas temperaturas. En la Figura 8 se muestra la variación de  $\mu_{max}$  respecto a la temperatura.

Tabla 12: Resumen de parámetros cinéticos a distintas temperaturas.

| Parámetro        | Valor(25°C) | Valor(35°C) | Valor(45°C) | Valor(55°C) |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\mu_{max}[1/d]$ | 0,103       | 0,230       | 0,206       | 0,108       |
| $K$              | 1,830       | 1,990       | 2,865       | 1,422       |
| $THR[d]$         | 35          | 17          | 25          | 28          |

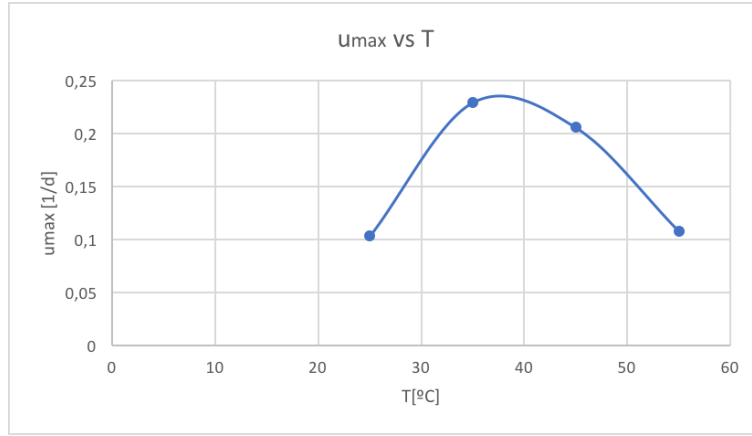


Figura 8: Variación de  $\mu_{max}$  respecto a la temperatura a partir de la digestión anaeróbica de *Laminaria digitata*.

Tomando los parámetros cinéticos encontrados a la temperatura de 25°C, el volumen del biodigestor con un margen de seguridad del 20 % es:

$$V_d = 843,09[L] \cdot 1,2 = 1011,7[L] \quad (7)$$

A pesar que los datos para la linealización no son los requeridos, el ajuste tiene un buen comportamiento cuando la curva no es sigmoidea. Se obtienen valores coherentes para la tasa de crecimiento específica y los tiempos de retención hidráulico. En la Figura 8 se observa que el óptimo de la velocidad máxima de crecimiento se encuentra entre 35°C y 40°C, valores consistentes para el crecimiento de los microorganismos en función de la temperatura.

Generalmente se trabaja con microorganismos en un tipo de fermentación Mesófilo (ver Anexo B), con temperatura mínima de 15°C. La zona geográfica presenta temperaturas mínimas de hasta 6°C en invierno, no obstante, al enterrar el biodigestor en el subsuelo se puede aprovechar el gradiente geotérmico de la tierra para mantener la temperatura de la mezcla mayor a los 6°C.

En el Anexo G se encuentra el balance de energía y el cálculo de la temperatura de la mezcla cuando el biodigestor es enterrado en el subsuelo, la cual corresponde a 14°C en invierno. Si bien esta temperatura representa el peor caso a considerar para el dimensionamiento del biodigestor, se escoge una temperatura mínima de 25°C para el caso base, debido a la disposición de recursos bibliográficos. Al realizar una extrapolación polinómica de los datos de la Figura 8, considerando que a 0°C la velocidad de crecimiento de los microorganismos es nula, se obtiene que, a 14°C la velocidad máxima de crecimiento es 0,011[1/d]. Este valor de  $\mu_{max}$  será utilizado para realizar un análisis de sensibilidad. No obstante, es necesario tener en cuenta que se requiere un estudio riguroso de la temperatura y la actividad de los microorganismos a temperaturas bajas.

## 6.5. Flujo de metano, gases de salida y agitación

El flujo de metano a 25°C se obtiene con la ecuación 8. En la Tabla 13 se resumen los principales parámetros de diseño del biodigestor. Para calcular la composición de salida de metano, se utiliza la ecuación de Buswell y Boyle [42] (ver Anexo H). Con las composiciones calculadas y el flujo de metano, se calculan los flujo de gases de salida (Tabla 14).

$$F_{out} \cdot P_{out} = Y_{P/S} \cdot \mu \cdot (S_{in} - S_{out}) \cdot V_d \quad (8)$$

Tabla 13: Resumen de parámetros de diseño.

| Parámetro           | Descripción                        | Valor |
|---------------------|------------------------------------|-------|
| $Y_{P/S}$           | Rendimiento de sustrato a producto | 0,56  |
| $C : N$             | Relación carbono/nitrógeno         | 16,84 |
| $ORL[g/L \cdot d]$  | Tasa de carga orgánica             | 3,87  |
| $\eta_{exp}[L/gSV]$ | Rendimiento experimental           | 0,33  |
| $\eta_{cc}[L/gSV]$  | Rendimiento a conversión completa  | 0,40  |

El rendimiento de sustrato a producto es un parámetro de diseño importante que permite obtener directamente la producción de metano, conociendo el índice de reducción de sólidos volátiles, la tasa de crecimiento y el volumen del biodigestor. La tasa de carga orgánica se encuentra dentro de los valores sugeridos. La relación C:N se encuentra bajo el valor recomendado de 20:1 a 30:1, por lo que se debe analizar la incidencia de este valor en la producción de biogás.

El rendimiento experimental se calcula con la cantidad de metano obtenida, mientras que el rendimiento a conversión completa se calcula con el valor de metano obtenido a partir de la ecuación de Buswell y Boyle. Se aprecia que el rendimiento experimental es menor al rendimiento a conversión completa como se esperaba.

Tabla 14: Flujos máscicos y composición del gas a partir del flujo de metano calculado.

| Compuesto | Valor [kg/mes] | Composición (%p/p) |
|-----------|----------------|--------------------|
| $CO_2$    | 67,47          | 69,88              |
| $CH_4$    | 22,94          | 23,76              |
| $N_2$     | 2,11           | 2,19               |
| $H_2$     | 0,45           | 0,47               |
| $H_2S$    | 0,68           | 0,70               |
| $H_2O$    | 2,90           | 3,00               |
| Total     | 96,55          | 100,00             |

Considerando que la densidad del metano es  $0,72[kg/m^3]$  (ver Anexo I), la producción de metano es  $1,06[m^3/d]$ . Por otra parte, se tiene que la potencia generada por  $1[m^3]$  de biogás es  $6500[Wh]$  (Tabla 4).

Como supuesto, se asumió que el reactor CSTR se encuentra perfectamente agitado. Para procesos de producción de biogás, la agitación leve permite mantener una distribución homogénea del sustrato y una temperatura uniforme, causando un incremento en la velocidad de reacción, sin embargo, una mayor agitación podría causar el efecto contrario. Además, un sistema de agitación se hace necesario para biodigestores que superan los  $100[m^3]$  de capacidad [43].

La agitación se calcula en el Anexo J, resultando una potencia de  $70[W]$ . Si se asume leve agitación, realizada por una hora al día, la potencia neta generada (descontando la consumida por el agitador) es:

$$P_{generada} = 6500[Wh] \cdot 1,06[m^3/d] - 70[Wh/d] = 6800[Wh/d]$$

Al transformar este valor a kilogramos de metano por mes, resulta un valor de  $22,71[kg/mes]$ . Este valor puede utilizarse para realizar un análisis de sensibilidad económico, sin embargo, el valor de la potencia consumida por el agitador es bajo y no se requiere para el volumen del reactor

calculado, por lo cual será omitido del análisis de sensibilidad.

## 6.6. Post-tratamiento

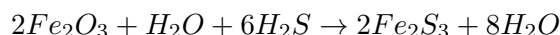
El biogás producido contiene impurezas y gases contaminantes como sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles, humedad, siloxanos, espumas y partículas en suspensión. En plantas de producción de biogás, estos deben ser reducidos, ya que contaminan el medio ambiente, corroen los equipos y son dañinos para la salud. Por otra parte, la depuración del gas es conveniente, ya que aumenta su poder calorífico [8].

Para aplicaciones simples de biogás como calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, la remoción de  $CO_2$  del biogás no es necesaria y éste simplemente pasa a través del quemador o motor [8]. El modo más simple de uso del gas es la combustión directa en instalaciones cercanas al digestor, sin otro tratamiento que la reducción de  $H_2S$ , ya que, a concentraciones sobre 100 ppm en volumen, resulta muy tóxico.

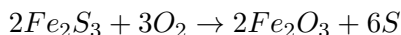
De acuerdo al volumen del biodigestor calculado, se proponen tres métodos de depuración del biogás:

### 6.6.1. Esponja de hierro

Una esponja de hierro está formada por virutas o astillas de madera impregnadas con óxido de hierro hidratado, que al entrar en contacto con el  $H_2S$  forma sulfuros de hierro:



Cuando la esponja de hierro gastada se retira y queda expuesta al aire, puede reoxidarse y dar lugar a óxido de hierro y azufre en estado puro [44]:



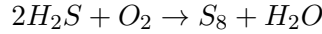
Este tipo de tecnología ha sido muy utilizada porque logra reducir los niveles de  $H_2S$  de 3600[mg/L] a 1[mg/L]. Sus beneficios se resumen en una fácil y efectiva operación, sin embargo, hay desventajas que han llevado a la disminución de su uso en los últimos años, ya que, al ser una reacción exotérmica, acumula residuos peligrosos que pueden causar riesgo de incendio [45].

### 6.6.2. Filtración con medio filtrante KDF 85

El medio KDF 85 reduce  $H_2S$  mediante la conversión del sulfuro de hidrógeno gas a la forma insoluble sulfuro, que es inerte y precipita. Cuando el gas entra en contacto con el cobre del medio KDF 85, este pierde un electrón y el sulfuro gana el electrón, formándose sulfuro de cobre y agua. El sulfuro de cobre es insoluble en agua y puede extraerse mediante retrolavado del medio filtrante KDF 85 con agua caliente. La desventaja de éste método es que se requiere lavado con agua caliente del medio filtrante [46].

### 6.6.3. Filtro de carbón activado

El carbón activado puede ser impregnado con óxidos metálicos, hidróxido de sodio o yoduro de potasio para acelerar la eliminación de  $H_2S$  mediante la reacción de Claus. Este proceso ocurre a temperatura ambiente y presión atmosférica [45]. El  $H_2S$  es transformado en azufre elemental y agua:



En esta reacción, es necesario conservar los niveles de oxígeno entre 0,3 – 0,5 %. Esta tecnología permite una remoción de hasta el 100 % de  $H_2S$  [45]. La desventaja de este tipo de tecnología es que el filtro agotado debe ser cambiado cada año, generando residuos que deben ser dispuestos en vertederos controlados.

De acuerdo a las tecnologías expuestas y la escala de producción de biogás, el filtro de carbón activado presenta mayores ventajas.

#### 6.6.4. Bioabono

La composición de la corriente de efluentes se calcula con los balances de masa de entrada por especie y los balances de masa en la corriente de gas (ver Anexo K). En la Tabla 15 se resumen los flujos másicos en la corriente de efluente.

Tabla 15: Flujos másicos en la corriente de efluente.  $M_E$ : Flujo másico total del efluente.  $M_{E,SV}$ : Flujo másico de sólidos volátiles en el efluente.  $M_{E,H_2O}$ : Flujo másico de agua en el efluente.  $M_{E,C}$ : Flujo másico de carbono en el efluente.  $M_{E,N}$  Flujo másico de nitrógeno en el efluente.

| Flujo        | Valor | Unidad |
|--------------|-------|--------|
| $M_E$        | 23270 | g/d    |
| $M_{E,SV}$   | 43    | g/d    |
| $M_{E,H_2O}$ | 22123 | g/d    |
| $M_{E,C}$    | 255   | g/d    |
| $M_{E,N}$    | 15    | g/d    |

El carbono orgánico total (COT) se puede aproximar utilizando el flujo de carbono en el efluente (ver Anexo K). Para aguas residuales urbanas se tiene una correlación entre el COT y la  $DBO_5$  dada por la siguiente expresión [34]:

$$DBO_5 = 1,87 \cdot COT - 17 \quad (9)$$

En la Tabla 16 se muestran algunos parámetros calculados que caracterizan la corriente de efluente (ver Anexo K). El porcentaje de nitrógeno en el efluente equivale al mismo que se encontró en un biodigestor de clima frío [47]. El valor de la  $DBO_5$  se encuentra bajo los 200[mg/L], siendo permitido para riego.

Tabla 16: Caracterización del efluente.  $R_C$  y  $R_N$  es la reducción de carbono y nitrógeno respectivamente, en relación al carbono y nitrógeno de la corriente de entrada  $M_T$ .

| Parámetro          | Valor calculado |
|--------------------|-----------------|
| $C : N$            | 16,84           |
| $R_C$ (%)          | 82,34           |
| $R_N$ (%)          | 82,33           |
| $N$ (%)            | 0,06            |
| $C$ (%)            | 1,10            |
| $COT$ [mg/d · L]   | 91,82           |
| $DBO_5$ [mg/d · L] | 154,70          |

## 7. Biodigestor, instalación y condiciones de operación

### 7.1. Componentes del biodigestor

En base a los cálculos realizados, se propone la compra de un biodigestor con el volumen calculado. Se encontró un biodigestor de polietileno de 1.100[L] marca Durman®[48]. Adicional, se sugiere la instalación de una caja de registro de lodos, un campo de infiltración, un filtro de carbón activado y una válvula de presión [49]. En la figura 9 se muestra el esquema del biodigestor cotizado y sus componentes. Dentro de los beneficios que presenta el biodigestor se mencionan [48]:

- No consume energía eléctrica.
- Instalación rápida y económica.
- Bajos costos de operación y mantenimiento.
- Diseño compacto de 1,85[m] de alto y 1,14[m] de diámetro.

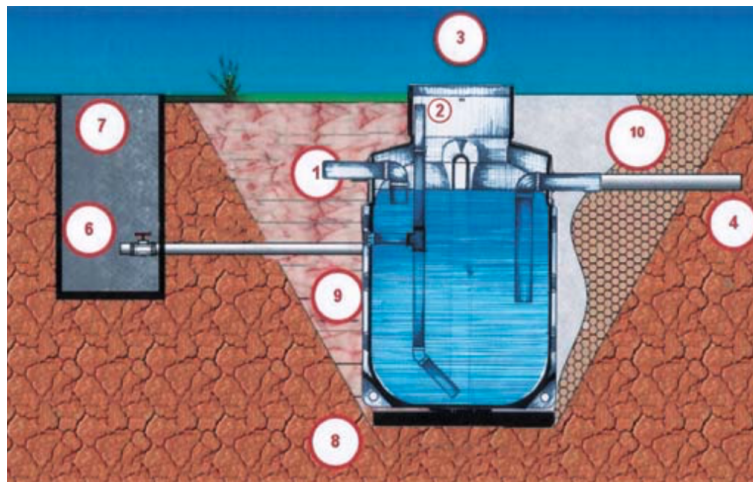


Figura 9: Esquema del biodigestor y sus componentes. 1. Tubería de entrada. 2. Tubería de salida del biogás (respiradero). 3. Acceso para registro y limpieza. 4. Tubería de salida. 5. Biodigestor de polietileno. 6. Tubería de extracción de lodos. 7. Caja de registro de lodos. 8. Base de concreto. 9. Relleno (en capas de 0,2 [m]). 10. Capa de mortero reforzado con malla. [50].

En la Figura 9 se muestra que la materia orgánica ingresa por la tubería 1 y se deposita en el fondo del biodigestor. En este biodigestor se forman dos fases, una sólida y otra líquida. La fase líquida sale por rebosadero en la tubería 4 y la fase sólida se purga cada 3 meses por la tubería 6. Cabe destacar que este biodigestor, por sus características, no posee un sistema de agitación y filtración de gases, sin embargo, se pueden realizar modificaciones para cumplir los requerimientos.

Por especificaciones del fabricante, se tiene que este tipo de biodigestor produce entre 0,23 a 0,34[m<sup>3</sup>/d] de biogás con 2,2kg/d de purines de porcino [50][8]. Si se asume que el 30 % del biogás

es metano, 6,8% de la masa de purines son sólidos volátiles, se tiene que en promedio, el biodigestor Durman tiene un rendimiento de:

$$\eta_{Durman} = \frac{(0,34 + 0,29) \cdot 0,3}{2 \cdot 2,2 \cdot 0,068} = 0,58[L/gSV] \quad (10)$$

Para calcular el ORL, considerando que el llenado es de 80% del volumen, se tiene:

$$ORL = \frac{2,2 \cdot 1000}{1100 \cdot 0,8} = 2,5[g/L \cdot d] \quad (11)$$

El rendimiento calculado para el biodigestor comercial es mayor que el calculado (Ver Tabla 13). Si bien los cálculos se encuentran subestimados, hay que considerar que se trabaja con diferentes materias primas.

La agitación no será considerada, ya que el volumen del biodigestor es menor a  $100[m^3]$ . Además, de acuerdo a las especificaciones del fabricante, este biodigestor produce mayor cantidad de metano que el reactor CSTR diseñado.

En caso de ser necesario la implementación del reactor CSTR, se propone eliminar la tubería 6 y conectar la cámara de registro de lodos a la tubería 4. De esta forma, es posible implementar agitación en el interior del tanque. La separación sólido líquido se podría producir en la cámara de registro de lodos, conectando una tubería en el rebosadero para el líquido clarificado y una tubería para los sólidos depositados.

El biogás sale saturado de vapor de agua, que puede condensarse en tuberías, causando obstrucciones en los puntos más bajos. Para frenar el agua, se instala una válvula de bola para purgar el agua o instalar una tubería con pendiente mínima del 2% hacia el biodigestor [50], para que el agua condensada vuelva al tanque.

La corriente líquida en el rebosadero no se debe descargar directamente en algún cuerpo receptor o corriente de agua; debe construirse un campo de infiltración (ver Figura 10) [50]. El campo de infiltración permite aprovechar el agua tratada en cultivos. Consiste en un arreglo de tuberías con ranuras y capas de tierra para la depuración del agua y nutrientes.

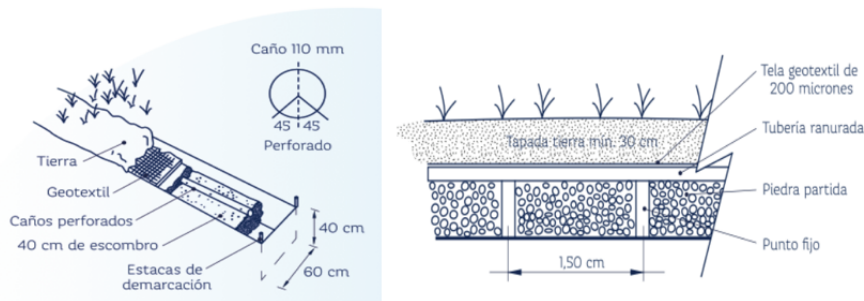


Figura 10: Campo de infiltración [48].

## 7.2. Instalación del Biodigestor

- Ubicación del biodigestor. Se debe escoger una zona alta (para evitar la formación de charcos por lluvia) y alejada de cuerpos de agua (lagunas, arroyos, pozos). Se debe prever futuras

construcciones y evitar el tránsito de vehículos por encima del biodigestor, cámara de lodos y campo de infiltración [50] (ver Anexo L).

- **Excavación.** Se debe identificar el tipo de suelo, ya que con esto, se realiza el ángulo de excavación. Una vez realizada la excavación, se deben sellar las paredes del agujero con concreto, utilizando mallas para hormigón. Se posiciona el biodigestor en la cámara de hormigón y se sella con tierra a medida que se llena el biodigestor con agua [50].
- **Caja de registro de lodos.** Es una excavación a 40[cm] de distancia del biodigestor que se puede sellar con concreto. Esta debe tener un volumen de 200[L] (volumen proporcional al biodigestor) [50].
- **Campo de infiltración.** Corresponde a un arreglo de 40[cm] de piedra partida y 30[cm] de tierra con una tela de geotextil [50].

### 7.3. Modo de operación

Se inicia el arranque con una mezcla de agua:sólidos de 1:1 hasta el 80% del volumen del biodigestor. Se alimenta con la misma proporción de mezcla durante los primeros 8 días [50]. Pasado los 8 días, se mantiene la proporción calculada agua:sólidos de 1:5 diseñado.

### 7.4. Efluentes

En este tipo de biodigestores se puede evaluar la calidad del agua del efluente para regadíos, siempre y cuando, el análisis bioquímico se encuentre dentro de los rangos permitidos. En la Tabla 17 se muestra la eficiencia de remoción para un biodigestor de la marca Rotoplas®[50]. Se observa que la  $DBO_5$  especificada por el fabricante es menor a la calculada.

Tabla 17: Eficiencia de remoción del biodigestor Rotoplas [50].

| Parámetro                    | Remoción | Posterior al tratamiento |
|------------------------------|----------|--------------------------|
| $DBO_5$                      | 94 %     | 15-80[mg/L]              |
| $DQO$                        | 88 %     | 80-190[mg/L]             |
| Grasas y aceites             | 93 %     | 30-45[mg/L]              |
| $SS$ (Sólidos sedimentables) | 98 %     | 0,05-0,3[mg/L]           |
| $pH$                         | Estable  | 7,5-8,5                  |

### 7.5. Recomendaciones

Para el mantenimiento del biodigestor y manejo de lodos, se deben utilizar guantes, botas, mascarilla y el lavado de manos después de cada mantenimiento. Los lodos y efluente líquido no deben ser dispuestos en drenajes [50].

Cuando se dificulte la entrada del material de carga, debido a la acumulación de sólidos dentro del biodigestor, se debe evacuar por lo menos una quinta parte del contenido del biodigestor. Esta operación se recomienda cada 2 o 3 años para evitar la acumulación de sólidos. En caso de tener que vaciar completamente el biodigestor es necesario almacenar una parte del lodo para iniciar nuevamente el arranque del biodigestor [50].



Si se introducen volúmenes de mezcla mayores a los de diseño, se presenta un arrastre de las bacterias que degradan la materia orgánica y los tiempos de retención hidráulica serán muy cortos. Esto puede ocasionar problemas de acidificación del proceso, malos olores, disminución en la producción de biogás y mal olor en el bioabono. Si se presenta esta situación, es necesario disminuir la carga orgánica y utilizar una cucharada de cal para subir el pH a 7 [50].

## 8. Marco legal y financiamiento

### 8.1. Marco legal

Al ser un proyecto de pequeña escala, solo se toma en consideración aspectos del decreto 191 del reglamento de instaladores de biogás. De acuerdo al artículo 16 del decreto 191, el biodigestor debe permitir su propio soporte y ser hermético, contando además con dispositivos de seguridad que permitan mantener la presión interna. Se debe disponer de un extintor de incendios. Por otra parte, de acuerdo al capítulo 8 del decreto 191, el instalador del biodigestor debe contar con licencia de clase 4, para lo cual, debe poseer el título de alguna ingeniería civil o ingeniería en ejecución.

### 8.2. Financiamiento

La alternativa inmediata de financiamiento es el capital propio, sin embargo, al considerar el fomento a ERNC por parte del estado y el trabajo con comunidades indígenas, es posible obtener financiamiento estatal del proyecto. A continuación, se describen algunas formas de financiamiento que se ajustan al proyecto:

- Fondo Chile compromiso de todos. Está destinado a proyectos de creación, activación o fortalecimiento de asociatividad de personas o grupos en situación de pobreza y vulnerabilidad, enfocado en problemas de subsistencia y producción de bienes y/o servicios. El monto máximo otorgado es de 30.000.000\$.
- Fondo de protección ambiental. El plan busca financiar iniciativas que contribuyan a mejorar la calidad ambiental del territorio, sensibilizando a la ciudadanía, a través de la valoración del entorno y la educación ambiental. Podrán postular a la ejecución de: un punto verde, invernadero y compostaje, educación ambiental y sistema fotovoltaico, entre otros. El monto de financiamiento va desde los 4.000.000\$ a los 5.000.000\$.
- Subsidio creciendo del comité de desarrollo y fomento indígena. Orientado a apoyar organizaciones indígenas con sus iniciativas o proyectos productivos. Financia hasta el 90% del proyecto.

## 9. Evaluación económica-social y discusión

Se considera un modelo de negocio del tipo autoabastecimiento, siendo los ingresos del proyecto un ahorro monetario en el gasto energético de una vivienda. Como valor agregado se genera bioabono que se utiliza como fertilizante.

### 9.1. Modelo Canvas

En la Tabla 18 se muestra una descripción general del negocio mediante el modelo Canvas. Este se simplifica en 4 grandes áreas: clientes, oferta, flujo de ingresos y estructura de costos.

Tabla 18: Modelo Canvas.

| Área   | Análisis  |
|--|---|
| <b>Cientes</b><br>-Segmento de clientes<br>-Propuesta de valor<br>-Canales<br>-Relación con los clientes | -Miembros de la comunidad.<br>-Biogás como sustituto de gas o leña.<br>-Formato individual en vivienda.<br>-Energía y abono de autoconsumo. |
| <b>Oferta</b><br>-Recursos clave<br>-Actividades clave<br>-Socios clave                                  | -Residuos orgánicos.<br>-Disposición y almacenamiento de la materia orgánica.<br>-Rol del estado impulsando ERNC.                           |
| <b>Flujo de ingresos</b>   | -Ahorro energético  |
| <b>Estructura de costos</b>  | -Compra de biodigestor.<br>-Instalación del biodigestor.<br>-Filtros, mantención, transporte.   |

### 9.2. Análisis FODA

Las principales fortalezas identificadas son el uso de descartes algales y residuos agropecuarios para generar energía sustentable y amigable con el medio ambiente en zona rural de difícil acceso. La principal amenaza identificada son otras energías renovables como paneles solares o energías convencionales como gas, leña etc. La oportunidad identificada se relaciona con la participación del estado en fomentar la utilización de ERNC. Y las debilidades se relacionan con la disponibilidad de los recursos, condiciones de operación e intermitencias del proceso. En la Figura 11 se muestra el análisis FODA del modelo de negocio.

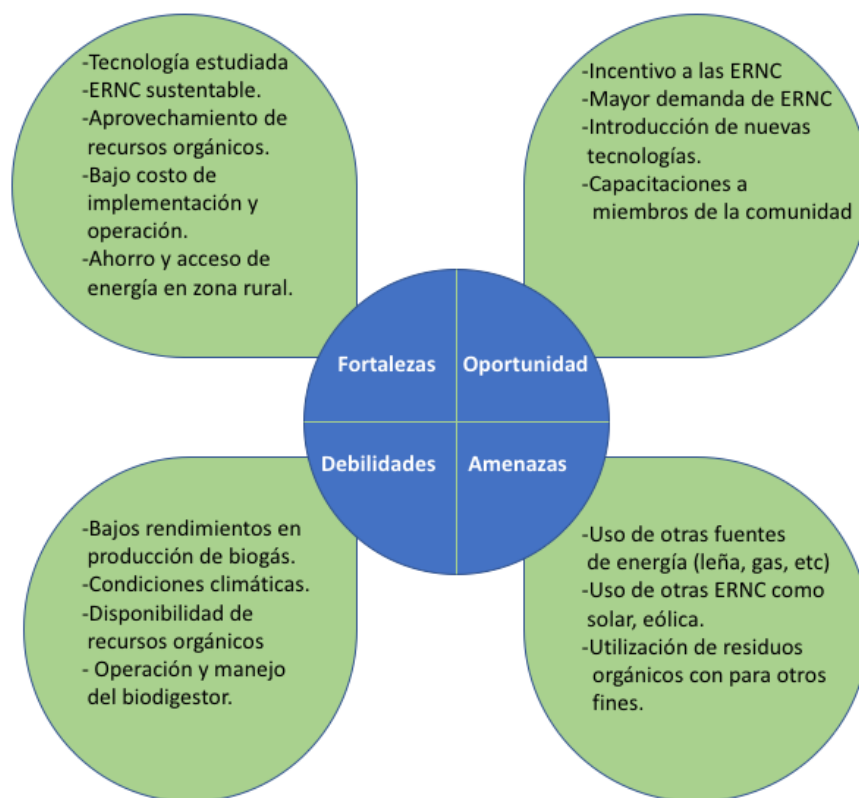


Figura 11: Análisis FODA.

### 9.3. Evaluación económica privada y análisis de sensibilidad

La evaluación privada contempla la inversión con capital propio o financiamiento a precios de mercado. En este escenario se definen cuatro casos que combinan la reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) y la temperatura de la mezcla en el reactor. En la Tabla M.1 se definen los datos por conceptos y precios utilizados para calcular los flujos de cajas e indicadores económicos.

Tabla 19: Conceptos y precios.

| Descripción                 | Valor        |
|-----------------------------|--------------|
| Precio del biodigestor (\$) | 266.500 [59] |
| Vida útil (años)            | 10           |
| Precio gas (\$/kg)          | 1.700        |
| Producción de gas (kg/año)  | 275          |
| Precio filtro (\$)          | 23.000       |
| precio válvula (\$)         | 20.000 [60]  |
| Instalación (\$)            | 100.000      |
| Pago de ingeniero (\$)      | 200.000      |
| Tasa de retorno(%)          | 15           |
| Impuesto(%)                 | 25           |

#### 9.3.1. Caso base

El caso base corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 58,3% y una temperatura de 25°C. En la Figura M.1 se muestra el flujo de caja del caso

base, con una tasa de impuesto del 25 %.

| Periodo                   | 0                  | 1               | 2               | 9               | 10              |
|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ingresos                  | 467995,4           | 467995,4        | 467995,4        | 467995,4        | 467995,4        |
| Depreciación              | -26649,4           | -26649,4        | -26649,4        | -26649,4        | -26649,4        |
| Costos                    | -23000,0           | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        |
| Utilidad antes impuesto   | 418346,0           | 418346,0        | 418346,0        | 418346,0        | 418346,0        |
| Impuesto(25%)             | -104586,5          | -104586,5       | -104586,5       | -104586,5       | -104586,5       |
| Utilidad despues impuesto | 313759,5           | 313759,5        | 313759,5        | 313759,5        | 313759,5        |
| Depreciación              | 26649,4            | 26649,4         | 26649,4         | 26649,4         | 26649,4         |
| Inversión                 | -703805,59         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-703805,6</b>   | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>\$1.004.628</b> |                 |                 |                 |                 |
| <b>TIR</b>                | <b>47%</b>         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Payback</b>            | <b>1,5</b>         |                 |                 |                 |                 |

Figura 12: Flujo de caja caso base. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos, ya que equivalen a los mismos valores que los otros periodos.

Tabla 20: Indicadores económicos del caso base.

| Indicador      | Valor     |
|----------------|-----------|
| VAN(\$)        | 1.004.628 |
| TIR (%)        | 47        |
| PayBack (años) | 1,5       |

En este caso, la producción de metano es  $275[kg/año]$  y el volumen del reactor  $843[L]$ . En la Tabla 20 se muestran los indicadores económicos para el caso base, resultando un proyecto rentable, con VAN positivo de \$1.004.628, una tasa de retorno del 47 % y un periodo de recuperación de 1,5 años.

### 9.3.2. Alternativa I

La alternativa I corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 58,3 % y una temperatura de  $14^{\circ}C$ .

Tabla 21: Indicadores económicos de la alternativa I.

| Indicador      | Valor      |
|----------------|------------|
| VAN (\$)       | -2.363.404 |
| TIR( %)        | -          |
| PayBack (años) | -          |

En este caso, la producción de metano es  $273[kg/año]$  y el volumen del reactor  $7.805[L]$ . En la Tabla 21 se muestran los indicadores económicos para la alternativa I, resultando un proyecto no rentable, con VAN negativo de \$ - 2.363.404.

### 9.3.3. Alternativa II

La alternativa II corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 80 % y una temperatura de  $14^{\circ}C$ .

Tabla 22: Indicadores económicos de la alternativa II.

| Indicador      | Valor      |
|----------------|------------|
| VAN(\$)        | -6.741.705 |
| TIR( %)        | -          |
| PayBack (años) | -          |

En este caso, la producción de metano es  $375[kg/año]$  y el volumen del reactor  $18.235[L]$ . En la Tabla 22 se muestran los indicadores económicos para la alternativa II, resultando un proyecto no rentable con VAN negativo de  $\$ - 6.741.705$ .

### 9.3.4. Alternativa III

La alternativa III corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 80 % y una temperatura de  $25^\circ C$ .

Tabla 23: Indicadores económicos de la alternativa III.

| Indicador      | Valor     |
|----------------|-----------|
| VAN (\$)       | 1.108.631 |
| TIR ( %)       | 35        |
| PayBack (años) | 2         |

En este caso, la producción de metano es  $375[kg/año]$  y el volumen del reactor  $1.951[L]$ . En la Tabla 23 se muestran los indicadores económicos para la alternativa III, resultando un proyecto rentable, con VAN positivo de  $\$1.108.631$ , una tasa de retorno del 35 % y un periodo de recuperación de 2 años.

Cuando  $I_d$  aumenta, el valor del VAN es mayor, este efecto se observa en la ecuación 8, ya que la producción de metano es directamente proporcional a  $I_d$ . Respecto a la temperatura, se tiene una incidencia directa en el tamaño del reactor, ya que, al disminuir la temperatura, disminuye  $\mu$ , el cual es inversamente proporcional al volumen del reactor.

La rentabilidad del proyecto se ve comprometida por el tamaño del reactor y la producción de metano, esto porque un reactor de mayor volumen, implica mayores costos de inversión. La alternativa I y II presentan VAN negativo ya que los costos del biodigestor, transporte e instalación no son amortiguados con los ingresos por producción de metano. La alternativa III presenta un aumento en el VAN respecto al caso base, sin embargo, la TIR es menor y el Payback mayor. Esto se explica porque el volumen del biodigestor en la alternativa III aumenta en casi al doble del volumen del caso base. Razón por la cual, el caso base presenta un mejor rendimiento económico.

$I_d$  no sólo incide en la producción de metano, sino en el tamaño del reactor, ya que a mayor  $I_d$ , mayor THR y con ello, aumenta el volumen de reactor. Por esta razón, las alternativas con 80 % de  $I_d$  tienen peor rendimiento económico. Cabe destacar que  $I_d$  es un parámetro fácil y económico de controlar a diferencia de la temperatura. En este escenario, sería interesante analizar si existe un óptimo en el rendimiento económico variando  $I_d$ .

Al considerar una temperatura de  $16,1^\circ C$ , resulta un VAN cercano a cero de  $\$ - 1.650$ . Con esto se deduce que la temperatura mínima a la cual el proyecto tiene VAN cero es aproximadamente  $16,1^\circ C$ . Si la temperatura es de  $22^\circ C$ , el VAN resultante es de  $\$970.139$ . En la Tabla 24 se resume el valor del VAN en función de la temperatura con un  $I_d$  de 58,3 %.

Tabla 24: Valor actual neto en función de la temperatura.

| Temperatura (°C) | VAN (\$)   |
|------------------|------------|
| 14               | -2.363.404 |
| 16,1             | -1.650     |
| 22               | 970.139    |
| 25               | 1.004.628  |

Según la dirección meteorológica de Chile, el promedio mensual de temperaturas en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre en la zona de carahue para el año 2020 son 8,3°C, 7,8°C, 7,7°C y 8,6°C respectivamente. Para los demás meses, el promedio de temperaturas máximas es 22°C y el promedio de temperaturas mínimas de 6,7°C. Con estos rangos de temperatura no es posible establecer un periodo de funcionamiento correcto para el biodigestor.

Lo más certero, es enterrar el biodigestor como se propuso, a 2[m] de profundidad para garantizar una temperatura homogénea de 14°C en los meses fríos. En esta línea, se propone investigar enterrar el biodigestor a mayor profundidad para alcanzar y garantizar una temperatura de 22°C, independiente de las temperaturas exteriores (ver Anexo B.2).

#### 9.4. Evaluación económica social

La evaluación económica social busca determinar la rentabilidad social de un proyecto, considerando costos y precios sociales, esto con el objetivo de maximizar el beneficio colectivo de la sociedad. Un proyecto puede no ser rentable para un particular y serlo para una comunidad o viceversa. Los criterios de rendimiento económico VAN social y VAN privado son similares. Estos se diferencian en que la valoración privada utiliza precios de mercado, mientras que la valoración social considera precios sombras, que buscan medir efectos indirectos y externalidades que mejoren el bienestar colectivo [51]. En la Tabla 25 se muestra criterio de ejecución de un proyecto privado y social [52].

Tabla 25: Criterio de ejecución de proyecto social y privado [52].

|                    | $VAN_{Privado} > 0$                | $VAN_{Privado} < 0$  |
|--------------------|------------------------------------|--|
| $VAN_{Social} > 0$ | Lo hace el privado                 | El Estado incentiva el proyecto (subsidio) o lo ejecuta directamente |
| $VAN_{Social} < 0$ | El Estado desincentiva el proyecto | No se ejecuta el proyecto  |

La valoración social de los costos de inversión, operación y mantención se realiza mediante los precios de mercado, aplicando un ajuste que refleje el verdadero costo para la sociedad de utilizar recursos en el proyecto. Para la compra de equipos e insumos, se descuenta el IVA y otros impuestos [53]. Respecto a la mano de obra, se aplica un factor de corrección para cada nivel de calificación. Para algunos recursos como: diésel, gasolina, tiempo de viaje, lubricantes de motor y neumáticos, el Ministerio de Desarrollo Social publica anualmente los precios sociales que deben ser utilizados en la evaluación de proyectos que involucren el uso de estos recursos [53].

La complejidad de una evaluación económica social radica en identificar los beneficios y costos, indirectos e intangibles, así como las externalidades asociadas a la implementación del proyecto.

La evaluación privada de producción de biogás considera que los beneficios privados están dados por la venta de biogás, mientras que la evaluación social incluye beneficios y externalidades como la reducción de los costos de energía, disminución de la contaminación ambiental, ahorro en costos de transporte de energía, fertilización del terreno, generación de conciencia medioambiental, entre otros factores difíciles de cuantificar.

Las dos metodologías más utilizadas para la evaluación social de proyectos son: enfoque costo-beneficio y enfoque costo-eficiencia. La primera se emplea cuando es posible identificar, medir y valorar los costos y beneficios del proyecto. Mientras que la segunda se utiliza cuando los beneficios pueden identificarse, a veces medirse, pero no pueden ser valorados [53].

La evaluación económica social del proyecto de producción de biogás para la comunidad Mapuche José Painecura requiere de una importante recopilación de información para identificar los beneficios y costos sociales. La complejidad de la evaluación económica social escapa de los alcances de esta trabajo de título, sin embargo, es posible realizar algunos cálculos y recomendaciones. En este contexto, se plantea la problemática y se sugiere una evaluación social detallada, la cual puede ser realizada con apoyo de organismos gubernamentales como el Ministerio de Desarrollo Social y el Sistema Nacional de Inversiones, que cuentan con metodologías, experiencia y recursos suficientes para la evaluación económica de proyectos sociales de este tipo.

Considerando los antecedentes mencionados, se procede a realizar una evaluación económica social general de la Alternativa I. Se elige esta alternativa porque  $I_d$  se puede controlar, de tal forma que el volumen del reactor no aumente. Se aplica el enfoque costo-eficiencia, integrando los tres tipos de financiamiento descritos en la sección 8. En el Anexo N se detallan los flujos de caja y factores de corrección a los costos privados.

#### 9.4.1. Alternativa I: Fondo Estatal

En este caso, se presenta la evaluación económica social de la alternativa I ( $I_d$  de 58,3% y temperatura de 14 °C), suponiendo que se cuenta con el fondo Chile compromiso de todos o el fondo de protección ambiental, cubriendo el 100% de la inversión. En la Tabla 26 se muestran los indicadores económicos, resultando un VAN positivo de \$2.891.873.

Tabla 26: Indicadores económicos de la alternativa I con fondo estatal.

| Indicador      | Valor     |
|----------------|-----------|
| VAN(\$)        | 2.891.873 |
| TIR(%)         | -         |
| PayBack (años) | -         |

#### 9.4.2. Alternativa I: Subsidio

En este caso, se presenta la evaluación económica social de la alternativa I, suponiendo que se cuenta con el subsidio creciendo del comité de desarrollo y fomento indígena, cubriendo el 90% de la inversión. En la Tabla 27 se muestran los indicadores económicos, resultando un VAN positivo de \$2.587.193.



Tabla 27: Indicadores económicos de la alternativa I con subsidio.

| Indicador      | Valor     |
|----------------|-----------|
| VAN(\$)        | 2.587.193 |
| TIR( %)        | 129       |
| PayBack (años) | 0,8       |

En ambos casos el VAN social resulta positivo para una inversión de \$ 3.046.809 (ver Anexo N). Estos resultados indican que la Alternativa I no se realiza por un privado, sin embargo, el Estado incentiva el proyecto con fondo o subsidio. Esto es de esperarse, ya que los mayores costos están asociados a la inversión inicial, específicamente a la compra de un biodigestor de mayor volumen.

Los cálculos de la evaluación económica fueron realizados bajo el enfoque costo-eficiencia de forma general. El VAN social calculado no refleja la rentabilidad del proyecto social real. Para esto, deben considerarse y valorar externalidades negativas como la disposición de desechos (filtro), posibles peligros, como contaminación de aguas subterráneas, manejo del biodigestor al finalizar su vida útil, entre otras situaciones que pudiesen causar costos ambientales y sociales.

La evaluación económica privada del caso base (temperatura de  $25^{\circ}C$ ) sugiere que el proyecto es rentable bajo estas condiciones, sin embargo, en invierno se alcanzan temperaturas de  $14^{\circ}C$  cuando el biodigestor es enterrado en el subsuelo. El efecto indirecto en la disminución de la temperatura es una reducción en la producción de biogás como se observa en la alternativa I. Bajo este escenario, se recomienda instalar el biodigestor cotizado de la marca Durman, con financiamiento estatal del 100 % a la comunidad Mapuche José Painecura, previo a algunos estudios experimentales y una evaluación económica social que identifique detalladamente los beneficios y externalidades del proyecto.

## 10. Conclusiones y recomendaciones

### 10.1. Conclusiones

La producción de energías renovables no convencionales suelen estar limitadas por la eficiencia productiva, materiales y costos de operación. Estos proyectos, generalmente son evaluados desde una perspectiva privada, no tomando en cuenta beneficios no tangibles como aquellos que contribuyen a mitigar el cambio climático y escasez de recursos. Particularmente, la producción de biogás presenta ventajas respecto a otras ERNC, al no necesitar grandes áreas de terreno para la implementación, que de paso, resuelve otras problemáticas medioambientales como el manejo de desechos orgánicos.

Este trabajo de título ha reunido una importante cantidad de recursos bibliográficos de producción de biogás, caracterización y gestión de residuos, financiamiento, etc. Estos recursos han sido de gran utilidad al momento de recoger y comparar parámetros de diseño, sin embargo, algunos datos bibliográficos no permiten ajustar modelos teóricos por la forma en que son presentados. Específicamente, los datos experimentales de parámetros cinéticos que se obtienen de paper, relacionan producción versus tiempo y no tiempos de retención hidráulicos como expresa el modelo planteado. En esta arista, se hace necesario encontrar otro modelo matemático que permita extraer los datos presentados en la literatura o replantear la forma en que estos datos son mostrados.

La digestión anaeróbica es un proceso que involucra complejas reacciones bioquímicas. Intentar replicar la realidad de los procesos resulta infructífero y fuera de los alcances de un diseño ingenieril. Los supuestos fuertes adoptados se relacionan con la ecuación de diseño, al considerar que el reactor se encuentra perfectamente agitado; la velocidad específica de crecimiento máxima, asumiendo que los datos experimentales se ajustan al modelo propuesto a temperatura constante; y la composición de salida del biogás, la cual se obtiene a partir de la ecuación de Buswell y Boyle. La incidencia de estos supuestos fue analizada detalladamente, y los resultados comparados con los recursos bibliográficos disponibles, los cuales fueron coherentes. No obstante, se debe tener en consideración que a pequeña escala, el margen de error resulta inapreciables en el rendimiento de metano.

La producción de biogás es promocionada como un tipo de energía limpia, sustentable y carbono neutral, sin embargo, se debe prestar atención a la composición del biogás, ya que contiene gases contaminantes. Los esfuerzos por obtener un gas limpio y con mayor poder calorífico, requieren de procesos de purificación de biogás, los cuales suelen ser costosos y generan contaminación ambiental. Un riguroso estudio de impacto ambiental ayuda a mitigar los efectos perjudiciales de los gases contaminantes, evitando que los costos no superen los beneficios económicos, sociales y medio ambientales.

El modelo presentado ha sido calculado con los mismos principios de otra tesis del departamento Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales de la Universidad de Chile, sin embargo, en esta memoria de título se trabaja con detalle y se incluyen otros parámetros de importancia como el rendimiento, tasa de carga orgánica,  $DBO_5$ , temperaturas del subsuelo, etc. Además de una caracterización detallada de la corriente de efluente.

El modelo propuesto no distingue entre los distintos tipos de materia orgánica utilizada, ya que solo interesan los sólidos volátiles. Si bien esto presenta ventajas al tener un modelo generalizado, se deben realizar investigaciones que relacionen el modelo con la co-digestión y la incidencia de utilizar distintos tipos de materia orgánica, aplicando factores de corrección de ser necesario. Por otra parte, podría ser interesante incluir el efecto del pH y salinidad, reflejado en la tasa de crecimiento

específica de los microorganismos. Otro estudio interesante, consiste en investigar microorganismos de climas fríos, que mejoren el rendimiento productivo de biogás.

No se ha estudiado la incidencia de utilizar algas recién cortadas y húmedas para el proceso de producción de gas. De ser posible, se podrían utilizar otras variedades de algas que no son comercializadas como el pelillo y la chasca. Se deja abierta esta posibilidad para futuras investigaciones con el fin de contar con mayores recursos orgánicos para la digestión anaeróbica.

El volumen del biodigestor calculado ha servido como referencia para adquirir un biodigestor como el presentado. Además del volumen, se requieren elementos que permitan el correcto y eficiente manejo del efluente. Si bien el biodigestor cotizado no se encuentra diseñado con un sistema de agitación, puede ser modificado a los requerimientos. Por otra parte, se cuenta con un manual que brinda información útil para su instalación y datos de eficiencia que fueron comparados con los recursos bibliográficos disponibles.

Parte de la metodología propuesta incluye visita de terreno. Esta visita fue clave para observar las condiciones del terreno y ofrecer una alternativa viable que se ajuste a las necesidades de la comunidad, respetando las opiniones, intereses energéticos y medio ambientales. En base a esto, se deduce que el éxito económico de un proyecto de producción de biogás depende a grandes rasgos del tipo y cantidad residuos a tratar, zona geográfica y condiciones climáticas. La escala de producción se evalúa de acuerdo a la cantidad y gestión de residuos, transporte de materiales, características climatológicas y geográficas, intervención de la zona y su relación con el impacto ambiental.

Una planta de producción de biogás puede estar bien justificada en sectores agrícolas, ganaderos, forestales, vinícolas, etc., para el tratamiento de grandes volúmenes de residuos. En comunidades rurales indígenas, con poca cantidad de residuos agropecuarios, es preferible la menor intervención del área. Se ha mencionado que las comunidades Mapuches conviven en armonía con el medio ambiente, por lo que causar el menor impacto ambiental y proporcionar soluciones prudentes, que se adecuan a contextos, es una muestra de respeto al territorio. De esta forma, la gestión de los propios recursos en la comunidad, favorece la implementación de proyectos individuales de producción de biogás, elevando el autoestima de la comunidad y generando conciencia medioambiental como beneficios intangibles.

La evaluación económica y el análisis de sensibilidad sugieren que el proyecto es rentable bajo ciertas condiciones. El factor determinante en el proceso productivo y rendimiento económico es el volumen del biodigestor, ya que los costos de inversión aumentan considerablemente a mayor volumen. El volumen del biodigestor se relaciona con la temperatura, de esta manera, la producción de biogás disminuye por unidades de reactor a menor temperatura. En este escenario, el proyecto se ve comprometido a la temperatura y pese a que se propuso enterrar el biodigestor, las bajas temperaturas siguen afectando el rendimiento ya que la zona presenta temperaturas frías. Ante esta problemática se ha propuesto una evaluación económica social que mejore el rendimiento económico, considerando beneficios y externalidades del proyecto. Además se deja propuesto enterrar el biodigestor a mayor profundidad para aprovechar el gradiente geotérmico y alcanzar temperaturas cercanas a los 22°C, que favorecen el rendimiento económico del proyecto.

Si bien se genera como valor agregado abono, es necesario realizar un estudio de laboratorio para garantizar la calidad e inocuidad en el uso como fertilizante de cultivos. Pese a que la  $DBO_5$  calculada sugiere que el agua del biodigestor se puede ocupar para el campo de infiltración, no es posible caracterizar la calidad del abono o materia sólida con este parámetro.

En general se cumplen los objetivos de este trabajo de título. Se evaluaron las necesidades de biogás combustible en la zona y su relación con el fomento a la utilización de ERNC. Se evaluó la cantidad de residuos agropecuarios y algales, junto a la caracterización de la materia. Se diseñó el proceso productivo, adecuándose a la disponibilidad y cantidad de recursos, zona geográfica, clima etc. Se dimensionó un biodigestor y se cotizó uno de características similares al calculado, sugiriendo además, la implementación de elementos de purificación.

Estamos viviendo una era de cambios. Parte de nuestro ejercicio como profesionales es proponer soluciones orientadas al uso eficiente de los recursos y mitigar los efectos del cambio climático. En las evaluaciones de proyectos, tanto técnicas como económicas es posible encontrarse con una serie de limitantes, muchas de las cuales se relacionan con la inexperiencia, acceso a la información, tecnologías etc. Sin embargo, lo que en este trabajo de título se ha logrado, es sentar las bases de una posible solución a las problemáticas energéticas de nuestras marginadas comunidades indígenas, proponiendo una coexistencia entre comunidades, uso eficiente de recursos, problemáticas medioambientales y necesidades energéticas.

Se recomienda instalar el biodigestor cotizado con financiamiento estatal del 100 % a la comunidad Mapuche José Painecura, previo a algunos estudios experimentales y una evaluación económica social detallada que identifique los beneficios y externalidades del proyecto.

## **10.2. Recomendaciones a la comunidad Mapuche José Painecura**

Guardo un profundo respeto a la comunidad Mapuche y me impresiona lo consciente que es la comunidad respecto a las problemáticas medio ambientales. Tienen conocimientos valiosos de cultivo, hierbas medicinales y capacitaciones en materias de energías renovables como biogás y solar.

La combustión a leña genera graves problemas de contaminación, debido al material particulado y gases tóxicos que se generan. Es entendible que proporciona un medio económico de calefacción que se adapta al bolsillo de la comunidad. Sin embargo, debemos mirar hacia adelante y realizar todos los esfuerzos que sean necesarios para disminuir la contaminación ambiental.

En el centro de acopio de la comunidad se han instalado paneles solares que proporcionan energía sustentable. Además, la comunidad pasa por un periodo de modernización, al contar con apoyo y capacitaciones que buscan aprovechar eficientemente los recursos.

Con los antecedentes presentados en este trabajo de título se recomienda el estudio e instalación de un biodigestor en un hogar, con financiamiento estatal. Se propone que el gas generado sea conectado a una cocina ya que este formato supone una fácil operación. El compromiso es a utilizar este tipo de tecnología y recibir las capacitaciones correspondientes para su correcto uso, para así reemplazar paulatinamente el uso de leña por energía limpia.

# Bibliografía

- [1] Von Baer, H., Toloza, I. & Torralbo, S. (2013). CHILE DESCENTRALIZADO... DESARROLLO. Resumen.
- [2] Gobierno de Chile.(2018). *Desarrollo Sostenible Reducir la pobreza en todas sus formas*. Ministerio de Desarrollo Social.
- [3] María José Andrade. (2019). La lucha por el territorio mapuche en Chile: una cuestión de pobreza y medio ambiente. OpenEdition Journals.
- [4] Andrea Suárez Fontanilla (2018). *ESTRATEGIAS DE SUSTENTABILIDAD DE MICRO-REDES/SMART-FARM EN LA COMUNIDAD MAPUCHE JOSÉ PAINECURA DE HUEÑALIHUEN*. Trabajo Fin de Grado, Ingeniería Eléctrica.
- [5] Ahumada, C., Condori, N., Falcón, L., Gutiérrez, C., Leal, R., Lucas, A...& Sáez, D. (2019). Programa de Pueblos Indígenas FCFM. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- [6] ASOCIACIÓN DE GENERADORAS DE CHILE (2021). BOLETÍN DEL MERCADO ELÉCTRICO SECTOR GENERACIÓN. DIRECCIÓN DE ESTUDIOS Y CONTENIDOS GENERADORAS DE CHILE.
- [7] INSTITUTO LIBERTAD ideas para Chile (2018). LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES EN CHILE.
- [8] María Teresa Varnero Moreno (2011). MANUAL DE BIOGÁS. Gobierno de Chile, Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. ISBN 978-95-306892-0
- [9] Terrell, M., Thompson, Brent, R., Young & Saeid, Baroutian. (2019). Advances in the pre-treatment of brown macroalgae for biogas production. Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland, Auckland 1010, New Zealand.
- [10] Mei, Z., Liu, X., Huang, X., Li, Dong., Yan, Z., Yuan, Y. & Huang, Y.(2016). Anaerobic Mesophilic Codigestion of Rice Straw and Chicken Manure: Effects of Organic Loading Rate on Process Stability and Performance. Springer Science+Business Media New York.
- [11] Comisión nacional de energía. (2020). INFORME DE COSTOS DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN. Gobierno de Chile.
- [12] Quitral, V., Morales, C., Sepúlveda, M. & Schwartz, M. (2012). Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. Rev Chil Nutr Vol.39 N 4.
- [13] Saavedra, S., Henríquez, L., Leal, P., Galleguillos, F., Cook, S. & Cárcamo, F. (2019). Cultivo de Macroalgas: Diversificación de la Acuicultura de Pequeña Escala en Chile. Departamento de Repoblación y Cultivo, Instituto de Fomento Pesquero.
- [14] Quitral, Vilma, Jofré, María José, Rojas, Nayadeth, Romero, Natalia, & Valdés Ismael. (2019). Algas marinas como ingrediente funcional en productos cárnicos. Revista chilena de nutrición, Vol. 46(2), P. 181-189.

- [15] Jaime Ortiz V. MSc. (2011). Composición Nutricional y Funcional de Algas Pardas Chilenas : *Macrocystis pyrifira* y *Durvillaea antarctica*. Facultad de Ciencias Químicas y farmacéuticas, Universidad de Chile.
- [16] Tori, R. (2014). Los ficocoloides en la industria.
- [17] Raúl Márquez Porras. (2019). LA FIEBRE DE LAS ALGAS. FORMA Y DINÁMICAS DEL EXTRACTIVISMO EN LA COSTA CHILENA. Universidad de Barcelona, Revista Andaluza de Antropología. N° 17. ISSN 2174-6796.
- [18] Barahona N., Araya P., Gallo O., Olgún A., Vicencio C. & Fuentes J. (2020). INFORME FINAL Programa de seguimiento de las Pesquerías Bentónicas, 2019. Instituto de Fomento Pesquero.
- [19] Claudio Andres Muñoz Muñoz. (2015). Plan de Negocio de “Producción Sostenible a nivel industrial del alga parda *Macrocystis pyrifera* (huirón) en Chile, con Mercado Objetivo en la Industria Abalonera”. Trabajo de titulación, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Austral de Chile.
- [20] Gallo Eliel & Gallo Dante. (2016). DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE PURINES DE UNA EMPRESA PORCINA EN CONFINAMIENTO. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de la Pampa.
- [21] Alonso D., Lorenzo Y., Díaz Y., Sosa R. & Angulo Y. (2014). Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Vol. 48 n°3, P. 16-21. [en línea] <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223132853003>>
- [22] Pérez Monserrat. (2009). CODIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL Y LODOS DE DEPURADORA PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. Dpto. Tecnología del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz.
- [23] SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO. (2011). AGRICULTURA ORGÁNICA NACIONAL, Bases Técnicas y Situación Actual. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- [24] Bruce E. Rittmann & Perry L. McCarty. (2001). Environmental Biotechnology: Principles and Applications, McGraw-Hill,
- [25] Duguet José. (2017). INGENIERÍA METABÓLICA EN *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* PARA LA DEGRADACIÓN DE ALGINATO DE SODIO. (Memoria de grado). Departamento de Ingeniería química y biotecnología. Universidad de Chile.
- [26] Carrasco Juan (2015). EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UNA PLANTA DE BIOGÁS PARA AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO: UNA ESTRATEGIA PARA DIFERENTES CONTEXTOS. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [27] Edward Membere & Paul Sallis (2018). *Effect of temperature on kinetics of biogas production from macroalgae*. ScienceDirect, Elsevier Ltd. [en línea] <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.023>>
- [28] Rodriguez C., Alaswad A., El-Hassan Z. & Olabi A.(2018). Waste paper and macroalgae co-digestion effect on methane production. Elsevier, Energy Vol. 154, P. 119-125.
- [29] Pascencia Cinthia (2014). Estudio de condigestión de residuos orgánicos agroindustriales para la producción y uso de biogás. (Tesis de Grado). Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico

- en Electroquímica, México.
- [30] Varnero M., Carú M., Galleguillos K. & Achondo P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. Información Tecnológica Vol. 23(2), P. 31-40.
- [31] Endesa Chile & Enel. (2015). MONITOREO DE BIOTA ACUÁTICA Y CALIDAD DEL AGUA PROYECTO CENTRAL HIDROELÉCTRICA LOS CÓNDORES. Estudio de calidad de aguas, campaña primavera. Universidad de Alicante, España.
- [32] Rodríguez Ana. (2013). CONTROL DEL PROCESO DE DEPURACIÓN EN LA EDAR VALLE DEL VINALOPÓ. DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS. (Trabajo de Máster). Universidad de Alicante, España.
- [33] Cortés Luis. (2007). SIMULACIÓN DE UN CONTROL NO LINEAL DE OXÍGENO DISUELTADO Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS. (Memoria de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- [34] Marín Rafael. (2017). Sobre la sustitución de la DQO por el COT para medidas de la materia orgánica en aguas residuales: ventajas e inconvenientes. EMECSA, España, RETEMA N° 199.
- [35] Servicio de Evaluación Ambiental. (2012). Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental de Centrales de Generación de Energía Eléctrica con Biomasa y Biogás. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. ISBN 978-956-9076-03-9
- [36] Roje, T., Sáez, D., Muñoz, C., Daniele, L. (2020). Energy–Water Management System Based on Predictive Control Applied to the Water–Food–Energy Nexus in Rural Communities. Applied Sciences, 10(21), 7723.
- [37] Constanza Becerra. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA PRODUCCIÓN DE PROTEÍNAS UNICELULARES E HIDROFOBINAS A PARTIR DE RESIDUOS DE ALGAS DE LA COMUNIDAD JOSÉ PAINECURA. (Memoria de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- [38] M. T. Varnero Moreno. (2011). Manual del Biogás, Santiago de Chile.
- [39] Carlos Santolaria.(2014). DISEÑO DE UN MODELO SEMIEMPÍRICO DE CODIGESTIÓN ANAEROBIA. Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Zaragoza, España.
- [40] Rincón Santamaría A, Cuellar Gil JA, Valencia Gil LF & Sánchez Toro OJ. (2019). Cinética de crecimiento de *Gluconacetobacter Diazotrophicus* usando melaza de caña y sacarosa: evaluación de modelos. Acta biol. Colombia. Vol. 24 N°1. P. 38-57.
- [41] Taghinazhad J., Abdi R. & adl M. (2017). *Kinetic and Enhancement of Biogas Production for The Porpose of Renewable Fuel Generation by Co-digestion of Cow Manure and Corn Straw in A Pilot Scale CSTR System*. Int Journal of Renewable Energy Development, 6(1), P.37-44.
- [42] Achinas Spyridon & Willem Gerrit. (2016). Teorical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. Elsevier, Rerource-Efficient Technologies Vol. 2, P. 143-147
- [43] Obando Giancarlo (2007). Producción de biogás en reactores anaeróbicos bajo diferentes configuraciones de operación. Invest Apl Innov 1(2).
- [44] Wouter Lema (2014). ELIMINACIÓN DEL SULFURO DE HIDRÓGENO EN EL BIOGÁS-PARTE 1. DESOTEC ACTIVATED CARBON. [en línea]

- <<https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/eliminaci-n-del-sulfuro-de-hidr-geo-en-el-biog-s-parte-1>>
- [45] Ortega L., Rodríguez S., Fernández E. & Báracenas L. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXVI, N°1, P. 45-56.
- [46] LENNTECH. (2021). Medio filtrante KDF.
- [47] Osorio J., Ciro H. & González H. (2007). EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN EN SERIE PARA CLIMA FRÍO. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol.60,Nº 2. P.4145-4162
- [48] Durman by aliaxis (2021). BIODIGESTOR DE POLIETILENO ARPE-5. MANUAL DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO. Costa Rica. [en línea] <<https://www.durman.com/descargas/biodigestor/Guiainstalacion/ManualBiodigestor.pdf>>
- [49] Barrena M., Cubas F., Gosgot W., Ordinola C., Rascón B. & Huanes M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. Arnaldoa Vol. 26 N°2.
- [50] GRUPO ROTOPLAS S.A.B DE C.V .(2018). FICHA TÉCNICA BIODIGESTOR AUTOLIMPIABLE. México. [en línea] <<http://www.proconsrl.com/pdfs/3.pdf>>, <<https://www.rotoplast.com.co/soporte-tecnico/>>
- [51] Pizarro Maure, A. (2013). EVALUACIÓN DE PROYECTO VIVIENDAS SUSTENTABLES PARA EL NORTE DE CHILE. Trabajo de título, Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile.
- [52] Ministerio de Desarrollo Social (2012). EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTO. División de Evaluación Social de Inversiones.
- [53] Ministerio de Desarrollo Social (2013). METODOLOGÍA DE GENERAL DE PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS. División de Evaluación Social de Inversiones.
- [54] Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. Evaluación de Iniciativas de Inversión por el Sistema Nacional de Inversiones. Curso de Evaluación de Proyectos, MDSyF.Consultado 20/08/2021 [en línea] <<http://territoriosdeconvergencia.subdere.gov.cl/pages/documentos>>
- [55] Braskem. (2014). Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM) UTEC6541. Ficha técnica.
- [56] Cengel, Y. A. (2007). “Transferencia de calor y masa” McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. 3ra. Edición. Pag. 19, 177.
- [57] Coronel Juan & Pérez-Lombard Luis. (2016). Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor. Dpto. de Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla, España.
- [58] D. Deublein y A. Steinhauser, (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction., Mörlenbach: Strauss GmbH.
- [59] SODIMAC. Biodigestor Rotoplas Negro. Código 1298968. Consultado 10/08/2021 [en línea] <<https://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/1298968/biodigestor-negro-13001/1298968/>>
- [60] SODIMAC. Kit regulador de gas + manguera 3/8"1/2"HI. Código 1643878. Consultado 10/08/2021 [en línea] <<https://www.sodimac.com.pe/sodimac>>



pe/product/1298968/biodigestor-negro-1300l/1298968/>

- [61] Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2021). Precios Sociales 2021. Sistema Nacional de Inversiones.

## Anexo A. Reacciones de acetogénesis y metanogénesis

La formación de metano involucra una gran cantidad de reacciones químicas, que se pueden subdividir en dos macro procesos: Acetogénesis, donde los microorganismos transforman la materia orgánica en ácido acético y la metanogénesis, en la cual se produce el metano a partir del ácido acético y otros intermediarios. En las Tablas A.1 y A.2 se muestran algunas de las reacciones involucradas en la formación de ácido acético y metano respectivamente.

Tabla A.1: Reacciones de acetogénesis [58].

| Substrato         | Reacción  |
|-------------------|---|
| Ácido propanoico  | $CH_3(CH_2)COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$                       |
| Ácido butírico    | $CH_3(CH_2)_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$                   |
| Ácido valérico    | $CH_3(CH_2)_3COOH + 2H_2O \rightarrow$<br>$CH_3COO^- + CH_3CH_2COOH + H^+ + 2H_2$ |
| Ácido isovalérico | $(CH_3)_2CHCH_2COO^- + HCO_3^- + H_2O \rightarrow$<br>$3CH_3COO^- + H^+ + H_2$    |
| Ácido cáprico     | $CH_3(CH_2)_4COOH + 4H_2O \rightarrow$<br>$3CH_3COO^- + H^+ + 5H_2$               |
| $CO_2/H_2$        | $2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2O$                                |
| Glicerina         | $C_3H_8O_3 + H_2O \rightarrow$<br>$CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$                        |
| Ácido láctico     | $CH_3CHOHCOO^- + 2H_2O \rightarrow$<br>$CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 2H_2$         |
| Etanol            | $CH_3(CH_2)OH \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$  |

Tabla A.2: Reacciones de metanogénesis [58].

| Substrato   | Reacción   |
|-------------|--|
| Bicarbonato | $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \rightarrow CH_4 + 3H_2O$<br>$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$    |
| Formiato    | $4HCOO^- + H_2O + H^+ \rightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$   |
| Acetato     | $CH_3COO^- + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$  |
| Metanol     | $4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + HCO_3^- + H^+ + H_2O$<br>$CH_3OH + H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ |
| Etanol      | $2CH_3CH_2OH + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$  |

## Anexo B. Temperatura

### B.1. Temperatura para microorganismos

La temperatura de operación en el digestato es uno de los principales parámetros de diseño ya que incide en la velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ). A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y la solubilidad de las sales. Además, el aumento de temperatura permite que gases como  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $H_2$  y  $CO_2$  se volatilicen, esto por un lado es beneficioso para los microorganismos debido a la toxicidad del  $H_2S$ , sin embargo,

aumenta la concentración de este en el producto de interés. Por otra parte, la volatilización del  $CO_2$  puede causar un aumento en el pH causando inhibición por aumento de la concentración de amonio [8].

En la figura B.1 se muestran los rangos de temperaturas para microorganismos Psicrófilos, Mesófilos y Termófilos. El rango de operación mesófilo es el más utilizado ya que el rango Psicrófilo pese a que es más estable, supone un gran tamaño del reactor y el rango Termófilo suele ser inestable y provoca toxicidad y aumento de  $H_2S$  en la corriente de interés [8].

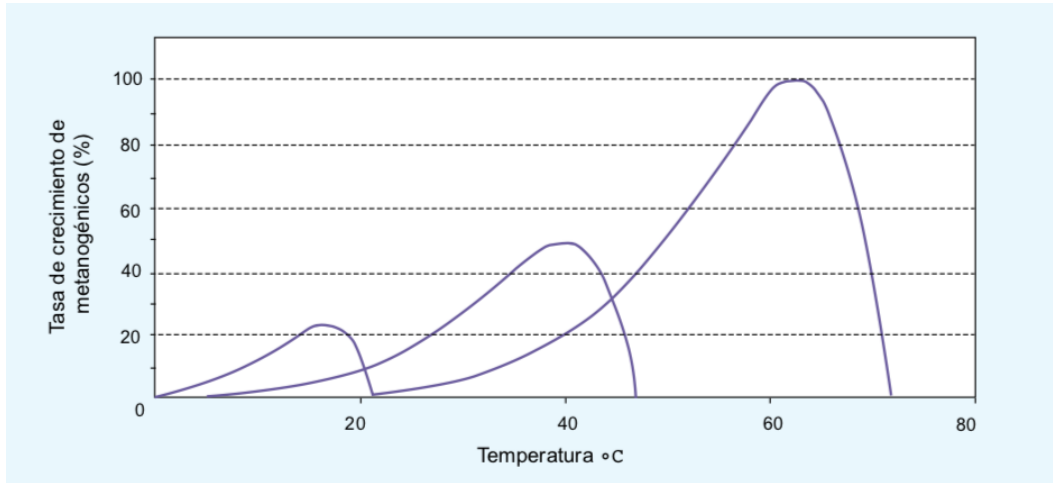


Figura B.1: Tasa de crecimiento relativo de microorganismos Psicrófilos, Mesófilos y Termófilos [8].

Tabla B.1: Rangos de temperatura y tiempos de retención hidráulico (THR) [8].

| Fermentación | Mínimo   | Óptimo   | Máximo   | THR            |
|--------------|----------|----------|----------|----------------|
| Psicrófilo   | 4-10 °C  | 15-18 °C | 20-25 °C | sobre 100 días |
| Mesófilo     | 15-20 °C | 25-35 °C | 35-45 °C | 30-60 días     |
| Termófilo    | 25-45 °C | 50-60 °C | 75-80 °C | 10-15 días     |

## B.2. Temperatura del subsuelo

EL subsuelo genera calor proveniente de capas más profundas de la tierra. Aprovechar este recurso es una alternativa atractiva para sistemas que requieren mantener temperaturas estables. En la figura se muestra la evolución de la temperatura respecto a la profundidad del suelo en los meses de verano e invierno. En un clima frío, donde la temperatura más baja es 6 °C y en verano la temperatura más alta es 30°C, la temperatura promedio en el subsuelo a más de 5[m] es 22°C. Se estima que para una profundidad de 2[m], la temperatura del subsuelo en invierno es de 15°C.

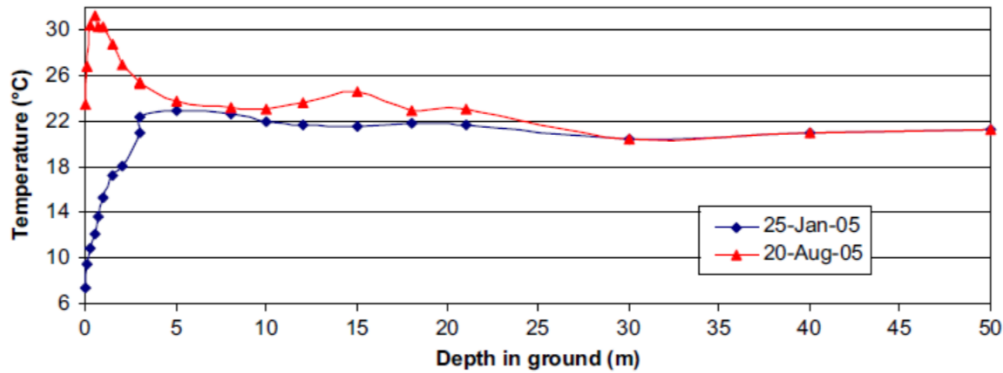


Figura B.2: Evolución de la temperatura respecto a la profundidad del suelo [8].

## Anexo C. Visita de terreno

Este trabajo de título contempla la visita de terreno a la comunidad mapuche José Painecura ubicada en la región de la Araucanía a 45 km al oeste de la comuna de Carahue.

El Programa de Pueblos Indígenas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile facilita el contacto telefónico con Verónica Painecura, hija del Lonco y Ermes García, quien se dedica a la recolección de algas. Previo aviso y coordinación, se organiza la visita de terreno para el día 13 de junio del 2021.

Con el aporte monetario del Programa de Pueblos Indígenas y medios de transporte propio se llega a la comunidad Mapuche José Painecura. Debido a la emergencia sanitaria vivida por el COVID-19, la movilización es dificultosa. Para ello, se realiza un viaje de 1 día hasta Temuco, contando con los permisos de movilidad necesarios. Una vez en Temuco y gracias a la ayuda de familiares y amigos, es posible conseguir un vehículo hasta Carahue, viaje que dura aproximadamente 5 horas. En la Figura C.1 se muestra el mapa de la comuna de Carahue y la ubicación de la comunidad José Pinecura (estrella amarilla).

Tras una pausa en Carahue y evaluando la situación, debido al conflicto mapuche que afecta la zona, se inicia un viaje hacia la costa, que tiene duración de 3 horas. Cabe destacar que la zona es de difícil acceso y es necesario un vehículo adecuado de transporte. En la Figura C.2 se muestra el borde costero, lugar de recolección de algas. En la Figura C.3 se muestra la vista superior del borde costero

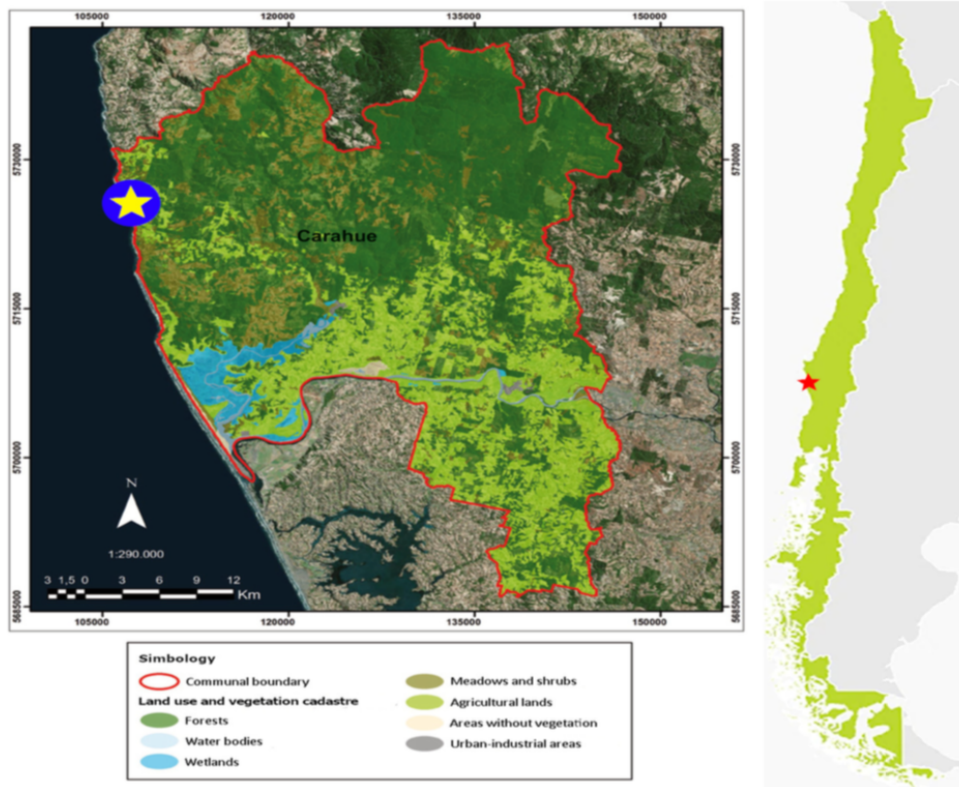


Figura C.1: Ubicación geográfica de la comunidad José Paineicura [36]



Figura C.2: Borde costero de la comunidad José Paineicura.



Figura C.3: vista superior del lugar de extracción de algas en la comunidad José Painecura.

La visita a la comunidad permite obtener información específica y relevante para el diseño y formato en la producción de biogás. Gracias a esto, se pudo establecer que:

- Los habitantes conviven en armonía con el medio ambiente.
- Los habitantes viven en predios disgregados espacialmente.
- Cada habitantes gestionan sus propios recursos y residuos.
- La zona geográfica es de difícil acceso.
- Los terrenos son inclinados y con pendientes.
- A partir de las conversaciones sostenidas con Veronica Painecura y Ermes García, se deduce que los habitantes aprueban los proyectos de energías renovables no convencionales. Específicamente, la implementación de un biodigestor para producir biogás.

Ermes García se dedica a la recolección de algas en el borde costero. Se recolectan en promedio 300[kg] por mes promedio, de las cuales se asume que el 25 % corresponde a descartes.

Verónica Painecura vive a 1 km de distancia de Ermes García y su actividad se relaciona con el cuidado de 11 porcinos, los cuales producen en promedio 24[kg] de purines por día (ver Anexo D).

Se propone que Ermes García facilite los descartes de algas secas a Verónica Painecura, quien sería la encargada de almacenar los descartes para su posterior uso con los purines de porcino.

## Anexo D. Caracterización del sustrato

A continuación, se caracteriza de la biomasa a digerir. La Tabla I.2 muestra la composición de las macroalgas y la Tabla D.2 la composición de purines de porcino.

Tabla D.1: Composición y caracterización de las macroalgas [27].

| Característica      | Descripción   | Porcentaje |
|---------------------|---|------------|
| Humedad (%)         | porcentaje de humedad                                 | 6,30 %     |
| ST del total (%p/p) | Porcentaje de sólidos totales del peso total          | 93,70 %    |
| SV del total (%P/P) | Porcentaje de sólidos volátiles del peso total        | 65,00 %    |
| C (% de SV)         | Porcentaje de carbono del peso se sólidos volátiles   | 37,00 %    |
| H (% de SV)         | Porcentaje de hidrógeno del peso se sólidos volátiles | 0,50 %     |
| O (% de SV)         | Porcentaje de oxígeno del peso se sólidos volátiles   | 59,67 %    |
| N (% de SV)         | Porcentaje de nitrógeno del peso se sólidos volátiles | 2,00 %     |
| S (% de SV)         | Porcentaje de azufre del peso se sólidos volátiles    | 0,83 %     |

Tabla D.2: Composición y caracterización de purines de porcino [26].

| Característica      | Descripción   | Porcentaje |
|---------------------|---|------------|
| Humedad (%)         | porcentaje de humedad                                 | 92,00 %    |
| ST del total (%p/p) | Porcentaje de sólidos totales del peso total          | 8,00 %     |
| SV del total (%P/P) | Porcentaje de sólidos volátiles del peso total        | 6,80 %     |
| C (% de SV)         | Porcentaje de carbono del peso se sólidos volátiles   | 51,40 %    |
| H (% de SV)         | Porcentaje de hidrógeno del peso se sólidos volátiles | 11,35 %    |
| O (% de SV)         | Porcentaje de oxígeno del peso se sólidos volátiles   | 33,25 %    |
| N (% de SV)         | Porcentaje de nitrógeno del peso se sólidos volátiles | 3,25 %     |
| S (% de SV)         | Porcentaje de azufre del peso se sólidos volátiles    | 0,75 %     |

Del caso base se tienen 11 cerdos. Utilizando los criterios de diseño, se calcula la masa total de purines por día:

$$M_{purines} = 11 \cdot 2180 \cdot \frac{g}{d} = 23980[g/d]$$

El porcentaje de SV en los purines es de 6,8 %. Y considerando que la mezcla se realiza en proporción de algas y purines de 1:1. Los sólidos volátiles por materia prima son:

$$SV_{purines} = 23980 \cdot 0,068 = 1630,64[g/d]$$

$$SV_{algas} = 1630,64[g/d]$$

Los sólidos volátiles de algas son el 65 % de la masa. La masa total de algas por día es:

$$M_{algas} = \frac{1630,64}{0,65} = 2508,68[g/d]$$

La masa total es la suma de la masa total de purines y la masa total de algas:

$$M_T = 23980 + 2508,68 = 26488,68[g/d]$$

Los sólidos volátiles totales por día son la suma de  $SV_{purines}$  y  $SV_{algas}$ :

$$SV = 1630,64 + 1630,64 = 3261,28[g/d]$$

La densidad de la mezcla se calcula como el promedio de las densidades de algas y purines mostradas en el Anexo I:

$$\rho_{mezcla} = \frac{1020 + 1200}{2} = 1110[g/L]$$

El flujo volumétrico de entrada  $F_{in}$  se calcula con la densidad de la mezcla  $\rho_{mezcla}$  y masa total  $M_T$ :

$$F_{in} = \frac{26488,68}{1099,65} = 24,09[L/d]$$

La concentración de entrada de sólidos volátiles se calcula con el flujo volumétrico y el total de los sólidos volátiles:

$$S_{in} = \frac{3261,28}{24,09} = 135,39[g/L]$$

Para calcular la cantidad de agua presente, se tiene que la humedad en la masa de algas ( $M_{algas}$ ) es 6,3% y la humedad en los purines es de 92,0%. Con esto, la cantidad total de agua presente en la materia prima es:

$$M_{agua} = 0,063 \cdot 2508,68 + 0,920 \cdot 23980 = 22219,65[g/d]$$

La cantidad de sólidos totales es la resta entre la masa total  $M_T$  y la cantidad de agua:

$$ST = 26488,68 - 22219,65 = 4269,03[g/d]$$

Con los sólidos volátiles por materia prima y los porcentajes entregados en las Tablas I.2 y D.2, se calculan los valores de la mezcla purines y macroalgas de la Tabla D.3. Así, por ejemplo, para calcular la cantidad de carbono, se tiene:

$$M_{carbono} = \frac{37,00 \cdot 1630,64}{100} + \frac{51,40 \cdot 1630,64}{100} = 1441,49[g/d]$$

Para expresar en moles, se utilizan los valores de la Tabla I.3:

$$N_{carbono} = \frac{1441,49}{12} = 120,12[mol/d]$$

Tabla D.3: Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de  $C$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $N$  y  $S$  están calculados respecto a los  $SV$ .

| Compuesto  | g/d      | Porcentaje % | mol/d  |
|------------|----------|--------------|--------|
| $M_T$      | 26488,68 | 100          | -      |
| $M_{agua}$ | 22219,65 | 83,88        | -      |
| $ST$       | 4269,03  | 16,12        | -      |
| $SV$       | 3261,28  | 12,31        | -      |
| $C$        | 1441,49  | 44,20        | 120,12 |
| $H$        | 193,23   | 5,93         | 193,23 |
| $O$        | 1515,19  | 46,46        | 94,70  |
| $N$        | 85,61    | 2,63         | 6,11   |
| $S$        | 25,76    | 0,79         | 0,81   |



## Anexo E. Co-digestión de purines de pollo y paja de trigo

En este anexo se presentan y justifican los datos experimentales obtenidos por bibliografía para la estimación de los parámetros cinéticos que caracterizan el dimensionamiento del biodigestor.

En la figura E.1 se muestran los datos obtenidos por bibliografía para la producción de biogás, expresado en litros por kilogramos de sólidos volátiles ( $B$ ), en función del tiempo ( $días$ ). El sustrato utilizado es *Laminaria digitata* y la digestión se lleva a cabo en un reactor batch a distintas temperaturas [27]. Como se puede observar, la mayor producción se alcanza a una temperatura de 35°C, esto es de esperar ya que los microorganismos funcionan a una temperatura óptima entre 34 – 37°C.

En la figura E.2 se muestran los datos obtenidos por bibliografía para la producción de biogás ( $B$ ) en función del tiempo ( $días$ ) a partir de la co-digestión anaeróbica de purines de pollo y paja de trigo [10]. El experimento se lleva a cabo en un reactor batch de 40[L] a 37°C y distintas proporciones paja de trigo y purines de pollo. Como se observa, la mayor producción se da para una proporción de paja de trigo (RS) y purines de pollo (CM) de 1:1.

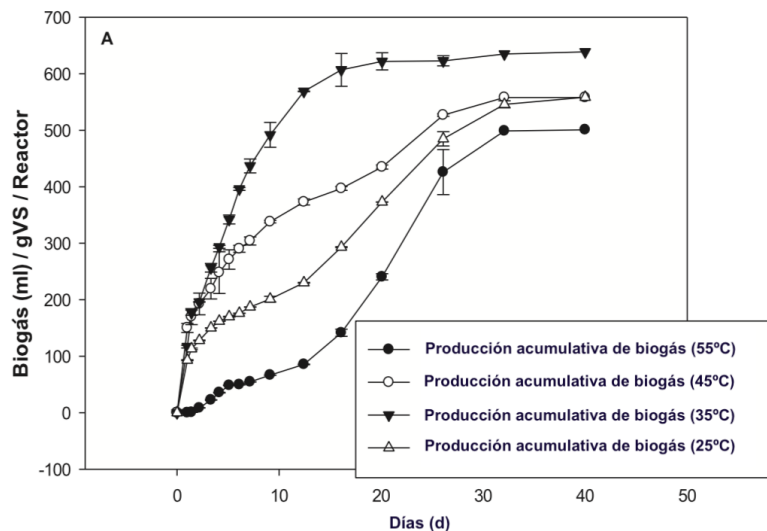


Figura E.1: Producción de biogás B [L/kg SV] en función de los días [27].

La etapa limitante en el proceso de digestión anaeróbica es la hidrólisis de las macroalgas, debido a la presencia de compuestos como lignina y celulosa [9], por esta razón, se utilizan los datos experimentales de la imagen E.1, para representar el peor escenario. Sin embargo, para la co-digestión, se utiliza una proporción de 1:1 que entrega mejor rendimiento, tal como se muestra en la figura E.2.

Por otra parte, la temperatura en la zona es baja, con un promedio de 13 °C anual, llegando en invierno a los 5°C y en verano a los 26°C. Como no se tiene mayor información de producción de biogás a temperaturas más bajas, se decide utilizar la curva a 25°C de los datos experimentales de la imagen E.1.

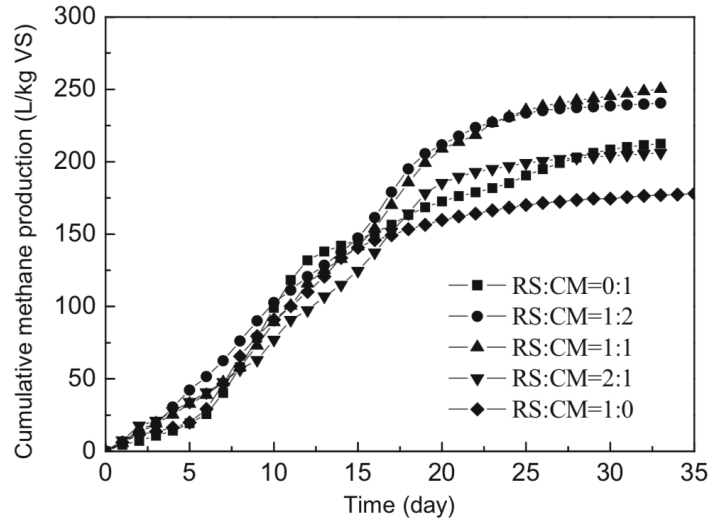


Figura E.2: Producción de biogás B [L/kg SV] en función de los días para distintas proporciones de paja de trigo (RS) y purines de pollo (CM)[10].

## Anexo F. Dimensionamiento del biodigestor

El digestor es el equipo central del proceso. En consecuencia, calcular el volumen es fundamental en el diseño del proceso productivo. Si se conoce el flujo de entrada a tratar y el tiempo de retención hidráulico, el volumen es:

$$V_d = F_{out} \cdot THR \quad (F.1)$$

Donde:

$\eta$ : Eficiencia.

$ST$ : Cantidad de sólidos totales o volátiles.

$V_{CH_4}$ : Volumen de metano producido [ $m^3$ ].

$V_d$ : Volumen del digestor [ $m^3$ ]

$V_c$ : Volumen de carga diaria [ $m^3/dias$ ]

$THR$ : Tiempo de retención hidráulico [ $dias$ ]

La tasa de carga orgánica ORL se calcula:

$$ORL = \frac{SV}{V_d} \quad (F.2)$$

Si se considera un reactor CSTR, el tiempo de residencia es igual al tiempo de retención hidráulico. A continuación, se realizan los balances de masa en los sólidos volátiles.

### F.1. Balance global

$$\frac{d(\rho \cdot V_d)}{dt} = F_{in} \cdot \rho_{in} - F_{out} \cdot \rho_{out} \quad (F.3)$$

Considerando estado estacionario y densidad constante, se tiene:

$$F_{in} = F_{out} \quad (F.4)$$

## F.2. Balance de biomasa

$$\frac{d(X \cdot V_d)}{dt} = F_{in} \cdot X_{in} - F_{out} \cdot X_{out} + \mu \cdot X_{out} \cdot V_d - \alpha \cdot X_{out} \cdot V_d \quad (F.5)$$

Donde:

$F_{in}$ : Flujo de entrada [ $m^3/h$ ].

$F_{out}$ : Flujo de salida [ $m^3/h$ ].

$X_{in}$ : Concentración de entrada de biomasa [ $kg/m^3$ ].

$X_{out}$ : Concentración de salida de biomasa [ $kg/m^3$ ].

$\mu$ : Refleja la tasa de crecimiento de los microorganismos [ $1/h$ ].

$\alpha$ : Refleja la tasa de muerte de los microorganismos [ $1/h$ ].

Asumiendo estado estacionario, corriente de entrada limpia de microorganismos, densidad constante y tasa de muerte de los microorganismos baja en comparación con el crecimiento, se obtiene:

$$F_{out} = \mu \cdot V_d \quad (F.6)$$

Se define el inverso de la tasa de crecimiento como el tiempo de residencia, igual al tiempo de retención hidráulico:

$$\frac{F_{out}}{V_d} = \frac{1}{THR} = \mu \quad (F.7)$$

Notar que la ecuación F.7 es la ecuación F.1 presentada al inicio del anexo.

## F.3. Balance de sustrato

$$\frac{d(S \cdot V_d)}{dt} = F_{in} \cdot S_{in} - F_{out} \cdot S_{out} - r_s \cdot X_{out} \cdot V_d - m \cdot X_{out} \cdot V_d - r_p \cdot X_{out} \cdot V_d \quad (F.8)$$

$$r_s = Y_{S/X} \cdot \mu + m$$

$$r_p = Y_{P/X} \cdot \mu$$

Donde:

$S_{in}$ : Concentración de entrada de sustrato [ $g/L$ ].

$S_{out}$ : Concentración de salida de sustrato [ $g/L$ ].

$Y_{S/X}$ : Es el rendimiento de sustrato por biomasa producida.

$Y_{P/X}$ : Es el rendimiento de producto por biomasa producida.

$r_s$ : Velocidad de consumo de sustrato debido al crecimiento de biomasa [1/h].

$r_p$ : Coeficiente de mantención [1/h].

$r_p$ : Velocidad de consumo de producto debido al crecimiento de biomasa [1/h].

Asumiendo que no hay consumo de producto debido al crecimiento de biomasa y coeficiente de mantención despreciable:

$$F_{out} \cdot S_{out} - F_{in} \cdot S_{in} = r_s \cdot X_{out} \cdot V_d$$

Ordenando la expresión, se tiene:

$$X_{out} = Y_{X/S} \cdot (S_{in} - S_{out}) \quad (\text{F.9})$$

#### F.4. Balance de producto

$$\frac{d(P \cdot V_d)}{dt} = F_{out} \cdot P_{out} - F_{in} \cdot P_{in} - r_p \cdot X \cdot V_d \quad (\text{F.10})$$

Donde:

$P_{in}$ : Concentración de entrada de producto [g/L].

$P_{out}$ : Concentración de salida de producto [g/L].

En estado estacionario y asumiendo que la entrada no contiene producto, se tiene:

$$F_{out} \cdot P_{out} = r_p \cdot X_{out} \cdot V_d \quad (\text{F.11})$$

$$r_p \cdot X_{out} = \mu \cdot P_{out}$$

$$X_{out} = Y_{X/P} \cdot P_{out} \quad (\text{F.12})$$

#### F.5. Parámetros y cinética de crecimiento de los microorganismos

La velocidad de crecimiento de los microorganismos se basa en la cinética de Michaelis-Menten para enzimas. Su analogía se traduce en la ecuación de Monod. Existe una amplia variedad de cinéticas de crecimiento, las cuales pueden ser complicadas, dependiendo de varios factores como inhibición por pH, sustrato, crecimiento de biomasa, producto etc. Una variante del modelo de Monod que describe la hidrólisis e inhibición por sustrato es la ecuación de Contois.

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S_{out}}{\beta \cdot X_{out} + S_{out}} \quad (\text{F.13})$$

Considerando que  $\mu$  es  $1/THR$  y reemplazando la ecuación F.9 en la ecuación F.13 se tiene:

$$\frac{\mu_{max} \cdot S_{out}}{\beta \cdot Y_{X/S} \cdot S_{in} - \beta \cdot Y_{X/S} \cdot S_{out} + S_{out}} = \frac{1}{THR} \quad (\text{F.14})$$

Definiendo  $\beta \cdot Y_{X/S}$  como una constante  $K$  y reordenando la ecuación F.14 se tiene:

$$THR = \frac{1}{\mu_{max}} + \frac{K}{\mu_{max}} \left( \frac{S_{in} - S_{out}}{S_{out}} \right) \quad (\text{F.15})$$

La ecuación F.15 permite calcular el tiempo de retención hidráulico conociendo los valores de  $\mu_{max}$ ,  $K$ ,  $S_{in}$  y  $S_{out}$ .

Por otra parte, se define  $B$  como el volumen producido de metano por kilogramo de sustrato cargado [ $LCH_4/KgS$ ] y  $B_0$  como el volumen producido de metano por kilogramo de sustrato cargado a un tiempo infinito. Reordenando la ecuación F.15, se tiene

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{K}{\mu_{max} \cdot THR + K - 1} \quad (F.16)$$

La producción de metano que se genera en un proceso anaeróbico es directamente proporcional a la concentración de sustrato a la salida del digestor y la producción de metano a tiempo infinito, proporcional a la entrada de sustrato:

$$\frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{B_0 - B}{B_0} \quad (F.17)$$

Al combinar y reordenar la ecuación F.16 y F.17 se tiene:

$$\frac{B_0}{B_0 - B} = \frac{\mu_{max} \cdot THR}{K} + \frac{K - 1}{K} \quad (F.18)$$

La ecuación F.18 es una linealización que permite obtener  $\mu_{max}$  y  $K$  a partir de datos experimentales.

## F.6. Cálculo del rendimiento $Y_{P/S}$ y flujo másico de metano

Antes de obtener el flujo másico de metano, es necesario conocer el rendimiento de sustrato a producto a partir de los datos experimentales. De la ecuación F.9 y F.12 se tiene:

$$X_{out} = Y_{X/P} \cdot P_{out} = Y_{X/S} \cdot (S_{in} - S_{out}) \quad (F.19)$$

$$Y_{P/S} = \frac{P_{out}}{S_{in} - S_{out}} \quad (F.20)$$

Retomando la ecuación F.11 y reemplazando la expresión de  $r_p$ , se tiene:

$$F_{out} \cdot P_{out} = Y_{P/X} \cdot \mu \cdot X_{out} \cdot V_d \quad (F.21)$$

Reemplazando la ecuación F.12 en la ecuación F.21:

$$F_{out} \cdot P_{out} = Y_{P/X} \cdot \mu \cdot Y_{X/S} \cdot (S_{in} - S_{out}) \cdot V_d \quad (F.22)$$

$$F_{out} \cdot P_{out} = Y_{P/S} \cdot \mu \cdot (S_{in} - S_{out}) \cdot V_d \quad (F.23)$$

De la ecuación F.23 se obtiene el flujo másico de metano. Para calcular el rendimiento  $Y_{P/S}$ , se reemplaza la ecuación F.20 en la ecuación F.23 (recordar que  $\mu = (1/THR)$ ).

$$F_{out} \cdot P_{out} = \frac{P_{out}}{THR} \cdot V_d \quad (F.24)$$

Expresando el flujo en términos de B (recordar que B esta expresado en litros de metano):

$$F_{out} \cdot P_{out} = \frac{B}{THR} \cdot \rho_{CH_4} \cdot S_{in} \cdot V_d \quad (F.25)$$

Despejando  $B$  de la ecuación F.18 y reemplazando en la ecuación F.25, se tiene el flujo volumétrico de metano en función de  $B_0$ :

$$F_{out} \cdot P_{out} = \frac{B_0}{THR} \cdot \rho_{CH_4} \cdot S_{in} \cdot V_d \cdot \left(1 - \frac{K}{\mu_{max} \cdot THR + K - 1}\right) \quad (F.26)$$

Despejando  $P_{out}$  de la ecuación F.26 y reemplazando en la ecuación F.20:

$$Y_{P/S} = \frac{B_0}{THR \cdot F_{out} \cdot (S_{in} - S_{out})} \cdot \rho_{CH_4} \cdot S_{in} \cdot V_d \cdot \left(1 - \frac{K}{\mu_{max} \cdot THR + K - 1}\right) \quad (F.27)$$

Con el flujo de metano  $F_{CH_4}$  se puede calcular el rendimiento  $\eta$  expresado en [L/gSV]:

$$\eta = \frac{F_{CH_4}}{\rho_{CH_4} \cdot SV} \quad (F.28)$$

## Memoria de cálculo

Para el cálculo de los parámetros cinéticos, se utilizan los datos del anexo E. Los puntos experimentales se extraen con MATLAB®. Se utiliza la ecuación F.18 para realizar un ajuste lineal en Excel®. a la curva experimental de 25°C. En la figura F.1 se muestran los resultados del ajuste.

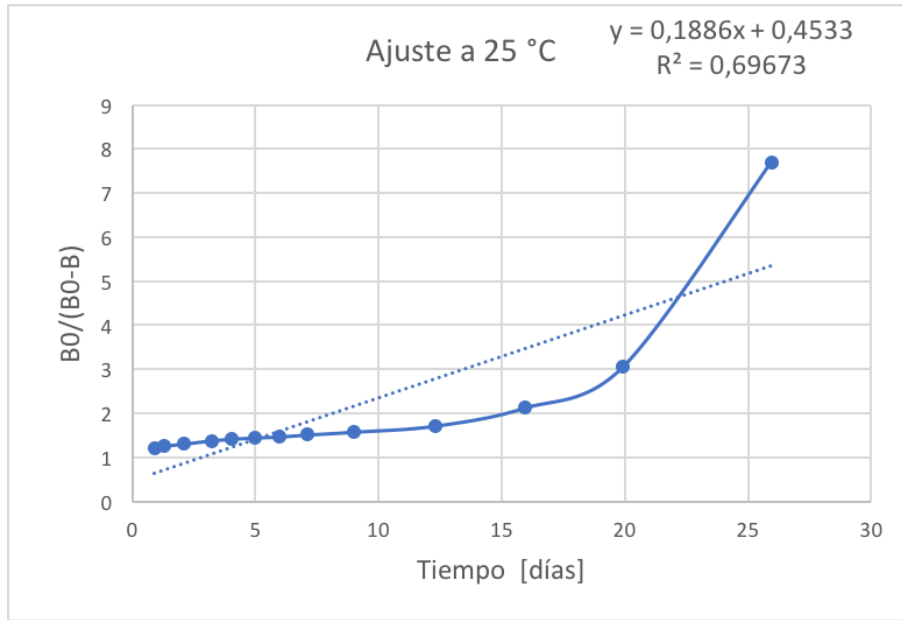


Figura F.1: Ajuste lineal de los datos experimentales a 25°C.

El valor  $B_0$  se obtiene de la figura E.1:

$$B_0 = 554[L/kgSV] = 0,554[L/gSV]$$

De la linealización, se obtiene:

$$y = 0,1886x + 0,4533 \quad (F.29)$$

Donde, según la ecuación F.18, la pendiente equivale a:

$$0,1886 = \frac{\mu_{max}}{K}$$

Y el intercepto es:

$$0,4533 = \frac{K - 1}{K}$$

Despejando K:

$$k = 1,83$$

Despejando  $\mu_{max}$ :

$$\mu_{max} = 0,103$$

Por criterios de diseño, se tiene que la reducción de sólidos volátiles es 58,3%. Para calcular el tiempo de retención hidráulico se utiliza la ecuación F.6:

$$THR = \frac{1}{0,103} + \frac{1,83}{0,103} \left( \frac{135,39 - 135,39 \cdot (1 - 0,583)}{135,39 \cdot (1 - 0,583)} \right) = 35[d]$$

El volumen del digestor se calcula con la ecuación F.1:

$$V_d = 24,09 \cdot 35 = 843,09[L]$$

La tasa de carga orgánica ORL se calcula con la ecuación F.2:

$$ORL = \frac{3261,28}{843,0} = 3,87[g/L \cdot d]$$

El rendimiento de producto a sustrato se calcula con la ecuación F.27:

$$Y_{P/S} = \frac{0,554 \cdot 0,72 \cdot 136,66 \cdot 835,23}{43 \cdot 30 \cdot (136,66 - 136,66 \cdot 0,583)} \cdot \left( 1 - \frac{1,83}{0,103 \cdot 35 + 1,83 - 1} \right) = 0,56$$

El flujo másico de metano se calcula con la ecuación F.23:

$$F_{out} \cdot P_{out} = 0,56 \cdot \frac{1}{35} \cdot (136,66 - 136,66 \cdot 0,583) \cdot 835,23 = 764,70[g/d]$$

Asumiendo que 1 mes tiene 30 días, la cantidad de gas metano producido por mes es:

$$F_{CH_4} = 22,94[kg/mes]$$

El rendimiento experimental se calcula con la ecuación F.28:

$$\eta_{exp} = \frac{764,70}{0,72 \cdot 3261,28} = 0,33[L/gSV]$$

En la Tabla F.1 se resumen los parámetros necesarios para dimensionar y escalar el reactor y el flujo de metano.

Tabla F.1: Resumen de parámetros cinéticos.

| Parámetro   | Valor | Unidad |
|-------------|-------|--------|
| $\mu_{max}$ | 0,103 | 1/d    |
| $K$         | 1,83  | -      |
| $Y_{P/S}$   | 0,74  | -      |

## Anexo G. Energía y temperatura

En esta sección, se realiza el balance de energía en el biodigestor para calcular la temperatura de salida del efluente. Para el cálculo se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- El biodigestor es enterrado a 2 metros en el subsuelo, a una temperatura de 15°C (ver Anexo ).
- La temperatura de entrada al biodigestor es la temperatura del agua de la zona en invierno (6°C).
- Flujo de calor constante.
- No se considera gradiente de temperatura o variación de temperatura en el eje axial.
- Flujo laminar.
- Geometría cilíndrica y sección transversal circular.
- Transferencia de calor estacionaria.
- Transferencia de calor unidimensional.
- Conductividad térmica, calor específico y densidad constante.

Para calcular el calor transferido en el manto del biodigestor se utiliza la ecuación G.1 y el calor transferido al flujo es calculado con la ecuación G.2.

$$Q_B = \frac{T_{tierra} - T_s}{R_T} \quad (G.1)$$

$$Q_f = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (G.2)$$

Para utilizar el flujo másico de entrada/salida en el reactor se debe realizar un cambio de unidades.

$$\dot{m} = \frac{F_{in} \cdot \rho_{mezcla}}{1000 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (G.3)$$

Donde:

$T_{tierra}$ : Temperatura de la tierra a 2[m] de profundidad.

$T_s$ : Temperatura de salida del biodigestor.

$T_e$ : Temperatura de salida de entrada del biodigestor.

$R_T$ : Resistencia a la transferencia de calor.

$\dot{m}$ : Flujo másico de salida del biodigestor.

$\rho_{mezcla}$ : Densidad de la mezcla (calculado en anexo).

$c_p$ : Calor específico de la mezcla (calculado en anexo).



Al igualar  $Q_B$  y  $Q_f$  se obtiene:

$$\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) = \frac{T_{tierra} - T_s}{R_T}$$

Despejando  $T_s$ :

$$T_s = \frac{T_{tierra} + \dot{m} \cdot c_p \cdot T_e \cdot R_T}{\dot{m} \cdot c_p \cdot R_T + 1} \quad (G.4)$$

La resistencia a la transferencia de calor considerando geometría cilíndrica se calcula con la ecuación.

$$R_T = \frac{1}{h_{mezcla} \cdot A_d} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_{poliet} \cdot L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_{tierra} \cdot L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi \cdot k_{conc} \cdot L} \quad (G.5)$$

$h_{mezcla}$ : Coeficiente de convección en la mezcla.

$r_i$ : radios de transferencia de calor.

$k_{poliet}$ : Conductividad térmica del polietileno.

$k_{tierra}$ : Conductividad térmica de la tierra.

$k_{conc}$ : Conductividad térmica del concreto.

$L$ : Largo del biodigestor.

$A_d$ : Área interna del biodigestor.

El biodigestor es enterrado en el subsuelo con una capa de tierra y concreto. En la figura se muestra un corte transversal del digestor con las capas de transferencia unidireccional. Además, se muestran las resistencias asociadas a cada material y los radios. Respecto a los radios, estos se muestran en el Anexo L.

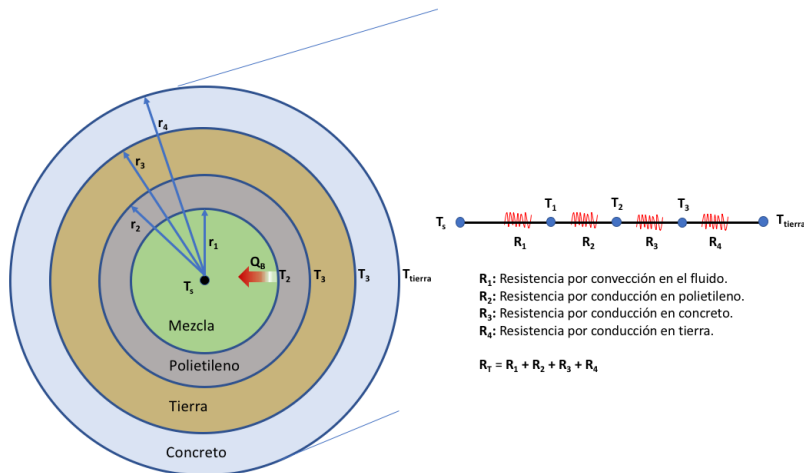


Figura G.1: Corte transversal del biodigestor con las capas de transferencia de calor y representación de las resistencias asociadas.

Para calcular la resistencia en el fluido interno, es necesario conocer el coeficiente de convección en la mezcla ( $h_{mezcla}$ ). Se puede obtener el coeficiente mediante adimensionales Nusselt, el cual

relaciona la convección térmica, el largo característico y la conducción térmica mediante la ecuación G.6.

$$N_u = \frac{h_{mezcla} \cdot L}{k_{mezcla}} \quad (\text{G.6})$$

Si se considera que el flujo es laminar ( particularmente por la difusión del gas en el fluido), flujo de calor constante y sección transversal circular del biodigestor, el valor de  $N_u$  es 4,36. La conductividad térmica de la mezcla se obtuvo en el Anexo Ñ que equivale a  $0,55[W/m \cdot K]$ . El largo característico corresponde al diámetro del biodigestor (ver Anexo L).

Despejando  $h_{mezcla}$  de la ecuación G.6 y reemplazando los valores, se obtiene:

$$h_{mezcla} = \frac{N_u \cdot k_{mezcla}}{L} = \frac{4,36 \cdot 0,55}{1,14} = 2,11[W/m^2 \cdot K]$$

Con el valor de  $h_{mezcla}$ , los radios (ver Anexo L), las conductividades mostradas en el Anexo I y la ecuación G.5, se obtiene el valor de la resistencia total:

$$R_T = 0,12[K/W]$$

Reemplazando los valores en la ecuación G.4 se obtiene la temperatura en el interior del biodigestor.

$$T_s = 13,91^\circ C$$

## Anexo H. Composición de metano

Para calcular la composición de salida de metano, se utiliza la ecuación de Buswell y Boyle:

$$C_c H_h O_o N_n S_s + \frac{1}{4}(4c - h - 2o + 3n + 2s) \cdot H_2O$$

$$\Rightarrow \frac{1}{8}(4c - h + 2o + 3n + 2s) \cdot CO_2 + \frac{1}{8}(4c + h - 2o - 3n - 2s) \cdot CH_4 + n \cdot NH_3 + s \cdot H_2S$$

Esta ecuación supone una conversión completa, por tanto, es utilizada solo si se conoce el flujo másico de metano a la salida del reactor. Con los moles calculados de la Tabla D.3 y la ecuación de Buswell y Boyle, se calculan los moles de los principales gases de salida mostrados en la Tabla H.1. Así por ejemplo, para el cálculo de  $CO_2$ , se tiene:

$$N_{CO_2} = \frac{(4 \cdot 120,12 - 193,23 + 2 \cdot 94,70 + 3 \cdot 6,11 + 2 \cdot 0,81)}{8} \cdot \left[ \frac{mol}{d} \right] = 62,08[mol/d]$$

Tabla H.1: Moles calculados con la ecuación de Buswell y Boyle.

| Compuesto | valor [mol/d] |
|-----------|---------------|
| $CO_2$    | 62,08         |
| $CH_4$    | 58,05         |
| $NH_3$    | 6,11          |
| $H_2S$    | 0,81          |

Del amoniaco generado, el 82,35%p/p es nitrógeno y el 17,65%p/p hidrógeno [26]. Por otra parte, se considera que el biogás posee un 3%p/p de agua [26]. En la Tabla H.2 se muestran los moles, gramos y composiciones del gas de salida considerando los datos mencionados.

Tabla H.2: Moles, gramos y composiciones teóricas.

| Compuesto | valor [mol/d] | valor [g/d] | Composición (%p/p) |
|-----------|---------------|-------------|--------------------|
| $CO_2$    | 62,08         | 2731,40     | 69,88              |
| $CH_4$    | 58,05         | 928,74      | 23,76              |
| $N_2$     | 3,06          | 85,61       | 2,19               |
| $H_2$     | 9,17          | 18,35       | 0,47               |
| $H_2S$    | 0,81          | 27,37       | 0,70               |
| $H_2O$    | 4,12          | 117,26      | 3,00               |
| Total     | 137,28        | 3908,73     | 100,00             |

El flujo de metano fue calculado en el anexo F. Considerando que equivale a 32,34% de la composición teórica, se calculan los flujos mostrados en la Tabla H.3.

Tabla H.3: Flujos máxicos y composición del gas a partir del flujo de metano calculado.

| Compuesto | valor [kg/mes] | Composición (%p/p) |
|-----------|----------------|--------------------|
| $CO_2$    | 67,47          | 69,88              |
| $CH_4$    | 22,94          | 23,76              |
| $N_2$     | 2,11           | 2,19               |
| $H_2$     | 0,45           | 0,47               |
| $H_2S$    | 0,68           | 0,70               |
| $H_2O$    | 2,90           | 3,00               |
| Total     | 96,55          | 100,00             |

El rendimiento de biogás a conversión completa se calcula con la ecuación F.28 y el metano teórico de la Tabla H.2:

$$\eta_{cc} = \frac{928,74}{0,72 \cdot 3261,28} = 0,40 [L/gSV]$$

## Anexo I. Criterios de diseño

Tabla I.1: Fuentes de información distintas a las bibliográficas.

| Simbología | Significado   |
|------------|---|
| A          | Estándar o práctica industrial                              |
| B          | Decisión tomada   |
| C          | Información por confirmar o asumida que debe ser ratificada |
| D          | Calculado   |

Tabla I.2: Criterios de diseño.  $SV$  se refiere a los sólidos volátiles,  $L_{CH_4}$  a los litros de metano y  $d$  a los días

| Característica            | Descripción                                | Valor | Fuente  |
|---------------------------|--|-------|---------|
| $P_{purines}[kg/d]$       | Producción de purines por cerdo            | 2,18  | [8]     |
| $\xi (\%)$                | Conversión                                 | 65,00 | [26][B] |
| $\%SV_{purines}$          | Porcentaje de sólidos volátiles de purines | 6,80  | [26]    |
| $B_0[L_{CH_4}/gSV]$       | Producción $CH_4$ por sustrato cargado     | 0,554 | [27]    |
| $\%SV_{algas}$            | Porcentaje de sólidos volátiles de algas   | 93,70 | [27]    |
| $S_{in}[g/L]$             | Concentración de entrada                   | 70,00 | [B][C]  |
| $Y_{P/S}$                 | Rendimiento de sustrato a producto         | 0,74  | [D]     |
| $F_{in}[L/d]$             | Flujo volumétrico de entrada               | 0,50  | [A][B]  |
| $\rho_{CH_4}[g/L]$        | Densidad del metano                        | 0,72  | [27]    |
| $r_{p/a}$                 | Razón purines-alga                         | 3:1   | [41][B] |
| $I_d(\%)$                 | Reducción de sólidos volátiles             | 58,30 | [41][B] |
| $k_{poliet}[W/m \cdot K]$ | Conductividad del polietileno              | 0,40  | [55]    |
| $k_{conc}[W/m \cdot K]$   | Conductividad del concreto                 | 2,50  | [56]    |
| $k_{tierra}[W/m \cdot K]$ | Conductividad de la tierra                 | 2,50  | [56]    |

Tabla I.3: Pesos moleculares.

| Compuesto | g/mol | Compuesto | g/mol |
|-----------|-------|-----------|-------|
| $C$       | 12    | $CO_2$    | 44    |
| $H$       | 1     | $CH_4$    | 16    |
| $O$       | 16    | $N_2$     | 28    |
| $N$       | 14    | $H_2S$    | 34    |
| $S$       | 32    | $H_2O$    | 18    |

## Anexo J. Agitación

En esta sección se calcula la potencia consumida por el agitador en el biodigestor. En la Figura J.1 se muestra la relación entre el número e potencia y el Reynold para tres tipos de turbinas: Rushton, Canaleta y hélice marina.

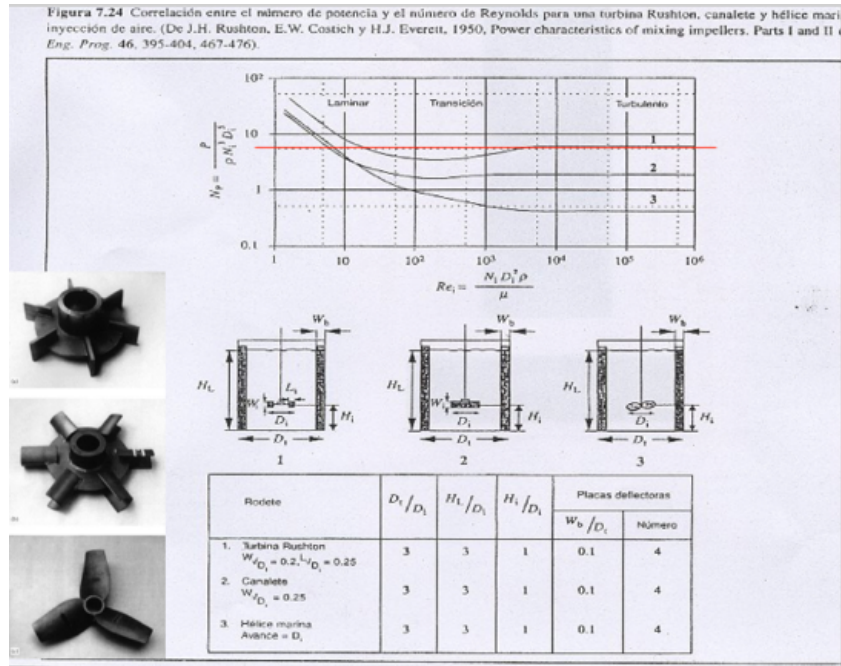


Figura J.1: Correlación entre el número de potencia y el Reynold para tres tipos de turbinas.

Se puede asumir un régimen laminar con un número de potencia de 8 (Figura J.1). Además, se asume que la velocidad angular del agitador es  $1[s^{-1}]$ .

El diámetro del agitador corresponde a un tercio del diámetro del biodigestor, con las dimensiones del biodigestor (ver Anexo L), se tiene:

$$D_a = \frac{D}{3} = \frac{1,14}{3} = 0,38 \tag{J.1}$$

La potencia del agitador se calcula con la ecuación

$$P_{agitador} = N_p \cdot \rho_{mezcla} \cdot N_{mix}^3 \cdot D_a^5 \tag{J.2}$$

Donde:

$P_{agitador}$ : Potencia del agitador.

$N_p$ : Número de potencia.

$\rho_{mezcla}$ : Densidad de la mezcla.

$N_{mix}$ : Velocidad angular del agitador.

$D_a$ : Diámetro del agitador.

Reemplazando los valores en la ecuación J.3, se tiene:

$$P_{agitador} = 8 \cdot 1099,65 \cdot 1^3 \cdot 0,38^5 = 69,70[W] \tag{J.3}$$

## Anexo K. Efluentes

## K.1. Balances de masa

En esta sección, se realizan los balances de masa considerando dos salidas, el efluente con lodos estabilizados y la corriente de gas.

Balance de masa total:

$$M_T = M_G + M_E \quad (\text{K.1})$$

Balance de masa de sólidos volátiles:

$$M_{T,SV} = M_{G,SV} + M_{E,SV} \quad (\text{K.2})$$

Balance de masa de agua:

$$M_{T,H_2O} = M_{G,H_2O} + M_{E,H_2O} \quad (\text{K.3})$$

Balance de masa de carbono:

$$M_{T,C} = M_{G,C} + M_{E,C} \quad (\text{K.4})$$

Balance de masa de nitrógeno:

$$M_{T,N} = M_{G,N} + M_{E,N} \quad (\text{K.5})$$

Donde:

$M_T$ : Masa total de entrada [ $g/d$ ].

$M_G$ : Masa total del gas [ $g/d$ ].

$M_E$ : Masa total de efluentes de salida [ $g/d$ ].

$M_{T,SV}$ : Masa de sólidos volátiles de entrada [ $g/d$ ].

$M_{G,SV}$ : Masa de sólidos volátiles en el gas de salida [ $g/d$ ].

$M_{E,SV}$ : Masa de sólidos volátiles en el efluente [ $g/d$ ].

$M_{T,H_2O}$ : Masa de agua de entrada [ $g/d$ ].

$M_{G,H_2O}$ : Masa de agua en el gas de salida.

$M_{E,H_2O}$ : Masa de agua en el efluente [ $g/d$ ].

$M_{T,C}$ : Masa de carbono de entrada [ $g/d$ ].

$M_{G,C}$ : Masa de carbono en el gas de salida [ $g/d$ ].

$M_{E,C}$ : Masa de carbono en el efluente [ $g/d$ ].

$M_{T,N}$ : Masa de nitrógeno de entrada [ $g/d$ ].

$M_{G,N}$ : Masa de nitrógeno en el gas de salida [ $g/d$ ].

$M_{E,N}$ : Masa de nitrógeno en el efluente [ $g/d$ ].

Con los balances de masa, la masa de entrada (Tabla D.3) y la masa del gas (Tabla H.3) se calculan los flujos máscicos en el effluente (Tabla K.1).

Tabla K.1: Composición de mezcla macroalgas-purines. Los porcentajes de  $C, H, O, N$  y  $S$  están calculados respecto a los  $SV$ .

| Flujo        | valor    | Unidad |
|--------------|----------|--------|
| $M_E$        | 23270,35 | g/d    |
| $M_{E,SV}$   | 42,95    | g/d    |
| $M_{E,H_2O}$ | 22123,10 | g/d    |
| $M_{E,C}$    | 254,61   | g/d    |
| $M_{E,N}$    | 15,12    | g/d    |

## K.2. Caracterización del effluente

De la tabla K.1 se calcula la relación C:N:

$$C : N = \frac{100 \cdot 254,61}{15,12} = 16,84 \%$$

El porcentaje en la reducción de carbono es:

$$R_C = 100 - \frac{100 \cdot M_{T,C}}{M_{E,C}} = 100 - \frac{100 \cdot 254,61}{1441,49} = 82,34 \%$$

El porcentaje en la reducción de Nitrógeno es:

$$R_N = 100 - \frac{100 \cdot M_{T,N}}{M_{E,N}} = 100 - \frac{100 \cdot 15,12}{85,61} = 82,33 \%$$

La composición de Carbono en la corriente de effluente es:

$$C(\%) = \frac{100 \cdot M_{E,C}}{M_E} = \frac{100 \cdot 254,61}{23270,35} = 1,09 \%$$

La composición de Nitrógeno en la corriente de effluente es:

$$N(\%) = \frac{100 \cdot M_{E,N}}{M_E} = \frac{100 \cdot 15,12}{85,61} = 0,06 \%$$

Si se asume que el effluente tiene la misma composición de  $CO_2$  mostrada en la Tabla H.3, se puede aproximar que la composición de carbono orgánico en el effluente es 30,12%. El carbono orgánico total (COT) se puede calcular con flujo de carbono en el effluente y el volumen del biodigestor:

$$COT = \frac{M_{E,C}}{V_d} = \frac{1000 \cdot 254,61 \cdot 0,3012}{835,23} = 91,82[mg/d \cdot L]$$

Para aguas residuales urbanas se tiene una correlación entre el COT y la  $DBO_5$  dada por la siguiente expresión:

$$DBO_5 = 1,87 \cdot COT - 17 \tag{K.6}$$

Reemplazando el COT calculado en la ecuación K.6:

$$DBO_5 = 1,87 \cdot 91,82 - 17 = 154,70[mg/d \cdot L]$$

## Anexo L. Biodigestor marca Durman®

En este Anexo se presentan las características y recomendaciones de instalación del biodigestor Durman de polietileno.

### L.1. Partes y dimensiones

En la figura L.1 se muestran las partes del biodigestor y en la tabla L.2 algunas de las dimensiones.

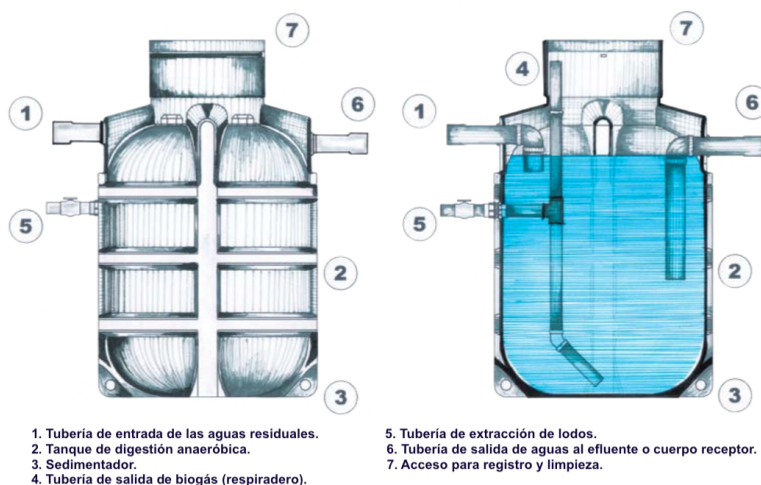


Figura L.1: Partes del biodigestor Durman.

Tabla L.1: Algunas dimensiones del biodigestor Durman.

| Dimensión                      | valor |
|--------------------------------|-------|
| Capacidad ( $L$ )              | 1100  |
| Altura ( $m$ )                 | 1,85  |
| Diámetro ( $m$ )               | 1,14  |
| Grosor del polietileno ( $m$ ) | 0,03  |

### L.2. Recomendaciones de excavación

La excavación para la instalación del biodigestor se realiza de acuerdo al tipo de suelo. Para suelos blandos o rocoso inestable, el ángulo de excavación debe ser entre 45 y 60 grados; Para suelo estable o estratificado, el ángulo de excavación debe ser entre 60 y 75 grados; para suelo duro o rocoso, el ángulo de excavación debe ser de 90 grados. Cabe notar que deben evitarse piedras que puedan dañar el tanque.

La excavación debe ser al menos 30[ $cm$ ] aumentado al diámetro. Y el espesor de la pared de concreto debe ser de 5[ $cm$ ]. Con estos datos se tienen los radios para cada relleno mostrados en la tabla 1.



Tabla L.2: Radio del biodigestor y los rellenos.

| Radios | valor [m] |
|--------|-----------|
| $r_1$  | 0,54      |
| $r_1$  | 0,57      |
| $r_3$  | 0,62      |
| $r_4$  | 0,72      |

## Anexo M. Evaluación Económica privada

### M.1. Caso base

En este Anexo se presentan los cálculos y resultados de la evaluación económica. El precio del biodigestor cotizado es de \$267.000 [59], con una vida útil de 10 años y una depreciación lineal. El precio de la válvula es de \$20.000 [60], el precio de la instalación \$100.000, el cobro del ingeniero por la instalación se estima en \$200.000 y los costos de transportes en 20 % de la inversión.

Se cotizó el precio de un cilindro de 15 kg en la comunidad José Paineicura, siendo de 25500\$, es decir, \$1.700 el kilogramo de gas. En la Tabla M.1 se resumen los conceptos y precios descritos anteriormente.

De acuerdo a lo cotizado, se define  $P_{vc}$  como el precio por unidad volumétrica de biodigestor comprado y  $P_{vi}$  como el precio por unidad volumétrica de biodigestor instalado:

$$P_{vc} = \frac{\text{Precio.digestor}}{V_d} = \frac{266.500}{843} = 316[\$/L]$$

$$P_{vi} = \frac{\text{Precio.instalacion}}{V_d} = \frac{100.000}{843} = 118,6[\$/L]$$

Tabla M.1: Conceptos y precios.

| Descripción                | valor   |
|----------------------------|---------|
| Precio digestor (\$)       | 266.500 |
| Vida útil (años)           | 10      |
| Precio gas (\$/kg)         | 1.700   |
| Producción de gas (kg/año) | 275     |
| Precio filtro (\$)         | 23.000  |
| Precio válvula (\$)        | 20.000  |
| Instalación (\$)           | 100.000 |
| Ingeniero (\$)             | 200.000 |
| Tasa (%)                   | 15      |

En la Figura M.1 se muestra el flujo de caja del caso base, con una tasa de impuesto del 25 %. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos ya que equivalen a los mismos.

| Periodo                   | 0                  | 1               | 2               | 9               | 10              |
|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ingresos                  |                    | 467995,4        | 467995,4        | 467995,4        | 467995,4        |
| Depreciación              |                    | -26649,4        | -26649,4        | -26649,4        | -26649,4        |
| Costos                    |                    | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        |
| Utilidad antes impuesto   |                    | 418346,0        | 418346,0        | 418346,0        | 418346,0        |
| Impuesto(25%)             |                    | -104586,5       | -104586,5       | -104586,5       | -104586,5       |
| Utilidad despues impuesto |                    | 313759,5        | 313759,5        | 313759,5        | 313759,5        |
| Depreciación              |                    | 26649,4         | 26649,4         | 26649,4         | 26649,4         |
| Inversión                 | -703805,59         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-703805,6</b>   | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> | <b>340408,9</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>\$1.004.628</b> |                 |                 |                 |                 |
| <b>TIR</b>                | <b>47%</b>         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Payback</b>            | <b>1,5</b>         |                 |                 |                 |                 |

Figura M.1: Flujo de caja caso base.

## M.2. Alternativa I

La alternativa I corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 58,3% y una temperatura de 14°C. El volumen del reactor es 7.805[L] y la producción anual 273[kg/año]. El precio de compra e instalación es:

$$P_{c,I} = P_{vc} \cdot V_d = 316 \cdot 7.805 = \$2.466.969$$

$$P_{i,I} = P_{vi} \cdot V_d = 118,6 \cdot 7.805 = \$925.817$$

La vida útil, precio del gas, precio del filtro y cobro del ingeniero permanecen invariables (Tabla M.1). En la Figura M.2 se muestra el flujo de caja de la alternativa I, con una tasa de impuesto del 25%. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos ya que equivalen a los mismos.

| Periodo                   | 0                   | 1               | 2               | 9               | 10              |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ingresos                  |                     | 464651,6        | 464651,6        | 464651,6        | 464651,6        |
| Depreciación              |                     | -246696,9       | -246696,9       | -246696,9       | -246696,9       |
| Costos                    |                     | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        |
| Utilidad antes impuesto   |                     | 194954,7        | 194954,7        | 194954,7        | 194954,7        |
| Impuesto(25%)             |                     | -48738,7        | -48738,7        | -48738,7        | -48738,7        |
| Utilidad despues impuesto |                     | 146216,0        | 146216,0        | 146216,0        | 146216,0        |
| Depreciación              |                     | 246696,9        | 246696,9        | 246696,9        | 246696,9        |
| Inversión                 | -4335343,2          |                 |                 |                 |                 |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-4335343,2</b>   | <b>392912,9</b> | <b>392912,9</b> | <b>392912,9</b> | <b>392912,9</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>-\$2.363.404</b> |                 |                 |                 |                 |

Figura M.2: Flujo de caja Alternativa I.

## M.3. Alternativa II

La alternativa II corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 80% y una temperatura de 14°C. El volumen del reactor es 18.235[L] y la producción anual 375[kg/año]. El precio de compra e instalación es:

$$P_{c,II} = P_{vc} \cdot V_d = 316 \cdot 18.235 = \$5.763.875$$

$$P_{i,II} = P_{vi} \cdot V_d = 118,6 \cdot 18.235 = \$2.163.097$$

La vida útil, precio del gas, precio del filtro y cobro del ingeniero permanecen invariables (Tabla M.1). En la Figura M.3 se muestra el flujo de caja de la alternativa II, con una tasa de impuesto del 25 %. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos ya que equivalen a los mismos.

| Periodo                   | 0                   | 1               | 2               | 9               | 10              |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ingresos                  |                     | 637087,5        | 637087,5        | 637087,5        | 637087,5        |
| Depreciación              |                     | -576387,5       | -576387,5       | -576387,5       | -576387,5       |
| Costos                    |                     | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        |
| Utilidad antes impuesto   |                     | 37700,0         | 37700,0         | 37700,0         | 37700,0         |
| Impuesto(25%)             |                     | -9425,0         | -9425,0         | -9425,0         | -9425,0         |
| Utilidad despues impuesto |                     | 28275,0         | 28275,0         | 28275,0         | 28275,0         |
| Depreciación              |                     | 576387,5        | 576387,5        | 576387,5        | 576387,5        |
| Inversión                 | -9776366,6          |                 |                 |                 |                 |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-9776366,6</b>   | <b>604662,5</b> | <b>604662,5</b> | <b>604662,5</b> | <b>604662,5</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>-\$6.741.705</b> |                 |                 |                 |                 |

Figura M.3: Flujo de caja Alternativa II.

## M.4. Alternativa III

La alternativa III corresponde a la evaluación económica con un índice de reducción de sólidos volátiles ( $I_d$ ) de 80 % y una temperatura de 25°C. El volumen del reactor es 1.951[L] y la producción anual 375[kg/año]. El precio de compra e instalación es:

$$P_{c,III} = P_{vc} \cdot V_d = 316 \cdot 1.951 = \$616.742$$

$$P_{i,III} = P_{vi} \cdot V_d = 118,6 \cdot 1.951 = \$231.454$$

La vida útil, precio del gas, precio del filtro y cobro del ingeniero permanecen invariables (Tabla M.1). En la Figura M.4 se muestra el flujo de caja de la alternativa II, con una tasa de impuesto del 25 %. Los periodos del año 3 al 8 fueron omitidos ya que equivalen a los mismos.

| Periodo                   | 0                  | 1               | 2               | 9               | 10              |
|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ingresos                  |                    | 637515,7        | 637515,7        | 637515,7        | 637515,7        |
| Depreciación              |                    | -61674,2        | -61674,2        | -61674,2        | -61674,2        |
| Costos                    |                    | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        | -23000,0        |
| Utilidad antes impuesto   |                    | 552841,5        | 552841,5        | 552841,5        | 552841,5        |
| Impuesto(25%)             |                    | -138210,4       | -138210,4       | -138210,4       | -138210,4       |
| Utilidad despues impuesto |                    | 414631,1        | 414631,1        | 414631,1        | 414631,1        |
| Depreciación              |                    | 61674,2         | 61674,2         | 61674,2         | 61674,2         |
| Inversión                 | -1281835,8         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-1281835,8</b>  | <b>476305,4</b> | <b>476305,4</b> | <b>476305,4</b> | <b>476305,4</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>\$1.108.631</b> |                 |                 |                 |                 |
| <b>TIR</b>                | <b>35%</b>         |                 |                 |                 |                 |
| <b>Payback</b>            | <b>1,5</b>         |                 |                 |                 |                 |

Figura M.4: Flujo de caja Alternativa III.

## Anexo N. Evaluación Económica Social

En este Anexo se presentan los cálculos y resultados de la evaluación económica social. El precio del biodigestor cotizado es de \$267.000 [59], con una vida útil de 10 años y una depreciación lineal.

El precio de la válvula es de \$20.000 [60]. A estos precios de insumos y equipos se descuenta el 19 % de IVA. El precio de la instalación es \$100.000 (mano de obra no calificada); el cobro del ingeniero por la instalación se estima en \$200.000 (mano de obra calificada) y los costos de transportes en 20 % de la inversión.

Se asume que los costos de transporte están dados principalmente por el uso de combustible. El costo social de la bencina para el año 2021 de automóviles y camionetas es de 424[\$/L] [61]. El precio privado promedio de la bencina es de 900[\$/L]. Con estos valores se estima el factor de corrección:

$$F_{c_{combustible}} = \frac{424}{900} = 0,47$$

A los costos de instalación (mano de obra) se aplican factores de corrección. Los factores de corrección para los costos [61] se muestran en la Tabla N.1. En la Tabla N.2 se muestran los conceptos y precios corregidos, descontando el 19 % de IVA al digestor, válvula y filtro.

Tabla N.1: Factores de corrección [61].

| Descripción                | Factor de corrección |
|----------------------------|----------------------|
| Mano de obra calificada    | 0,98                 |
| Mano de obra no calificada | 0,62                 |
| Combustible                | 0,47                 |

Tabla N.2: Conceptos y precios.

| Descripción                | valor     |
|----------------------------|-----------|
| Precio digestor (\$)       | 1.998.245 |
| Vida útil (años)           | 10        |
| Precio gas (\$/kg)         | 1.700     |
| Producción de gas (kg/año) | 273       |
| Precio filtro (\$)         | 18.630    |
| Precio válvula (\$)        | 16.200    |
| Instalación (\$)           | 574.000   |
| Pago de Ingeniero (\$)     | 196.000   |
| Tasa (%)                   | 6         |

La Alternativa I representa el caso menos favorable por presentar un VAN negativo a menor temperatura (ver Anexo M). A continuación se muestran los flujos de caja de la evaluación económica social de la alternativa I considerando financiamiento mediante un fondo o subsidio estatal.

## N.1. Alternativa I: Fondo estatal

En este caso, se presenta la evaluación económica social, suponiendo que se cuenta con el fondo Chile compromiso de todos o el fondo de protección ambiental, cubriendo el 100 % de la inversión. En la Figura N.1 se muestra el flujo de caja social de la alternativa I con fondo estatal.

| Periodo                   | 0                  | 1             | 2             | 9             | 10            |
|---------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ingresos                  |                    | 464652        | 464652        | 464652        | 464652        |
| Depreciación              |                    | -246697       | -246697       | -246697       | -246697       |
| Costos                    |                    | -23000        | -23000        | -23000        | -23000        |
| Utilidad antes impuesto   |                    | 194955        | 194955        | 194955        | 194955        |
| Impuesto(25%)             |                    | -48739        | -48739        | -48739        | -48739        |
| Utilidad despues impuesto |                    | 146216        | 146216        | 146216        | 146216        |
| Depreciación              |                    | 246697        | 246697        | 246697        | 246697        |
| Inversión                 | -3046809           |               |               |               |               |
| Financiamiento            | 3046809            |               |               |               |               |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>0</b>           | <b>392913</b> | <b>392913</b> | <b>392913</b> | <b>392913</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>\$2.891.873</b> |               |               |               |               |

Figura N.1: Flujo de caja social de la Alternativa I, considerando financiamiento estatal.

## N.2. Alternativa I: Subsidio

En este caso, se presenta la evaluación económica social, suponiendo que se cuenta con el subsidio creciedo del comité de desarrollo y fomento indígena, cubriendo el 90 % de la inversión. En la Figura N.2 se muestra el flujo de caja social de la alternativa I con subsidio estatal.

| Periodo                   | 0                  | 1             | 2             | 9             | 10            |
|---------------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ingresos                  |                    | 464652        | 464652        | 464652        | 464652        |
| Depreciación              |                    | -246697       | -246697       | -246697       | -246697       |
| Costos                    |                    | -23000        | -23000        | -23000        | -23000        |
| Utilidad antes impuesto   |                    | 194955        | 194955        | 194955        | 194955        |
| Impuesto(25%)             |                    | -48739        | -48739        | -48739        | -48739        |
| Utilidad despues impuesto |                    | 146216        | 146216        | 146216        | 146216        |
| Depreciación              |                    | 246697        | 246697        | 246697        | 246697        |
| Inversión                 | -3046809           |               |               |               |               |
| Financiamiento            | 2742128            |               |               |               |               |
| <b>Flujo de caja</b>      | <b>-304681</b>     | <b>392913</b> | <b>392913</b> | <b>392913</b> | <b>392913</b> |
| <b>VAN</b>                | <b>\$2.587.193</b> |               |               |               |               |
| <b>TIR</b>                | <b>129%</b>        |               |               |               |               |
| <b>Payback</b>            | <b>0,8</b>         |               |               |               |               |

Figura N.2: Flujo de caja social de la Alternativa I, considerando subsidio del 90 %.

## Anexo Ñ. Propiedades de mezcla

En este anexo se presenta el cálculo de propiedades físico-químicas de la mezcla de algas y purines. En las Tablas , y se muestran las correlaciones encontradas por bibliografía para calcular la densidad ( $\rho$ ), capacidad calor específico ( $c_p$ ) y conductividad térmica ( $k$ ).

Tabla Ñ.1: Correlación para calcular la densidad ( $\rho$ ).

| Material      | Ecuación                                    |
|---------------|---|
| Agua          | $\rho = 997,18 + 0,0031439T - 0,0037574T^2$ |
| Proteína      | $\rho = 1330 - 0,5184T$                     |
| Lípidos       | $\rho = 925,59 - 0,41757T$                  |
| Cenizas       | $\rho = 2423,8 - 0,28063T$                  |
| Carbohidratos | $\rho = 1559,1 - 0,31046T$                  |

 Tabla Ñ.2: Correlaciones para calcular el calor específico  $c_p$ .

| Material      | Ecuación   |
|---------------|--|
| Agua          | $c_p = 4,1762 - 9,0864x10^{-5}T + 5,4731x10^{-6}T^2$ |
| Proteína      | $c_p = 2,0082 + 1,2089x10^{-3}T - 1,3129x10^{-6}T^2$ |
| Lípidos       | $c_p = 1,9842 + 1,4733x10^{-3}T - 4,8008x10^{-6}T^2$ |
| Cenizas       | $c_p = 1,0926 + 1,8896x10^{-3}T - 3,6817x10^{-6}T^2$ |
| Carbohidratos | $c_p = 1,5488 + 1,9625x10^{-3}T - 5,9399x10^{-6}T^2$ |

 Tabla Ñ.3: Correlaciones para calcular la conductividad térmica ( $k$ ).

| Material      | Ecuación                                      |
|---------------|---|
| Agua          | $k = 0,571 + 1,76x10^{-3}T - 6,70x10^{-6}T^2$ |
| Proteína      | $k = 0,179 + 1,20x10^{-3}T - 2,72x10^{-6}T^2$ |
| Lípidos       | $k = 0,181 - 2,76x10^{-3}T - 1,77x10^{-7}T^2$ |
| Cenizas       | $k = 0,330 + 1,40x10^{-3}T - 2,91x10^{-6}T^2$ |
| Carbohidratos | $k = 0,201 + 1,39x10^{-3}T - 4,33x10^{-6}T^2$ |

En la Tabla Ñ.4 se muestra la composición en proteínas, lípidos, cenizas y carbohidratos de las algas y purines. La columna de mezcla se calcula como el promedio de las composiciones de purines y alga.

Tabla Ñ.4: Composición de purines y Huiro en base seca. La cuarta columna es el promedio de las composiciones [8][15].

| Compuesto     | Huiro  | Purines | Mezcla (%) |
|---------------|--------|---------|------------|
| Proteína      | 13,20  | 9,10    | 11,15      |
| Lípidos       | 0,70   | 3,20    | 1,95       |
| Cenizas       | 10,80  | 19,70   | 15,25      |
| Carbohidratos | 75,30  | 68,00   | 71,65      |
| Total         | 100,00 | 100,00  | 100,00     |

Suponiendo que los sólidos totales se encuentran compuestos de proteínas, lípidos, cenizas y carbohidratos se calculan los valores y composiciones mostradas en la Tabla Ñ.5.

Tabla Ñ.5: Composición de purines y Huiro.

| Compuesto     | g/d      | Porcentaje % |
|---------------|----------|--------------|
| Proteína      | 476,00   | 1,80         |
| Lípidos       | 83,25    | 0,31         |
| Cenizas       | 651,03   | 2,46         |
| Carbohidratos | 3058,76  | 11,55        |
| $M_{agua}$    | 22219,65 | 83,88        |
| $M_T$         | 26488,68 | 100,00       |

Se toma como temperatura, la temperatura a la cual se calculan los parámetros cinéticos del Anexo E, esto es 25°C. Con las correlaciones mostradas en las Tablas , y , se calcula  $\rho$ ,  $c_p$  y  $k$  a la temperatura deseada. Estos valores son ponderados por las composiciones, así por ejemplo, para calcular  $\rho$ :

$$\rho_{agua}: 994,91[kg/m^3]$$

$$\rho_{protein}: 1317,04[kg/m^3]$$

$$\rho_{lipid}: 915,15[kg/m^3]$$

$$\rho_{cenizas}: 2416,79[kg/m^3]$$

$$\rho_{carbohid}: 1551,34[kg/m^3]$$

La densidad de la mezcla es:

$$\rho_{mezcla} = \frac{994,91 \cdot 83,88 + 1317,04 \cdot 1,80 + 915,15 \cdot 0,31 + 2416,79 \cdot 2,46 + 1551,34 \cdot 11,55}{100}$$

$$\rho_{mezcla} = 1099,65[kg/m^3]$$

En la Tabla Ñ.6se muestra  $\rho$ ,  $c_p$  y  $k_{mezcla}$  calculados.

Tabla Ñ.6:  $\rho$ ,  $c_p$  y  $k_{mezcla}$  calculados.

| Parámetro       | Valor calculado | Unidad          |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\rho_{mezcla}$ | 1099,65         | $kg/m^3$        |
| $c_{p,mezcla}$  | 3,76            | $KJ/kg \cdot K$ |
| $k_{mezcla}$    | 0,55            | $W/m \cdot K$   |