



Universidad del Desarrollo  
Facultad de Ingeniería  
Magister en Ciencias de la Ingeniería  
Santiago, Chile

# Diseño e implementación de micro biodigestor sensorizado para la producción de bio-insumos

Sebastián Andrés Guzmán-Cood

Tesis para optar al grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor tutor: Paul Bosch Pérez  
Profesor co-tutor: Camilo Rodríguez-Beltrán

Agosto 2024

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron esto posible por su apoyo, colaboración y confianza. Entre ellos está mi familia, mi señora Daniella Grossi, mis colegas de la vida Jose Duguet, Gastón Muñoz, Alejandra Bravo, Alejandro Chacón, mis colegas del Centro de Investigación en Tecnologías de la Sociedad de la UDD en particular a Christopher Silva, Wladimir Araya, Felipe Roa, Konstanza Vergara, Camila Sandoval, Francisca Rodríguez, Alejandro Rebolledo, Marcos Arce, Carlos Román, a los usuarios y beneficiarios Fermín Mamani y Paola López. También quiero agradecer a todas las personas que me han inspirado para seguir adelante en temas de biodigestión, entre ellos está Patricia Breuer, Claudia Pabón, Matías Jiménez y a todos los colegas de investigación de la RedBioLAC, entre muchas personas que he conocido en mi recorrido por la Digestión Anaeróbica y la valorización de residuos orgánicos.

# Contenido

Contenido.....	3
Resumen .....	6
Abstract .....	7
Introducción .....	8
Objetivos .....	11
Metodología.....	11
1. Revisión bibliográfica.....	16
1.1. Biodigestión anaerobia .....	16
1.1.1. Definición y caracterización básica .....	16
1.1.2. Historia de la Biodigestión .....	17
1.1.3. La biodigestión en la actualidad.....	18
1.1.4. Impacto ambiental.....	18
1.2. Biodigestores o Reactores anaerobios.....	20
1.2.1. Características generales .....	20
1.2.2. Tipos y diseños de reactores.....	20
1.2.3. Escalas de producción.....	22
1.2.4. Aspectos regulatorios .....	24
1.3. Etapas del proceso de la biodigestión.....	24
1.3.1. Procesos de la biodigestión anaeróbica.....	24
1.4. Operación, monitoreo y control de procesos .....	26
1.4.1. Parámetros según el sustrato .....	26
1.4.2. Parámetros de diseño y operación .....	27
1.4.3. Parámetros de monitoreo y control .....	29
1.4.4. Tecnología y sensorización.....	35
1.4.5. Indicadores del proceso .....	36
1.4.6. Bioinsumos de la biodigestión .....	38
2. Diseño y fabricación .....	42
2.1. Diseño del sistema de micro biodigestión .....	42
2.1.1. Variables características del sistema de micro biodigestión .....	42
2.1.2. Determinación de parámetros de diseño del sistema de micro biodigestión .....	46
2.1.2.5. Volumen del acumulador de <i>digestato</i> .....	48
2.1.3. Piezas o Componentes del micro biodigestor .....	49

2.1.4.	Accesorios complementarios del micro biodigestor .....	51
2.1.5.	Elementos y lógica del Sistema de Monitoreo .....	52
2.2.	Fabricación del sistema de micro biodigestión .....	59
2.2.1.	Fabricación biodigestor.....	59
2.2.2.	Fabricación del sistema de monitoreo .....	63
2.2.3.	Integración del sistema completo.....	67
3.	Implementación en terreno.....	69
3.1.	Identificación de zonas de prueba .....	69
3.1.1.	Factores de selección.....	69
3.1.2.	Mamiña: extremo norte de Chile.....	70
3.1.3.	Puerto Natales: extremo sur de Chile .....	72
3.2.	Instalación de los micro biodigestores.....	73
3.2.1.	Preparación del terreno.....	74
3.2.2.	Evaluación del sitio .....	74
3.2.3.	Acondicionamiento del suelo .....	75
3.2.4.	Instalación y ensamble .....	76
3.2.5.	Montaje de biodigestores .....	77
3.2.6.	Instalación de sensores y montaje de sistema tecnológico.....	78
3.2.7.	Pruebas y ajustes .....	81
3.2.8.	Construcción invernadero.....	81
3.2.9.	Documentación y registro.....	81
3.3.	Puesta en marcha y operación continua.....	81
3.3.1.	Activación con manejo de purines.....	82
3.3.2.	Estrategia de seguimiento y mantenimiento .....	83
3.3.3.	Capacitación del personal local.....	83
3.3.4.	Definición de roles y gobernanza.....	86
3.3.5.	Registro de actividades .....	86
3.3.6.	Generación de manuales e instructivos .....	87
3.3.7.	Almacenamiento y Visualización de datos.....	89
4.	Análisis y resultados .....	92
4.1.	Análisis del biol.....	92
4.1.1.	Toma de muestras .....	92
4.1.2.	Análisis biológico .....	92

4.1.3.	Análisis químico .....	94
4.2.	Análisis de datos del Sistema de monitoreo remoto .....	95
4.2.1.	Recopilación de datos en terreno .....	95
4.2.2.	Procesamiento y análisis de datos .....	96
4.3.	Interpretación de los datos capturados y ensayos de laboratorio .....	103
4.4.	Sostenibilidad del modelo de biodigestor .....	103
4.4.1.	Capacidad instalada en infraestructura .....	103
4.4.2.	Capacidad generada en plan de gobernanza y capacitación de la comunidad .....	104
Conclusiones .....		105
Retroalimentación Sistema de micro biodigestión .....		105
Retroalimentación Sistema de monitoreo .....		106
Análisis de bioinsumo .....		107
Recomendaciones para futuros trabajos .....		108
Bibliografía .....		109

## Resumen

De acuerdo con la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos, la valorización de residuos orgánicos en Chile es menor al 1% (Ministerio del Medioambiente, 2020) y esta propone alcanzar metas sobre el 30% para el año 2030 y 60% para el año 2060.

La biodigestión anaeróbica es un tratamiento biológico versátil que permite la valorización de residuos orgánicos en origen mediante su conversión en biogás y fertilizantes bio basados. Este tratamiento requiere de ambientes libres de oxígeno y su rendimiento depende de la salud de un consorcio de bacterias que, a su vez, dependen de parámetros de operación tales como la temperatura y el pH.

En Chile existen más de 100 biodigestores rurales instalados que no cuentan con sistema de monitoreo. A nivel industrial, existen 107 plantas de biodigestión certificadas ante la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (MinEnergía, 20217), actualmente, aproximadamente el 40% sigue operativa. Lo anterior da cuenta de la necesidad de contar con mayores herramientas para la gestión eficiente de residuos orgánicos y de generar la capacidad para mantener estas soluciones de forma sostenible en el tiempo.

Considerando esta problemática, se propuso un trabajo que realice una prueba empírica en condiciones reales, mediante el diseño e implementación de un sistema de micro biodigestión anaeróbica sensorizado y el posterior el análisis de los datos recolectados y de la composición del biol. Este trabajo describe el diseño de un sistema modular de micro biodigestión y un sistema de monitoreo de parámetros fisicoquímicos (pH y temperatura) que visibiliza los parámetros de operación en tiempo real.

El sistema completo se implementó y probó en una localidad de Pozo Almonte, una de las zonas extremas del norte grande de Chile. El proyecto operó durante aproximadamente 12 meses, se tomaron muestras de biol bimensuales, que permitieron caracterizar el digestato o bioinsumo generado, mediante el análisis de laboratorio, evaluando parcialmente su contenido de nutrientes, metales pesados y la presencia de patógenos, con el propósito de para validar sus propiedades como fertilizante orgánico, según la Norma de Digestatos (MMA, 2015).

Los resultados de producción de bioinsumos del biodigestor a escala rural con sistema de monitoreo, demostraron la viabilidad del sistema modular de biodigestión y su capacidad para operar en condiciones extremas. Con una producción de 20 litros diarios, el análisis del biol producido mostró una eliminación del 92% de coliformes fecales en un tiempo de retención hidráulica de 40 días a temperaturas mesofílicas-psicrofílicas. El bioinsumo también contenía micronutrientes y macronutrientes esenciales para su uso como fertilizante, sin presencia de metales pesados.

Palabras clave: micro-escala, diseño, implementación, biodigestor, IoT, digestato.

## Abstract

According to Chile's National Organic Waste Strategy, the valorization of organic waste in the country is currently less than 1% (Ministry of the Environment, 2020), with goals set to reach over 30% by 2030 and 60% by 2060. Anaerobic biodigestion is a versatile biological treatment that enables the on-site valorization of organic waste by converting it into biogas and bio-based fertilizers. This process requires oxygen-free environments, and its efficiency depends on the health of a bacterial consortium, which is influenced by operational parameters such as temperature and pH.

In Chile, there are over 100 installed rural biodigesters without monitoring systems. On an industrial level, there are 107 certified biodigestion plants registered with the Superintendency of Electricity and Fuels (MinEnergía, 2017), of which approximately 40% are still operational. This situation highlights the need for more efficient organic waste management tools and the capacity to maintain these solutions sustainably over time.

To address this issue, an empirical study was proposed under real conditions through the design and implementation of a sensor-equipped micro anaerobic biodigestion system, followed by the analysis of the collected data and biol composition. This work describes the design of a modular micro biodigestion system and a monitoring system for physicochemical parameters (pH and temperature) that displays operational parameters in real-time.

The complete system was implemented and tested in Pozo Almonte, one of the extreme northern regions of Chile. The project operated for approximately 12 months, during which bi-monthly samples of biol were collected. These samples allowed for the characterization of the digestate or biofertilizer produced, with laboratory analysis partially evaluating its nutrient content, heavy metals, and the presence of pathogens to validate its properties as an organic fertilizer according to the Digestate Standards (MMA, 2015).

The results from the biofertilizer production of the rural-scale biodigester with a monitoring system demonstrated the viability of the modular biodigestion system and its capacity to operate under extreme conditions. With a production of 20 liters per day, the analysis of the produced biol showed a 92% reduction in fecal coliforms within a hydraulic retention time of 40 days at mesophilic-psychrophilic temperatures. The biofertilizer also contained essential micronutrients and macronutrients for use as a fertilizer, with no presence of heavy metals.

Key words: micro-scale, design, implementation, biodigester, IoT, digestate.

## Introducción

Según diferentes estudios realizados en Chile, desde 2009 hasta 2020, la cantidad de residuos generados per cápita aumenta continuamente (CONAMA, 2010; SUBDERE, 2019; SINADER, 2020). En el año 2009, la generación per cápita es de 1,05 kg. por persona al día, con un total de 6,5 millones de toneladas de residuos sólidos municipales al año, según el primer reporte del manejo de residuos sólidos (CONAMA, 2010). En el año 2017, la generación per cápita es de 1,22 kg. por persona al día, con un total de 7,9 millones de toneladas de residuos sólidos municipales al año, de las cuales el 96% va a disposición final, es decir rellenos sanitarios, según el informe de Actualización de la situación por comuna y por región en materia de residuos sólidos domiciliarios y asimilables (SUBDERE, MMA, 2019).

Según el Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de residuos sólidos domiciliarios (RSD) y asimilables, aproximadamente el 50% de estos corresponde a residuos orgánicos, siendo esta cifra un 58% en la Región Metropolitana (SUBDERE, 2018). La generación de residuos orgánicos por persona al día son 0,6 kg. (SINIA, 2019). En el año 2017, la valorización de residuos orgánicos por parte de los municipios es inferior al 1% del total de toneladas generadas cada año, según lo declarado por las municipalidades en el Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER, 2020). Según la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO), en Chile faltan las capacidades técnicas en los municipios para lograr elaborar y gestionar financiamiento para proyectos de valorización de residuos orgánicos (MMA, 2021). En Chile existen 124 sitios activos de disposición final, de ellos sólo el 30,6% corresponde a rellenos sanitarios legales, incluyendo rellenos manuales, según el informe de Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables (SUBDERE, 2019).

La ENRO, indica que “el modelo actual de producción y consumo lineal, basado en tomar–hacer–desechar, que envía prácticamente la totalidad de sus residuos a disposición final es altamente ineficiente; no solo supone un desperdicio de recursos, sino también de nutrientes y energía” (MMA, 2020). Además, propone de manera prioritaria la prevención y mejora en la gestión de residuos orgánicos como eje de las políticas públicas, para así mejorar el desempeño ambiental del país, de tal forma de ser coherentes con los compromisos de nuestro país ante la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), donde Chile se compromete a velar por los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es particular con la Producción y Consumo Responsable, y con el Acuerdo de París, según la Estrategia de Chile para la Implementación de la Agenda 2030 (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2023).

En temáticas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el Sector Residuos, comprende principalmente las emisiones de: La disposición de los residuos sólidos; El tratamiento biológico de los residuos sólidos; La incineración de los residuos; El tratamiento y descarga de las aguas residuales (IPCC, 2006). Según el Sistema Nacional de Inventarios de GEI de Chile (SNICHILE), el Sector Residuos, contribuye en un 6% los GEI a nivel nacional (MMA, 2020). Este sector está definido por las emisiones de GEI resultantes de procesos microbiológicos que ocurren en la materia orgánica bajo degradación anaeróbica, principalmente desde sitios de disposición de residuos sólidos, manejados o no manejados; la emisión de óxido nitroso por la descomposición anaeróbica de excretas humanas; y el tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas e industriales en fase líquida y sólida (lodos), según el Informe del Inventario Nacional de Chile 2020 sobre los gases de efecto invernadero

y otros contaminantes climáticos 1990-2018 del Área de Mitigación e Inventarios de Contaminantes Climáticos Oficina de Cambio Climático (MMA, 2020).

En rellenos sanitarios, debido a la compresión y falta de oxígeno se genera metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de forma descontrolada, entre otros gases, en su mayoría liberados hacia la atmósfera (ImplementaSur, 2019). Por cada tonelada de desechos orgánicos que son enviados a un vertedero o relleno sanitario, se generan 4,2 toneladas de  $\text{CO}_2$  eq., esto dado que el metano generado es 25 veces más contaminante que el  $\text{CO}_2$  (ImplementaSur, 2019). El relleno sanitario sigue siendo la alternativa más utilizada y económica de disposición final, aun siendo muy contaminante (MMA, 2020). Existen algunos casos de rellenos con cubierta para atrapar los gases, pero es una medida reactiva para un tratamiento inadecuado de gestión de residuos orgánicos, según resultados del Programa Reciclo Orgánico para mitigar GEI de los rellenos sanitarios (MMA, 2020). Existe un colapso sanitario presente en Chile que requiere acciones urgentes con acciones estructurales concretas (MMA, 2020).

Existen alternativas de valorización de residuos orgánicos mediante tratamientos biológicos, tales como la biodigestión anaeróbica, el compostaje y uso de insectos afines como lombrices, larvas de mosca o escarabajo, que permiten obtener beneficios de los residuos mediante su transformación hacia un nuevo producto (ENRO, 2020). La biodigestión anaeróbica es un tratamiento biológico que convierte la materia orgánica en dos bioinsumos, digestato y biogás, mediante un consorcio de microorganismos anaeróbicos que se alimentan de dicha materia orgánica y los transforman, según el Manual Biogás (MinEnergía, 2011). La biodigestión anaeróbica permite mitigar prácticamente el 100% de los GEI directos, dado que están capturados dentro del reactor, según la sexta Revista RedBioLAC (RedBioLAC, 2022). Además, el tratamiento en origen permite minimizar la huella de carbono de los residuos asociada al transporte y disposición de estos (Ortega-Ahumada, 2023).

Los productos de la biodigestión anaeróbica son por una parte y en su mayoría digestato, que se compone a su vez de una fracción semi sólida, llamada biosol, y otra líquida, llamada biol, que tienen propiedades de fertilizantes orgánicos, bioestimuladores y capacidades regenerativas para suelos degradados, cerrando así el ciclo de los nutrientes (INDAP & GORE Los Ríos, 2018). Por otra parte, y en menor volumen, se genera biogás, que contiene entre un 50 y 70% de metano, que una vez filtrado y purificado, es utilizable como una fuente de combustible de origen natural, para producir energía térmica o eléctrica (Ministerio de Energía Chile, FAO & Global Environment Facility, 2011). Esta conversión y valorización de residuos orgánicos mediante biodigestión, aporta en la descontaminación del medio ambiente dado que mitiga y disminuye emisiones de GEI y contribuye a integrar elementos a los suelos que equivale a huella de carbono evitada (Pérez et al., 2016).

En Chile, se cuenta con 43 plantas de biogás al año 2021, registradas y certificadas ante la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC, 2021). Adicionalmente, se tiene un registro personal de al menos 30 biodigestores de escala doméstica sin certificar (Guzmán-Cood, 2022). En cada escala se presentan diferentes brechas y desafíos por mejorar, en efecto, hay muchos casos de fracaso de iniciativas, entre ellos están el Caso del Sector Lechero, EcoPrial, Coexca, BioTecSur, etc. (INDAP & GORE Los Ríos, 2018). Hay una alta tasa de inoperatividad entre ellos, llegando a más de 60% está inoperativo, biodigestores industriales (de un total de 107 registradas al 2017, hay 21 abandonadas o detenidas, 19 sin información, 67 operando) (Ministerio de Energía Chile, 2017). Para el 2021, solo continúan 43 plantas operativas (SEC, 2021).

Entre las diferentes causas de la inoperación, se encuentra la poca capacidad técnica nacional, falta de cursos técnicos y dependencia de técnicos extranjeros (ImplementaSur, 2019). En la SEC solo se han realizado dos cursos de instaladores clase 4 sobre plantas de biogás, hasta 2021 hay 27 instaladores certificados y no se han realizado más cursos (SEC, 2021). Otra de las brechas, es la falta la incorporación de nuevas tecnologías para sistematizar levemente el tratamiento (ImplementaSur, 2019). De alguna forma, falta I+D para generar herramientas que permitan de manera simple y costo efectiva mejorar la operación de los tratamientos biológicos.

Finalmente, de los biodigestores medianos o pequeños implementados en Chile, prácticamente ninguno cuenta con alguna herramienta o sistema de monitoreo (Guzmán, 2022), de acuerdo a entrevistas personales con representantes de estas organizaciones y empresas del rubro, todos trabajan sin información ni retroalimentación sobre cómo está realizando el tratamiento, entre ellos EcoTrent (HomeBiogasChile), Biodigestores Educativos (UC), BioTecSur, FAVET (U. Chile), INIA (Remehue), Robinson Díaz, San Clemente, Coltauco, Paine, etc. Esto aumenta el riesgo de falla o abandono del proyecto por falta de control (Ministerio de Energía Chile, FAO & Global Environment Facility, 2011). Así que un sistema apropiado permite ayudar al operador a tomar decisiones informadas, según el decreto 119 con el reglamento de seguridad de las plantas de biogás, se recomienda el uso de un dispositivo de medición y/o control (Ministerio de Energía Chile, 2017).

Los biodigestores requieren de un diseño y de una operación monitoreada, pues son tratamientos biológicos complejos que dependen de varios factores para mantener el estable y en equilibrio interno al consorcio de bacterias (Martí Herrero, 2019). Entre los factores de operación están la temperatura, el pH, la relación C/N, entre otros (Rivas-Solano, 2009; Ministerio de Energía Chile, FAO & Global Environment Facility, 2011). Existen investigaciones que utilizan sensores para monitorear los parámetros antes mencionados, sobre todo para medir biogas, pero no hay productos con el costo adecuado para un proyecto de pequeña escala (Montijo-Valenzuela, 2019). La falta de monitoreo ha detenido varios de los proyectos de biodigestión por una falta de operación adecuada, será necesario tener algún método de detección temprana y alerta ante cambios del medio en alguno de los parámetros (ImplementaSur, 2019).

Es decir, existen biodigestores que no están operativos porque no existen herramientas que permitan prever cambios repentinos en sus parámetros de operación (Aqualimpia Engineering e.K, 2013). Sobre todo, a escala doméstica pues no hay dispositivos orientados a esto (Montijo-Valenzuela, 2018). Esto impide convertir los residuos de manera correcta y por lo tanto no se generan bioinsumos de calidad (Ministerio de Energía Chile, FAO & Global Environment Facility, 2011). Finalmente, existe un gran problema económico para los pequeños agricultores y ganaderos pues los precios de los insumos tras la pandemia de COVID-19 y los conflictos bélicos mundiales han subido mucho, por ejemplo, el saco de urea ha tenido un aumento del 200% para finales del 2022 (Baffes & Koh, 2023). En este caso, se plantea la biodigestión no solo como un tratamiento in situ de gestión adecuada de residuos orgánicos, sino también la oportunidad de transformarlos en bioinsumos útiles para ser utilizados como fertilizante en la pequeña agricultura familiar campesina, según el programa Reciclo Orgánico en el marco del Acuerdo de Cooperación Ambiental de la alianza entre los gobiernos de Canadá y Chile, programa cuyo fin es disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector residuos, en particular el gas metano generado por la descomposición de los residuos orgánicos (MMA, 2020).

## Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema de micro biodigestión anaeróbica con monitoreo de parámetros fisicoquímicos (pH y temperatura) con capacidad de apoyar la operación del reactor mediante visualización de datos, para la producción de bioinsumo en contextos extremos.

Específicamente se busca:

1. Diseñar un sistema de micro biodigestión que sea modular, resistente y autónomo.
2. Diseñar un sistema de monitoreo que permita visualizar remotamente algunos parámetros fisicoquímicos para alertar sobre los rangos de funcionamiento y operación.
3. Implementar el sistema de micro biodigestión y de monitoreo en una localidad y comunidad representativa.
4. Caracterizar el bioinsumo generado, mediante análisis de laboratorio según indicadores de fertilizantes orgánicos (nutrientes, metales pesados y presencia de coliformes).
5. Analizar y evaluar la capacidad y funcionamiento del reactor con el sistema de monitoreo.

## Metodología

Este trabajo consiste en una prueba empírica de diseño y construcción de un piloto de producción de fertilizante bio basado a partir del tratamiento de estiércoles con restos de fruta y verdura, mediante un micro biodigestor doméstico con sistema de monitoreo, que permita apoyar la operación con alertas simples.

La manera de realizar esta prueba, fue definir parámetros de operación que deben ser medidos en el funcionamiento y definir parámetros de calidad para medir la composición del fertilizante.

Este trabajo fue realizado bajo el marco del proyecto Kuskalla desarrollado por la Consultora EBP y el centro C+, en colaboración y beneficio a la Asociación Agropecuaria Indígena, comunidad asentada en Mamiña. Esta comunidad está ubicada en la comuna de Pozo Almonte, ciudad de Iquique, región de Tarapacá. Es zona del norte de Chile que se caracteriza por ser ambiente extremo propio del desierto del país, con elevadas temperaturas de día y disruptivas oscilaciones térmicas en la noche. Además, la zona se encuentra a 3 mil metros de altura y tiene poco acceso al agua. Ahí vive esta comunidad de 10 integrantes de la asociación agropecuaria indígena que produce alimentos mediante agricultura y ganadería para auto abastecimiento y sustento económico.

En particular, este estudio abordó el diseño e implementación de un sistema de micro biodigestor de tipo pasivo, que solo utilizó energías naturales para su funcionamiento, como la gravedad para el flujo, un micro túnel (invernadero bajo) para aumentar y mantener el calor del biodigestor. El tamaño del tratamiento de biodigestión fue de 2,1 m<sup>3</sup> y lo constituyen 3 bolsas ensamblables de hdpe, fabricadas nacionalmente en Polytex.

El reactor fue tipo Taiwán, Tubular, Bolsa o Guatero, que actúa en base al flujo pistón, con una entrada y dos salidas, a la cual se incluyeron dos pequeñas entradas laterales para tener acceso a toma de muestra y para introducir las sondas del sistema de monitoreo.

Se desarrolló y utilizó un sistema de monitoreo de los parámetros pH y temperatura en el interior del reactor para fase líquida, con el fin de visibilizar ciertos parámetros de operación.

Se excluyó el monitoreo de parámetros gaseosos por la dificultad de encontrar sensores de bajo costo que no saturan con las concentraciones del biometano, por ello se centró el estudio en el bioinsumo líquido o biol, para medir ciertas propiedades de fertilizante. Lo anterior se sustenta en la necesidad actual del uso de fertilizantes alternativos por altos costos, regeneración de los suelos y la necesidad de información respecto a la calidad de los fertilizantes bio basados. Para ello se analizó la composición química y biológica del biol generado, incluyendo los análisis de ciertos patógenos, nutrientes y metales pesados. Se consideró al menos 5 tomas de muestra, donde se recolectó 1L de fertilizante líquido en cada ocasión, las cuales fueron transportadas al laboratorio para su posterior ensayo y análisis de resultados.

Considerando el alcance de esta investigación, el biol generado fue analizado y caracterizado parcialmente, se excluyó tanto el análisis del biogás, como el análisis de la aplicación del biol en el suelo, tampoco se analizó el análisis microbiológico del ecosistema interno del reactor; tomándose como campo de estudio solo la entrada de residuos, el monitoreo de pH y temperatura ( $T^{\circ}$ ), y un producto de salida del reactor, el digestato (biol).

Cada objetivo específico de esta investigación está asociado a una actividad específica, que se engloba en una de las 4 fases sobre las que se ordenó el estudio, cuyas etapas se muestran en la figura 1. A continuación, se describen las etapas y actividades asociadas en cada fase.

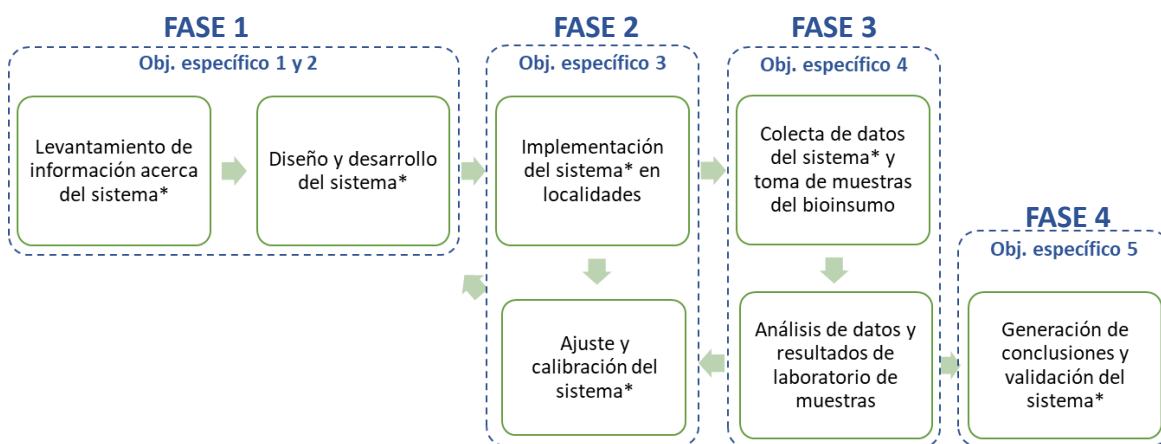


Figura 1. Etapas y actividades del proyecto. Elaboración propia

#### FASE 1:

1. Levantamiento de información acerca del sistema:
  - Lectura de artículos científicos sobre biodigestores domésticos, sistemas de monitoreo, aplicaciones de reactores en terreno.
  - Definición del estado del arte de reactores domésticos tipo bolsa y sistemas de monitoreo costo efectivos.
  - Identificación problema sistema de alerta temprana, IoT, parámetros monitoreo.
  - Identificar rangos de operación de los parámetros de monitoreo seleccionados.
  - Definición del alcance según referencias de estudios de aplicaciones de biodigestores.

2. Diseño y desarrollo del sistema de biodigestión:
  - Definición de modelo y tipo de reactores, materialidad, parámetros operación, sustratos a utilizar y volúmenes del micro biodigestor.
  - Definición de variables relevantes, sensores y microcontroladores a utilizar.
  - Generación de modelo tridimensional y planimetría del sistema de micro biodigestión.
  - Coordinación de la fabricación del micro biodigestor en producción nacional según capacidad de modularización, transporte, robustez y costos.
  - Compra de materiales y programación sistema alerta para el monitoreo según rangos de operación y sus parámetros.
  - Calibración sistema de monitoreo y revisar sistema de micro biodigestión.
  
- a. Diseño Sistema de micro biodigestión
  - Definición de Tipo de reactor: tratamiento biológico anaeróbico
  - Definición de Modelo: Flujo pistón de tipo bolsa
  - Definición de tipo y cantidad de Carga: alimentación semi continua
  - Cálculos del Balance energético: funcionamiento por rebalse, aislación térmica y calefacción por mini invernadero, alimentación con agua tibia
  - Cálculo del espacio requerido: 6m<sup>2</sup>
  - Definición de Elementos del micro biodigestor: Alimentador, Reactor, Línea de gas, Bolsa acumulación biol, Bolsa acumulación biogás, Micro túnel o mini invernadero
  - Generación de un esquema tridimensional como representación del sistema.
  - Identificación de los Sustratos para utilizar como aliento y carga de reactor.
  - Coordinación y fabricación de las piezas con Polytex: ISO 9001, ISO CASCO 5,
  - Definición de Materialidad: Geomembrana flexible, 1500 micras, contra UV, 20 años de duración, reparable
  - Definición de las Características necesarias, tales como Modularización, ensamblable, Transportable y Robustes.
  - Estimación de Costos y ejecución del presupuesto
  
- b. Diseño Sistema de Monitoreo
  - Identificación de los Parámetros y rangos operación basado en literatura
  - Identificación de Variables relevantes que afecten el sistema
  - Elaboración de Matriz de decisiones basada en los parámetros de operación
  - Identificación y definición de tipos de Sensores a utilizar
  - Identificación y definición de Microcontroladores
  - Definición, desarrollo y validación de modo de Envío de datos
  - Definición, desarrollo y validación de formato de Visualización de datos
  - Definición y cálculo de Autosustento energético para sistema de monitoreo basado en energía solar y baterías de almacenamiento

## **FASE 2:**

3. Implementación del sistema en localidad:
  - Coordinación con comunidades ubicadas en terreno.
  - Definición de plan de trabajo y actividades en terreno.
  - Generación protocolo de implementación con herramientas, pasos a seguir, plazos y capacitaciones necesarias según plan de trabajo.
  - Visitas a terreno, ensamble y activación del sistema de micro biodigestión y del sistema de monitoreo con datos conectados a internet.
  - Ajustes del sistema, pruebas, calibración y reparación del sistema en terreno.
  
4. Ajustes del sistema en localidad:
  - Visitas a terreno, ensamble y activación del sistema de micro biodigestión y del sistema de monitoreo con datos conectados a internet.
  - Ajustes del sistema, pruebas, calibración y reparación del sistema en terreno.
  - Documentación de puntos de mejora u oportunidades de desarrollo.
  - Solución de contingencias varias para dar continuidad al proyecto.
  - Generación de propuestas de retroalimentación.

## **FASE 3:**

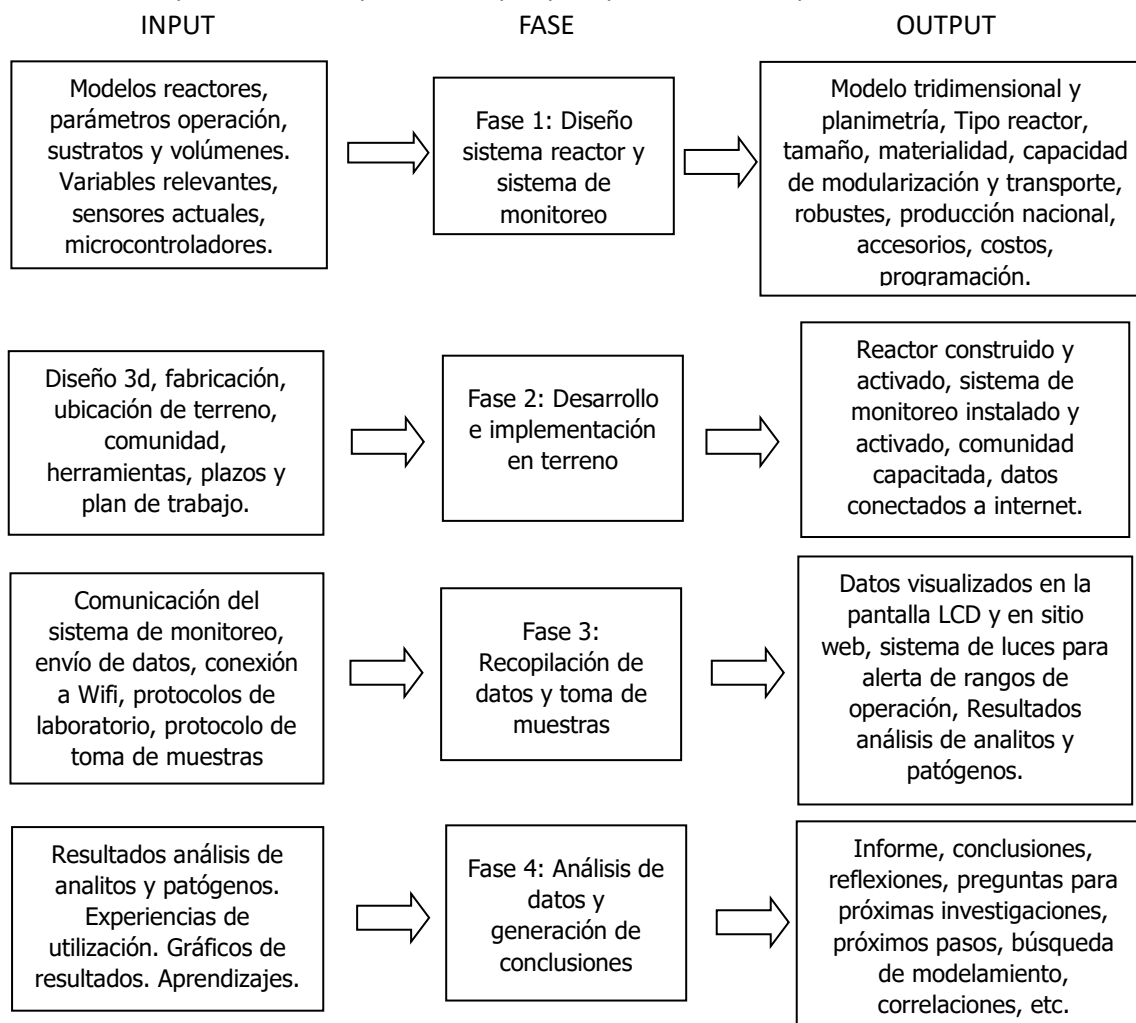
5. Colecta de datos del sistema\* y toma de muestras del bioinsumo:
  - Comunicación del sistema de monitoreo, envío de datos, conexión a Wifi.
  - Revisión estabilidad de datos del sistema de monitoreo remoto subidos a internet.
  - Visitas para recolección de datos guardados en las tarjetas SD.
  - Visitas para la toma de muestras de biol generado y posterior análisis en laboratorio mediante espectrofotómetro para medición de analitos. Además del número más probable de patógenos, coliformes fecales
  - Revisión de la pantalla visualización en terreno y de la plataforma en formato de sitio web.
  
6. Análisis de resultados de laboratorio:
  - Identificación y generación protocolos de toma de muestra y análisis de laboratorio del biol.
  - Coordinación de la toma de muestras y entrega en laboratorio.
  - Ensayos de NMP para medir coliformes fecales y un análisis en espectrofotómetro para medir composición nutricional y presencia de ciertos metales pesados.
  - Análisis de datos y resultados de laboratorio de muestras.
  - Comparación con normativas de uso de digestato o fertilizante bio basado

## **FASE 4:**

7. Generación de conclusiones y validación del sistema:
  - Análisis y procesamiento de datos recolectados mediante métodos biológicos con toma de muestras y análisis de laboratorio, y mediante métodos estadísticos con datos del sistema de monitoreo.

- Revisión de hallazgos dada la experiencia de implementación, operación y monitoreo de los sistemas de micro biodigestión.
- Identificación de los próximos pasos y evidencias de futuras mejoras por realizar.
- Análisis de los resultados generales y reflexiones de la investigación.
- Generación de recomendaciones y conclusiones finales.
- Muestra de datos visualizados en la pantalla LCD y en sitio web.
- Funcionamiento sistema de luces para alerta de rangos de operación.
- Resultados análisis de analitos y patógenos.
- Validación del desempeño del sistema mediante indicadores:
  - a. Generación de bioinsumos
    - Cantidad de bioinsumos producidos.
    - Calidad de los bioinsumos generados en términos de contenido de nutrientes y ausencia de contaminantes.
  - b. Funcionamiento del sistema de monitoreo y alerta temprana
    - Tiempo de respuesta del sistema de alerta ante posibles problemas o anomalías en el biodigestor.
    - Precisión de los datos recopilados por el sistema de monitoreo en relación con los parámetros clave del biodigestor (temperatura, pH, etc.).

A continuación, se presenta un esquema de input y output de insumos para cada fase:



# 1. Revisión bibliográfica

A partir de la literatura revisada se recogen aspectos importantes sobre la biodigestión y temáticas relacionadas a su funcionamiento. A continuación, se detalla qué es la biodigestión anaerobia, como son las características de los biodigestores o reactores anaeróbicos, las etapas del proceso de la biodigestión, la operación, monitoreo y control de procesos, los indicadores del proceso y los productos o bioinsumos generados.

## 1.1. Biodigestión anaerobia

En este subcapítulo se muestra información específica sobre la biodigestión, desde su definición y características básicas, su historia y uso en la actualidad, hasta el impacto ambiental que tiene este tratamiento versus otras alternativas.

### 1.1.1. Definición y caracterización básica

La biodigestión anaerobia es un proceso biológico que descompone residuos orgánicos de manera controlada y genera biogás, biol y biosol (Acosta & Abreu, 2015). Este tratamiento funciona por la simbiosis de un consorcio de bacterias y arqueas anaeróbicas capaces de consumir la materia orgánica y transformarla en productos valiosos, como energía y fertilizante (Campos et al., 2004). Este proceso se realiza en un contenedor cerrado herméticamente que proporciona las condiciones ideales para la reproducción de bacterias anaerobias, la nomenclatura utilizada para referirse al contenedor, suele ser reactor o biodigestor (Schnürer & Jarvis, 2018). Según las bases microbiológicas del proceso anaerobio, este involucra un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie paralelo y degradan la materia orgánica en cuatro etapas sucesivas, categorizadas como hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Rivas et al., 2010). Durante el proceso, la materia orgánica de los residuos es consumida y reducida por las bacterias, transformando la mezcla original en un líquido concentrado de nutrientes llamado digestato, biol o fertilizante, y un biogás que se compone en su mayoría de metano, una fracción menor de dióxido de carbono y trazas de otros gases, y dado su alto porcentaje de metano tiene un alto poder calorífico (MinEnergía, 2011). El biodigestor es un sistema cerrado que consta de un reactor, con una entrada para la materia orgánica y el agua, una salida para el biogás y otra para el digestato, este proceso se puede ver en la representación de la figura 2 (MinEnergía, 2011).

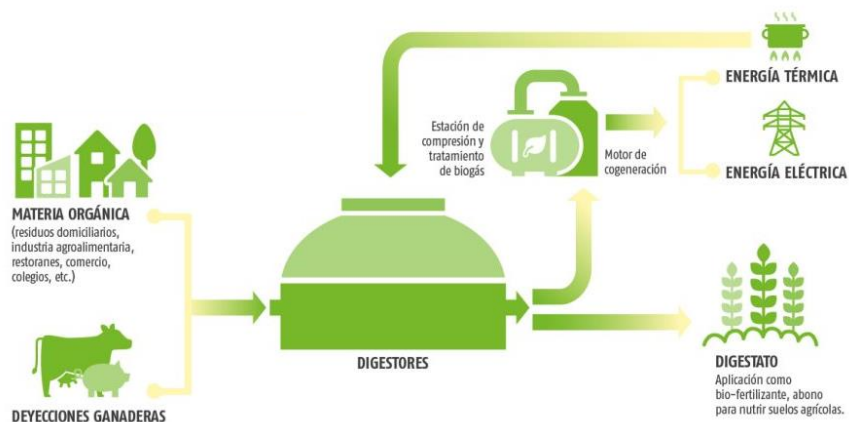


Figura 2. Esquema de flujos del proceso de la biodigestión anaeróbica (Rivera-Cruz, 2023).

### 1.1.2. Historia de la Biodigestión

Entre sus hitos históricos, la primera anotación científica sobre el biogás se atribuye a Jan Baptista Van Helmont en la primera mitad del siglo XIX (Toruño Sotelo et al., 2017). Adicionalmente, el origen y uso prolongado de la biodigestión se remontan a China en el siglo XX (Esquivel-Segura et al., 2016), donde se practicó la valorización de residuos domésticos en zonas rurales como respuesta a distintas crisis económicas que las comunidades enfrentaron (Bond & Templeton, 2011). En este contexto, los biodigestores tipo domo fijo o chino, cuyas principales características se aprecian en la figura 3, tuvieron un gran éxito de uso (Bond & Templeton, 2011). De hecho, se utilizaron sobre 7 millones de reactores de biogás con un diseño de cemento y enterrado bajo tierra, cuyos tamaños variaban entre 1 m<sup>3</sup> y 20 m<sup>3</sup>, aproximadamente (Ruchen, 1981). Posteriormente, su uso se expandió a otros continentes, como India y Europa, donde se utilizaron diferentes diseños para crear un reactor (Reyes, 2018).

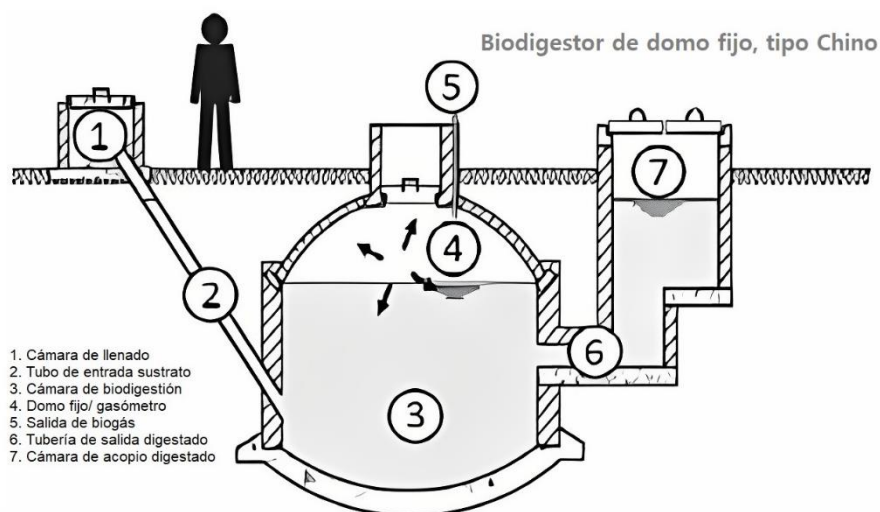


Figura 3. Esquema componentes biodigestor tipo chino (MinEnergía, 2011).

Aun cuando la tecnología existe hace años, la biodigestión llegó a Chile aproximadamente el año 2007 y su entrada al país fue gracias al auspicio de la Cooperación Internacional de Alemania (GIZ)<sup>1</sup> para difundir la técnica a gran escala en otros continentes (Chamy & Vivanco, 2007). En el 2012, el Ministerio de Energía (MinEnergía) comenzó un programa llamado 'Biogás Sector Lechero', el cual generó variadas oportunidades de aprendizaje en el rubro, mediante talleres, cursos, seminarios, foros, la Guía Didáctica Registros Plantas de Biogás en Chile (MinEnergía, 2016), y la guía Biogás en el Sector Lechero en Chile (MinEnergía, 2017). Además, esta serie de actividades gatillaron la creación del Manual de Biogás y campañas educativas 'la energía de los desechos', apoyado por la Organización de las Naciones Unidas con El Proyecto GEF "Modelos de Negocios Sostenibles para la Producción de Biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos (MinEnergía, 2011).

<sup>1</sup> GIZ, por sus siglas en Alemán "Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit" es una empresa de la República Federal de Alemania que se dedica a la cooperación internacional a nivel mundial y trabaja en colaboración con Chile, abordando tres ejes centrales: Economía y Empleo, Medio Ambiente y Cambio Climático, y Estado y Democracia.

En el año 2017 entró en vigor el Decreto N°119 del MinEnergía, que indica que los propietarios u operadores, según corresponda, sólo podrán encomendar el diseño de proyectos, la construcción, modificación y reparación de plantas de biogás a instaladores de gas autorizados por la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) (MinEnergía, 2017). Junto a la consultora EBP, en septiembre se realizó el primer curso en Santiago con 34 matriculas, luego se realizó el segundo Curso de formación especializada en biogás a instaladores de gas case 4 autorizados por la SEC, en Talca, Región del Maule, organizado por el MinEnergía bajo el contexto de la reciente publicación del Reglamento de Seguridad en Plantas de Biogás. En dicha ocasión se capacitó un total de 24 profesionales. En total, a la fecha existen cerca de 58 profesionales habilitado para certificar todas las plantas de biogás del país (MinEnergía, 2017).

### 1.1.3. La biodigestión en la actualidad

Actualmente, la biodigestión tiene presencia global, a diferentes escalas. Existen organizaciones mundiales orientadas a fomentar su uso, como la Asociación Mundial de Biogás (WBA por sus siglas en ingles World Biogas Association), la Asociación de Biorecursos y Digestión Anaeróbica de Inglaterra (ADBA por sus siglas en ingles Anaerobic Digestion and Bioresources Association) y la Red de Biodigestión de Latinoamérica y el Caribe (RedBioLAC), entre otros. Alemania ha sido líder en la implementación a gran escala de plantas de biogás, convirtiéndose en un referente en este sector entre los países de Europa y el mundo, ya que cuentan con más de 9700 plantas de biogás operativas (Martínez-Hernández et al., 2021). China y el Sudeste de Asia cuentan con millones de biodigestores de pequeña escala (Jain, 2020). El factor común de todos estos biodigestores es la solución al tratamiento de residuos orgánicos, además de mitigar los gases de efecto invernadero en el planeta (Pascual et al., 2011).

En Chile, en 2017, el MinEnergía realizó un catastro de proyectos de biogás, se levantó información sobre más de 100 proyectos de biodigestión, de los que el 60 % está operativo; un tercio de ellos corresponde a proyectos de autoconsumo de energía y el resto a proyectos de quema de biogás en antorcha (Martí Herrero et al., 2017). De tal forma, se cuenta con el registro de plantas de biogás certificadas de la SEC a la fecha.

### 1.1.4. Impacto ambiental

La biodigestión es un tratamiento que utiliza como insumo la biomasa, esta se entiende como toda la materia orgánica generada por la naturaleza, que es susceptible de utilizarse como fuente de energía (Gutiérrez-Saavedra, 2007). Del mismo modo, se le llama biomasa a la energía renovable producida a partir de materia orgánica (MinEnergía, 2011). La biomasa se clasifica, según su origen en tres tipos: natural, producida y residual (de-Lucas et al., 2012). En consecuencia, la biomasa natural es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana; la producida en cultivos energéticos, o sea, campos donde se produce una especie con la única finalidad de su aprovechamiento energético, como el maíz; y la biomasa residual corresponde a residuos orgánicos de actividades humanas (RSU) (de-Lucas et al., 2012). La biodigestión utiliza la biomasa de origen residual como materia prima, que puede provenir de los desechos de las industrias forestales, agrícolas y ganaderas, y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (de-Lucas et al., 2012), aprovechando un residuo que actualmente tiene impactos ambientales negativos por su modelo de tratamiento (Pérez, 2016).

Los tratamientos energéticos de los tipos más comunes de biomasa reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 55% y un 98%, esto se debe a la mitigación de huella de carbono que se produce al evitar la extracción, traslados y GEI generados en comparación con los combustibles fósiles (Cerdá, 2012). Para el año 2016, ya se producían 60,8 billones de metros cúbicos de biogás mundialmente, el 54% de ellos se genera en Europa y se aprovecha en forma de energía renovable o bioenergía (WBA, 2018). El uso de biodigestores no solo beneficia la producción de energías renovables, sino que, además, se produce biol, llamado también digestato o fertilizante orgánico. El biol se caracteriza por sus propiedades para remediar y fertilizar los suelos con la aplicación de este, logrando un gran potencial dentro del enfoque de la economía circular, al reincorporar residuos orgánicos en forma de materia prima a lugares descentralizados (Jurgutis et al., 2021).

En temáticas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), el Sector Residuos comprende principalmente las emisiones de cuatro grandes áreas, la primera es la disposición de los residuos sólidos; la segunda es el tratamiento biológico de los residuos sólidos; la tercera es a incineración de los residuos; y la cuarta es el tratamiento y descarga de las aguas residuales (IPCC, 2006). Según el Sistema Nacional de Inventarios de GEI de Chile (SNICHILE), el Sector Residuos, contribuye en un 6% los GEI a nivel nacional (MMA, 2020). La normativa chilena a través del Decreto 148: Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos (Ministerio de Salud, 2003), establece lo siguiente en su artículo 3:

Residuo o desecho: sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar.

Tratamiento: todo proceso destinado a cambiar las características físicas y/ o químicas de los residuos peligrosos, con el objetivo de neutralizarlos, recuperar energía o materiales o eliminar o disminuir su peligrosidad.

Del mismo modo, el Decreto Supremo N°189: Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios (Ministerio de Salud & Subsecretaría de salud pública, 2005), se refiere en su artículo 4 a residuos sólidos y domiciliarios como:

Residuo sólido, basura, desecho o desperdicio: sustancias, elementos u objetos cuyo generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar. Residuos sólidos domiciliarios: residuos sólidos, basuras, desechos o desperdicios generados en viviendas y en establecimientos tales como edificios habitacionales, locales comerciales, locales de expendio de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales y cárceles.

Actualmente en Chile, la gestión de residuos consiste en la recolección y posterior disposición o eliminación en vertederos, rellenos sanitarios y/o estaciones de transferencia, tratamientos que no ofrecen una solución completa, pues generan gases de efecto invernadero y otros contaminantes (Hoffmann, 2016). Según el informe de Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO), en Chile se valoriza cerca del 1% de los residuos orgánicos, el 99% restante es llevado a eliminación (MMA, 2021). Según un estudio de Huella de carbono de los tratamientos de gestión de residuos municipales, el tratamiento de residuos orgánicos en vertederos es la alternativa que más CO<sub>2</sub> eq. genera y, por lo tanto, produce la huella de carbono más alta (Pérez et. al, 2016). En la figura 4 se puede ver la comparación de la huella de carbono asociado a los tratamientos de orgánicos mediante compostaje, biodigestión, plantas de valorización, de clasificación y recuperación de materiales, entiéndase el total de los Gases por la suma de CO<sub>2</sub> eq. Este es medido en Gases de Efecto Invernaderos directos (d-GEI), indirectos (i-GEI) y los evitados (e-GEI) gracias a la generación de

nuevos productos, visto para cada uno de los tratamientos para residuos orgánicos (Pérez et. al, 2016). También se puede apreciar en la figura 4 que la producción de biometano es la alternativa de menor impacto ambiental.

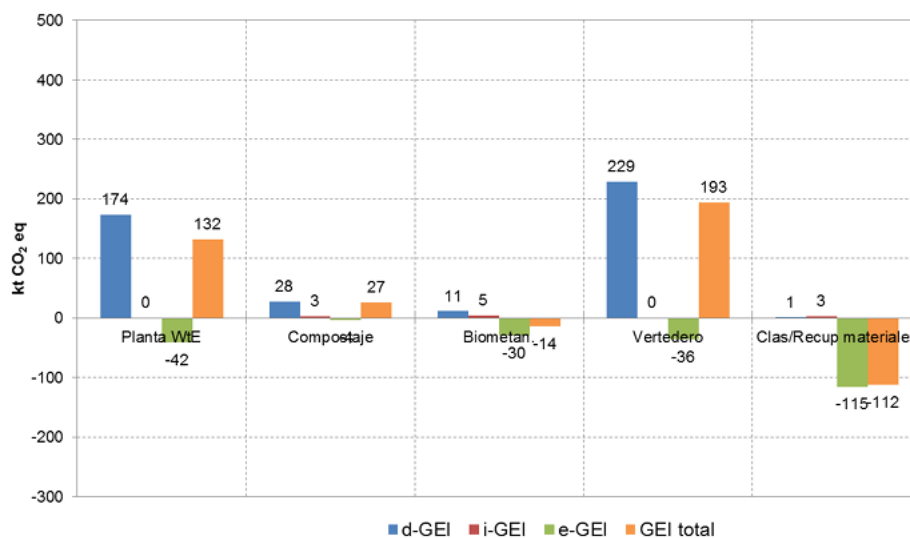


Figura 4. Emisiones de GEI según tratamiento de residuo orgánico (Pérez et. al, 2016).

## 1.2. Biodigestores o Reactores anaerobios

Este subcapítulo muestra información sobre los reactores anaeróbicos para llevar a cabo una correcta biodigestión, entre las temáticas a revisar están las características generales de este contenedor o reactor, los tipos y diseños de reactores, las escalas de producción y los aspectos regulatorios de su aplicación en Chile.

### 1.2.1. Características generales

El contenedor donde se realiza la biodigestión debe ser hermético para impedir que entre oxígeno y/o que se escape el biogás producido (MinEnergía, 2011). Para mantener las condiciones ideales ante el consorcio de bacterias, el biodigestor debe contemplar algún tipo de aislación térmica para evitar cambios bruscos de temperatura (RedBioLAC, 2022). Por asunto de seguridad un biodigestor debe contar con válvula de alivio de presión y arresta llamas (MinEnergía, 2011). El biodigestor debe contar con una entrada y salida de medios, debe tener acceso para el mantenimiento periódico sin intervención del medio y, por último, este puede contar con algún sistema de agitación para evitar encostramiento (Varnero Moreno, 2011). Los reactores, pueden incorporar complementos que agilizan el proceso de biodigestión, entre ellos están los agitadores, los calefactores, los recirculadores, etc. (Varnero Moreno, 2011).

### 1.2.2. Tipos y diseños de reactores

Existen diversas clasificaciones de reactores anaeróbicos según su uso, tal como se muestra en la figura 5 (Varnero Moreno, 2011). En base al proceso de alimentación y tiempo de retención, la biodigestión se divide en tres tipos: Tratamiento Continuo, con alimentación ininterrumpida y por lo tanto generación ininterrumpida de biol y biogás; tratamiento semi continuo, con una primera carga que consta de una gran cantidad de sustrato que reposa hasta su degradación parcial y una posterior carga; por último, tratamiento discontinuo o batch, donde se cargan las materias primas en una sola

carga o lote, luego de su fermentación total se vacían por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación (Campos et al., 2004).

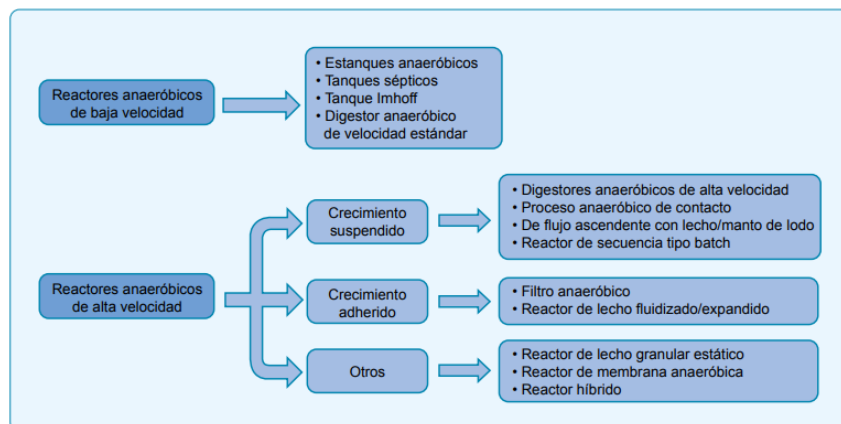


Figura 5. Clasificación de reactores anaeróbicos, según el Manual de Biogás (Varnero Moreno, 2011).

Además, se puede clasificar el tratamiento según el diseño y funcionamiento del reactor, cada uno de diferentes materialidades y usabilidades (van Haandel et al., 2006). Entre ellos está el reactor de mezcla completa o CSTR, reactor de laguna cubierta, reactor de flujo pistón o tubular, reactor de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente o UASB, reactor de lecho expandido con gránulos o EGSB, tanques sépticos, domo fijo, domo flotante, tal como se puede ver en la tabla 1 (van Haandel et al., 2006). Uno de los modelos más antiguos es el reactor de domo fijo, que usualmente van enterrados en el suelo, ampliamente utilizado en China (Hedrick et al., 1991).

Nombre	Materialidades	Escala	Usabilidad	Imagen referencial
Reactor de mezcla completa o CSTR	Concreto, acero, geomembrana PVC	Industrial	Laboratorio	
Reactor de Laguna Cubierta	Geomembrana HDPE y Caucho	Industrial	Rural	
Reactor de Flujo Pistón o Tubular	Geomembranas PVC, HDPE, LDPE	Doméstica	Rural	
Reactor de manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente o UASB	Acero	Industrial	Laboratorio	



Reactor de Lecho expandido con gránulos o EGSB	Acero	Industrial	Laboratorio	
Tanques sépticos	Plástico rígido	Doméstica	Rural	
Domo fijo	Concreto, acero	Doméstica	Rural	
Domo flotante	Concreto, acero	Doméstica	Rural	

Tabla 1. Comparación reactores según materialidades y usabilidad (van Haandel et al., 2006).  
Elaboración propia.

### 1.2.3. Escalas de producción

Además de clasificar los biodigestores por diseño, usabilidad y frecuencia de alimentación, existe otra clasificación de los reactores que tiene relación con su tamaño y capacidad de producción de biogás. Según el Decreto 119 sobre el Reglamento de Seguridad de Las Plantas de Biogás e Instaladores de Gas, los tratamientos de biodigestión se clasifican en tamaño según la producción y suministro de biogás (MinEnergía, 2017), tal como se muestra en la tabla 2.

Tamaño planta biogás	Alcance / Escala	Producción y suministro de biogás con potencia nominal
Instalaciones pequeñas	Proyectos domiciliarios o rurales	Menor o igual a 180 kW.
Instalaciones medianas	Proyectos medianos	Mayor a 180 kW y menor o igual a 900 kW.
Instalaciones grandes	Proyectos industriales	Mayor a 900 kW.

Tabla 2. Clasificación plantas de biogás (MinEnergía, 2017). Elaboración propia.




Dentro de la pequeña escala existe una subcategoría cuyo límite no tiene una definición teórica. La gran mayoría de éstos no se mide en potencia nominal, pues no generan suficiente gas para convertirlo en electricidad, aun cuando tienen grandes beneficios con el uso directo (Aguilar & Botero, 2006a). Éstos se pueden catalogar según el tamaño del biodigestor y su aplicación, según se muestra en la tabla 3.

Subcategoría	Volumen Reactor / Capacidad
Reactores domésticos	120 m <sup>3</sup> a 5 m <sup>3</sup>
Micro reactores	5 m <sup>3</sup> a 1 m <sup>3</sup> aproximadamente
Reactores de laboratorio o nano reactores	menores a 1 m <sup>3</sup>

Tabla 3. Clasificación de reactores pequeños (Jekayinfa, 2014; Parra-Orobio et al., 2021).  
Elaboración propia.

Específicamente, los micro biodigestores han demostrado ser prácticos y productivos a la vez, pueden ser utilizados como reactores domésticos dado que pueden tratar residuos orgánicos originados en los domicilios con una capacidad limitada. En los micro reactores o domésticos, el reactor más utilizado es el tubular de geomembrana flexible o de mezcla completa en un contenedor rígido (Pineda-Martínez, 2011).

Comercialmente, existen diversas empresas alrededor del mundo que ofrecen estos productos, tal como Puxin, Homebiogas, TurtleBiogas y más, según se muestra en la tabla 4. Estos proveedores de reactores domésticos también incluyen accesorios para optimizar el proceso o para facilitar el uso de los bioinsumos generados. Entre los accesorios se encuentran, Deshidratadores de gas, Desulfurizador de gas, Calefactor a gas, Cocinilla a gas, Estufa a gas, Lámpara a gas, Calderas de agua, Generadores a gas y Refrigeradores. Considerando una búsqueda de accesorios ofrecidos por proveedores internacionales realizada, se identifica que no hay variedad de dispositivos tecnológicos para el monitoreo de biodigestores domésticos disponibles en el mercado.

Proveedores	Imagen referencial
PUXIN	
HOME BIOGAS	
TURTLE BIOGAS	

MYGUG	
TEENWIN	

Tabla 4. Empresas y sus biodigestores domésticos. Elaboración propia.

#### 1.2.4. Aspectos regulatorios

Para que una planta de biogás pueda operar, incluidos los biodigestores de pequeña escala, debe cumplir con el reglamento de seguridad y debe certificarse la planta con un experto especialista clase 4 de gas ante la SEC dependiendo del tamaño del biodigestor, según el Decreto 119, sobre el Reglamento de Seguridad de Las Plantas de Biogás e Instaladores de Gas (MinEnergía, 2017).

### 1.3. Etapas del proceso de la biodigestión

En este subcapítulo se muestra información específica sobre los procesos asociados a la biodigestión, incluyendo aspectos generales, etapas y procesos, tales como el pretratamiento del sustrato, el tratamiento en el reactor y los postratamientos de los productos generados.

#### 1.3.1. Procesos de la biodigestión anaeróbica

En esta sección se detallan los diferentes procesos involucrados al proceso de biodigestión, siendo estos tratamientos previos y posteriores al tratamiento propio de la biodigestión, para optimizar el proceso. Entre ellos está el pretratamiento, el tratamiento y los postratamientos.

##### 1.3.1.1. Pretratamiento (homogenización y eculización)

Un pretratamiento es un proceso previo realizado al sustrato y mezcla de alimento antes de cargar el biodigestor para adaptar la materia prima a las condiciones que requiere la biodigestión (Rivas et al., 2010). Para asegurar un buen rendimiento dentro del reactor es importante conocer las características del sustrato que entrará a este y, si no hay rango, hay que modificar algunas vías como pretratamiento térmico, adición de enzimas, ozonización, solubilización química por acidificación o hidrólisis alcalina, desintegración mecánica y uso de ultrasonidos de baja frecuencia (Campos et al., 2004). Además, conocer las características es importante para tener una correcta homogenización y eculización para regular ciertos parámetros de operación como el pH, la relación carbono/nitrógeno y la cantidad de sólidos totales y volátiles del sustrato (Rivas Solano et al., 2010).

##### 1.3.1.2. Tratamiento (proceso biológico)

Según el Reglamento de biogás, contenido en el Decreto N°119, se establece que la biodigestión anaeróbica es un proceso que ocurre dentro del reactor o contenedor, generado por el consumo de

materia orgánica por parte de los consorcios de bacterias para su crecimiento y reproducción, este tratamiento es un proceso biológico complejo que involucra diversas etapas, generadas por diferentes grupos de bacterias, que ocurren simultánea y sucesivamente (Ministerio de Energía, 2016). Las etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas en cuatro macroprocesos que son la Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis, según se muestra en la figura 6 (Davila-Vazquez & Razo-Flores, 2007), estas etapas se describen con detalle en la tabla 5.

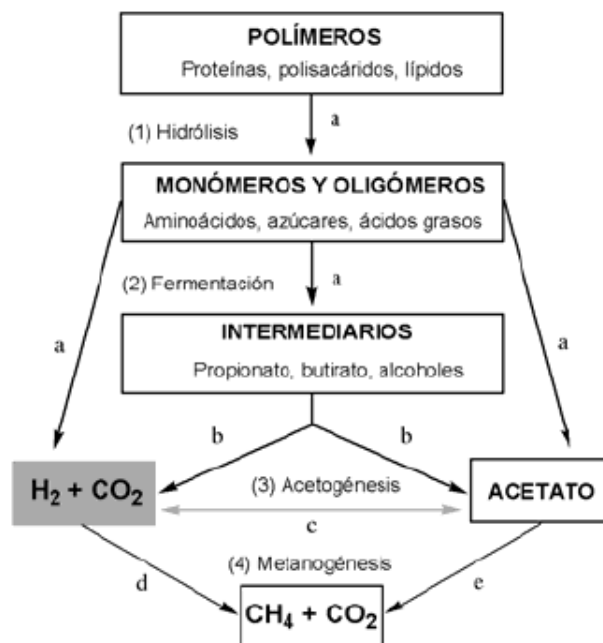


Figura 6. Etapas de la biodigestión anaeróbica (Davila-Vazquez & Razo-Flores, 2007).

Nombre Etapa	Descripción
Hidrólisis o Licuefacción	Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.
Acidogénesis o Fermentación	Los compuestos orgánicos solubles de los productos de la hidrólisis se convierten en ácidos orgánicos como acético, propiónico y butírico.
Acetogénesis	Se le conoce también como acidogénesis intermedia en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO <sub>2</sub> .
Metanogénesis	En esta etapa metabólica el CH <sub>4</sub> es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> , pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol. El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible.

Tabla 5. Etapas de la Biodigestión (Acosta & Abreu, 2015). Elaboración propia.

### 1.3.1.3. Postratamiento (estabilización digestato)

El post tratamiento es el proceso que se realiza a los bioinsumos generados por el biodigestor, tales como el biogás y el digestato, para estabilizar y/o purificar dichos productos. Esto se realiza para estandarizar las características de los productos y, posteriormente, poder utilizarlos. Para ello se

espera que estos productos cumplan la Norma Chilena 3375:2015 sobre digestatos, que depende del objetivo del proyecto y de la calidad de los productos generados. (MMA, 2021).

Para el digestato, uno de los posts tratamientos más utilizados para su estabilización y valorización es el método térmico. De acuerdo con la normativa chilena de digestato, este debe alcanzar temperaturas de 70°C por al menos una hora para eliminar cualquier patógeno y asegurar la higienización. Se entiende que un digestato está totalmente estable cuando ya no genera metano, tiene un aroma neutro, tiene una concentración regulada de metales pesados y tiene una concentración de ácidos orgánicos < 4 000 mg/L (INN, 2015).

Para el biogás, existen otros tratamientos asociados a la limpieza y purificación de este, entendiendo que el biogás es una composición de diferentes gases, donde el más relevante es el metano gracias a su alto poder calorífico y uso como bio combustible (Ministerio Energía, 2016).

Si el biogás producido por el biodigestor es de mala calidad o composición debido a una operación inadecuada, esto quiere decir con una proporción de metano menor al 50% y con altas trazas de gases contaminantes, el decreto 119 indica que se debe quemar directamente en antorchas, para evitar su liberación al medio ambiente en formato de metano, y neutralizarla transformándolo en CO<sub>2</sub> (Ministerio Energía, 2016).

## 1.4. Operación, monitoreo y control de procesos

En este subcapítulo se muestra la relevancia de la operación, los sistemas de monitoreo y acciones de control sobre el proceso de biodigestión, es particular se detalla sobre los parámetros del sustrato, los parámetros de diseño y operación del reactor, los parámetros de monitoreo y control, y sobre el uso de tecnología y sensorización como herramienta para asegurar el proceso.

### 1.4.1. Parámetros según el sustrato

El sustrato debe cumplir ciertos parámetros para asegurar un buen funcionamiento del biodigestor, entre ellos destacan la relación carbono nitrógeno, los sólidos totales y volátiles.

#### 1.4.1.1. Relación carbono/nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno (C/N) es una razón que se define por la cantidad de carbono molecular por cada nitrógeno molecular de algún medio, en el caso de la biodigestión, el medio acuoso del reactor es la mezcla con una proporción de agua y otra de sustrato, cuyo medio tiene la relación C/N de los mismo residuos o sustratos utilizados para alimentar y cargar el reactor (Varnero-Moreno, 2011). Según la Guía de Diseño y Manual de Instalación de Biodigestores Tubulares, es fundamental conocer la relación C/N del residuo para definir la carga (ORL) y el tiempo de retención (HRT), para su correcto funcionamiento (Martí, 2019).

Para la biodigestión, la relación C/N adecuada es entre 20:1 y 30:1, esto quiere decir que se permite entre 20 y 30 unidades de carbono por cada 1 unidad de nitrógeno (Alcayaga et al., 1999). Este parámetro influye en la producción de biogás y en el rendimiento de las bacterias, además, esta relación permite el equilibrio entre la materia orgánica disponible para alimento y crecimiento directo para las bacterias, para obtener energía, y permite las condiciones ideales que debe tener el entorno del medio con las bacterias, para reproducirse y crecer en población (Varnero-Moreno, 2011).

#### 1.4.1.2. Sólidos totales y volátiles (ST y SV)

Los sustratos están compuestos por una fracción sólida y otra de agua, los sólidos totales (ST) son la cantidad de materia seca del sustrato, sin agua, y los sólidos volátiles (SV) son la cantidad de materia orgánica contenida en esa fracción sólida. Lo anterior permite utilizar los ST y SV como indicador de alimento disponible para los microorganismos (Varnero-Moreno, 2011).

Según el Manual de Biogás del Ministerio de Energía, conocer el porcentaje de ST en la mezcla de la carga es un indicador relevante para asegurar que el proceso funcione correctamente. Para biodigestores semicontinuos, se ha demostrado que no debe tener más de un 8% a 12 % de ST y para biodigestores discontinuos, debe tener entre un 40 a 60% de ST (MinEnergía, 2011).

Basado en diferentes porcentajes de ST y SV, se recomiendan diferentes tipos de biodigestores pues cumplen una función específica en el consumo de la materia orgánica (Martí-Herrero et al., 2017). Además, según la tabla 6 del Manual de Biogás de Chile, se define una clasificación de sustrato por su cantidad de materia orgánica, solo los con mayor porcentaje de sólidos se miden el ST y SV, los que son sustratos líquidos se miden la Demanda Química de Oxígeno (Esguerra, 1989).

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST 40-70 % Fracción Orgánica
		Estiércol Sólido	
		Restos de Cosecha	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS
		Aguas residuales de mataderos	
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l DQO
		Aguas Negras	4-500 g/l DQO

Tabla 6. Clasificación de sustratos para la Biodigestión (Esguerra, 1989).

#### 1.4.2. Parámetros de diseño y operación

En este subcapítulo se muestran los parámetros clave de diseño y operación, que son la velocidad de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica. El primero hace referencia a la frecuencia y cantidad de materia orgánica presente en el sustrato que será utilizado para alimentar el reactor, y el segundo hace referencia a la duración del proceso que recorre el sustrato desde que entra al reactor hasta que sale en formato de bioinsumo.

##### 1.4.2.1. Velocidad de Carga Orgánica (Organic Loading Rate: OLR)

Este parámetro se define utilizando los datos de Sólidos Totales y Volátiles del sustrato o de la Demanda Química de Oxígeno, sirve para operar en los rangos adecuados de materia orgánica, según la cantidad de biomasa –o microorganismos- del medio (Millán Cossío, 2018).

El rango de carga orgánica tiene un rango entre 1 y 5 kg-ST m<sup>3</sup>/día, eso quiere decir que, por cada metro cúbico de mezcla de carga, hay entre 1 y 5 kilogramos de materia orgánica disponible para

alimentar a la biomasa de microorganismos y es la dosis diaria que pueden recibir, además, la carga depende de la temperatura de trabajo, para condiciones mesofílicas se recomienda una tasa de carga de SV de 1.6 – 4.8 kg/m<sup>3</sup> al día (Varnero-Moreno, 2011).

Según se detalló en la sección de relación C/N, la materia orgánica tiene dos objetivos, por un lado, el crecimiento de cada bacteria y, por otro lado, la reproducción de esta, es decir, su crecimiento en población. Este último, el crecimiento microbiano, ocurre principalmente durante períodos sin carga orgánica, lo que explica que se reproduzcan para asegurar la sobrevivencia del consorcio (Nagao et al., 2012). Otro comportamiento ocurre cuando aumenta la carga orgánica, generando un aumento de los sólidos totales suspendidos saturados (Nagao et al., 2012).

Según un estudio cinético del proceso de digestión anaerobia, utilizando concentraciones de sustrato en la alimentación de 4,5 g DQO alcanzaron porcentajes de eliminación de Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre el 50 y el 90%, para velocidades de carga orgánica variables entre 0,46 y 2,25 g DQO/l día (Borja et al., 1998). Según indicaron los resultados de un estudio sobre el tratamiento anaeróbico de alta velocidad del digestato, es posible reducir el contenido de la demanda química total de oxígeno del digestato entre un 57% y un 62% (Ülgüdür et al., 2019).

#### 1.4.2.2. Tiempo de Retención Hidráulica (Hydraulic Retention Time: HRT)

El tiempo de retención hidráulica o HRT por sus siglas en inglés, representa el tiempo promedio que las células y los sustratos permanecen dentro del reactor, además, está definido como la relación entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación (Bolzonella, 2019).

Basado en diferentes estudios, se han encontrado valores óptimos de tiempo de retención hidráulica (TRH) y caudal (Q) para datos utilizados en las simulaciones numéricas realizadas en un biodigestor de agitación continua. Además, este depende de otros factores como la temperatura del proceso, para climas tropicales; se recomienda un TRH de 30 – 40 días para climas cálidos con inviernos cortos; entre 40 – 60 días para climas cálidos con inviernos fríos cortos; y entre 60 – 90 días para climas templados con inviernos fríos (Varnero, 1991).

Basado en un estudio comparativo de Velocidad de carga (OLR) y Tiempo de retención (HRT) en diferentes reactores y sustratos, se generó la tabla 7 donde se muestra un tipo reactor para cada tipo de sustrato utilizado (Sherieff et al., 2016).

S.NO	REACTOR	SUBSTRATE/WASTE	OLR	HRT	pH
1.	CSTR	Seafood waste water	---*	20 days	7.26
2.	UASB	Canning industry effluents	between 9.8 and 10.95 kg COD m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	10 h	5.5
3.	Fed Batch Laboratory scale reactor	Vegetable waste	2.25 g/l.d.	30 days	5.75

Tabla 7. Diferentes sustratos según su OLR, HRY y pH, en diferentes reactores (Sherieff et al., 2016).

### 1.4.3. Parámetros de monitoreo y control

En este subcapítulo se muestran diversos parámetros de control que sirven para caracterizar el rendimiento de este tratamiento, como lo son la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, el potencial redox, los AGV, la alcalinidad, DQO y DBO5 (Rivas Solano et al., 2010). Existe relación directa entre varios de los parámetros, por ejemplo, si los AGV suben, de inmediato el pH baja junto a la enzima glucosidasas (Campaña et al., 2015). A continuación, se detallan algunos parámetros y sus efectos.

#### 1.4.3.1. Temperatura

Uno de los factores principales de la biodigestión es la temperatura, teniendo que adaptarse el diseño de biodigestores para climas fríos (Poggio et al., 2009). Las bacterias trabajan en diferentes rangos de temperatura, psicrófilico, mesófilico y termófilico, los cuales se describen en la tabla 8.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo
Psicrófilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C
Mesófilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C
Termófilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C

Tabla 8. Rangos de temperatura de los tipos de fermentación anaeróbica (Lagrange, 1979).

La temperatura está directamente relacionada con las condiciones que requieren los microorganismos para crecer y reproducirse, hay un límite a la temperatura de cada rango de temperatura, tras el límite la población de microorganismos comienza a decrecer, descritos en la figura 7 (Rivas Solano et al., 2010).

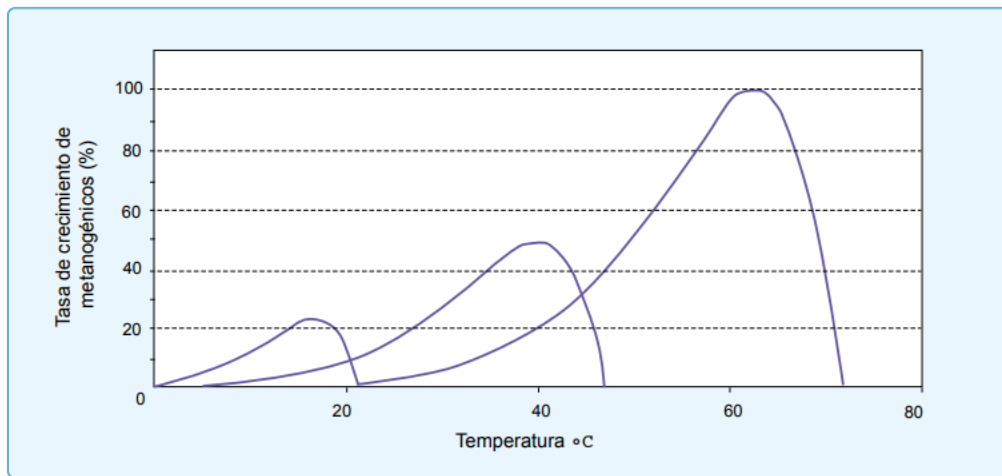


Figura 7. Tasa de crecimiento relativo de microorganismos según rangos de temperatura Psicrófilico, Mesófilico y Termófilico (Speece, 1996).

La temperatura incide directamente en todas las etapas de la biodigestión, pero principalmente en la hidrólisis para acelerar el proceso que es el paso limitante de la velocidad en el proceso de la Digestión Anaeróbica (DA), dado que afecta directamente la microbiología en el tratamiento de las aguas residuales domésticas (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991).

Según estudios de cinética y la microbiología de la Digestión Anaeróbica, se recomienda mantener la temperatura diaria con variaciones menores a 1°C, para un óptimo proceso de biogás en condiciones termófilas, y variaciones entre 2-3°C para procesos mesófilos (Gerardi, 2003). Para la puesta en marcha de una planta de biogás, se debe usar un inóculo que sea ya adaptado a la futura temperatura de funcionamiento, para reducir el tiempo de adaptación, y con ello disminuir la duración de la puesta en marcha y activación del sistema (Gerardi, 2003).

#### 1.4.3.2. Potencial de hidrógeno (pH) y alcalinidad

Del mismo modo, el pH es uno de los indicadores que más aporta información del proceso interno sobre todo en la fase final metanogénica, donde las mejores producciones de metano son con rango de pH entre 6,5 y 7,7 unidades (Varnero-Moreno, 2011). Además, en la fase hidrolítica cuando hay concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) que oscilan entre 3 y 30 g DQO/L, los valores de pH fijos están entre 5 y 7 (Veeken et al., 2000).

Para generar condiciones operacionales favorables, se debe conocer el pH y características del inóculo, del sustrato y del proceso biológico (Dinamarca et al., 2003). Según diversos estudios se confirma la importancia de controlar la digestión anaerobia, no sólo con el pH, sino también con la alcalinidad en sus diferentes formas, para identificar ocurrencia de condiciones de capacidad buffer y neutralización de la acidez, que ocurre debido a desequilibrios en el proceso (Pérez & Torres, 2008).

Según estudios realizados sobre la Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bio-residuos de origen municipal, los resultados de sus ensayos de Potencial de Biometano realizado en laboratorio muestran que el pH neutro fue el de mayor producción de metano y que los pH cercanos a 6,6 y 8,0 unidades fueron más favorables que los de 5,5 y 6,0 unidades. Por otra parte, indican que aun cuando se incrementó el pH y la Alcalinidad Total, no aumentó la Alcalinidad Bicarbonática de manera proporcional, lo que está asociado a la producción y a la acumulación de los AGV, que consumen alcalinidad bicarbonática y pueden llegar a causar acidificación, lo que conlleva a una inhibición de los consorcios microbianos (Alexis Parra-Orobio et al., 2014).

Durante la DA, hay ciertos factores que pueden afectar el pH en una reacción, como por ejemplo el ácido carbónico y los ácidos volátiles, generalmente, los rangos de pH de las bacterias están entre 6.0 y 7.5. Además, en ese rango que genera una capacidad buffer, que depende del medio gaseoso y su relación carbónico/alcalinidad, el cual, en equilibrio con la disociación de ácido carbónico en el medio líquido, tiende a regular la concentración de ion hidrógeno (Universidad de Murcia, 1988).

#### 1.4.3.3. Ácidos Grasos Volátiles (Volatile fatty acids: VFA)

Los Ácidos Grasos Volátiles o VFA por su sigla en inglés, es el producto de la tercera etapa de la biodigestión y son el alimento de la última etapa, la metanización, es decir las bacterias metanogénicas se alimentan de los VFA siempre y cuando estén en la concentración adecuada (Varneros, 2011).

Entre los VFA más comunes en la biodigestión están el ácido acético, propiónico y butírico, que son los intermediarios esenciales de la fermentación anaeróbica, además estos pueden convertirse en los alcoholes para utilizarse como materia prima en la producción de especias, medicinas, aditivos y productos químicos similares (Yi-Xuan Fan et. al, 2021).

Los ácidos grasos volátiles son un parámetro clave para monitorear el rendimiento óptimo de la DA y maximizar la producción de biogás. Se requieren técnicas de monitoreo más oportunas a medida que se investiguen cada vez más nuevos enfoques para la DA (Mauky et al., 2017).

Según un estudio sobre la Digestión anaeróbica de residuos alimentarios para la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) con diferentes tipos de inóculo: efecto del pH, indican que se puede obtener una alta producción de AGV y una mayor actividad microbiana durante la digestión anaeróbica a pH 6,0 (K. Wang et al., 2014).

Además, la producción se acelera usando lodos activados anaeróbicos para inocular, en particular utilizaron una concentración de 51,3 g-DQO/L y obtuvieron un rendimiento de eliminación de VSS de 918 mg/g. Los ácidos acético y butírico fueron los componentes dominantes de los AGV. Adicionalmente indican que, durante la digestión anaeróbica, los carbohidratos se degradaron rápidamente en 4 días y la liberación de  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  permaneció estable después de 4 días (K. Wang et al., 2014).

En un estudio sobre la relación entre pH, Potencial de Oxidación Reducción (ORP) y la producción de biogás en digestor anaeróbico en condiciones mesófilo, se determina que la tasa de carga orgánica adecuada fue del 5% TS para la codigestión de residuos de alimentos y lixiviados en un digestor anaeróbico de tornillo en condiciones de temperatura mesófila. La producción de AGV y la tasa de producción de biogás no mostraron una relación directa entre el ORP y el pH en el reactor. Los resultados de este estudio indicaron que el ORP y el pH óptimos durante la fase de acidogénesis fueron  $-284 \pm 32,71$  mV y  $5,76 \pm 0,24$ , respectivamente. El ORP y el pH óptimos durante la fase de metanogénesis fueron  $-335,63 \pm 28,97$  mV y  $7,49 \pm 0,24$ , respectivamente. Finalmente se indica que el control del ORP y el pH son factores altamente influyentes la producción de biogás en procesos anaeróbicos (Vongvichiankul et al., 2017).

#### 1.4.3.4. Potencial de Oxido-Reducción (Redox)

Una reacción de oxidación–reducción, o reacción redox, es una reacción en la que hay una transferencia de electrones entre especies químicas (los átomos, los iones o las moléculas que intervienen en la reacción), durante una reacción redox, algunas especies sufren oxidación, o la pérdida de electrones, mientras que otras sufren reducción, o ganan electrones (Barke et al., 2009).

Este parámetro permite identificar cambios de etapas en el proceso biológico, según estudios de Simulación de laboratorio de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos, la fase acidogénica se distinguió de la fase metanogénica debido a los cambios de pH y potencial redox en el lixiviado, junto con el aumento en la producción de biogás y la composición de este. Asimismo, el cambio del potencial redox de positivo a negativo se considera el comienzo de la fase metanogénica (Stanislaw-edakowicz, 2004).

Según estudios del efecto Redox, la tecnología hierro valencia cero puede aliviar la caída del pH, estabilizar el ORP a un nivel anaeróbico y promover la disolución de compuestos orgánicos insolubles. En este sentido, podría estimular la actividad enzimática funcional y la abundancia de bacterias de hidrólisis. Además, la adición de óxido férrico podría aumentar el ORP, estimulando el enriquecimiento de bacterias de hidrólisis como *Pseudomonas* (Q. Wang et al., 2020).

#### 1.4.3.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es un parámetro, que se obtiene mediante un ensayo químico de laboratorio que permite determinar la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra líquida, bajo condiciones específicas de un agente oxidante, en una temperatura y tiempo determinado. Este es un parámetro que se utiliza para medir el grado de carga orgánica o “contaminación” y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O<sub>2</sub>/l) (Conde et al., 1978).

En la biodigestión es utilizado por una parte para medir la cantidad de materia orgánica y con ello la Velocidad de Carga Orgánica que tendrá el sistema, por otro lado, es utilizado como indicador de eficiencia del proceso de la biodigestión. En el caso del estudio sobre Producción de fertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo, demuestran una disminución del DQO en 47.03%, comparando ensayos realizados antes y después del proceso. Los resultados indican que la disminución es generada por la actividad microbiana y las condiciones del entorno anaerobio, que permiten la degradación, reduciendo así su actividad metabólica y con ello el consumo de oxígeno (Soria-Fregoso, et al., 2001).

Existen diversos métodos para realizar el ensayo, entre ellos el más utilizado es el a base de ácido peracético. Según estudios sobre las Implicaciones del uso del análisis de DQO en el tratamiento de aguas residuales a base de ácido peracético, se identificó la influencia del ácido peroxiacético residual (PAA) en la medición de la demanda química de oxígeno (DQO), reconociendo una pequeña variación en los resultados de ese método, proponiendo así usar su estudio como una guía práctica para la medición correcta de DQO en el tratamiento basado en PAA (de Souza-Leite et al., 2021).

#### 1.4.3.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Similar al DQO, la DBO es un parámetro que se obtiene mediante un ensayo bioquímico de laboratorio que dura 5 días, que mide la cantidad de dióxido consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida durante el tiempo. Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias anaeróbicas, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra y al igual que le DQO, también se utiliza para medir el grado de contaminación o carga orgánica tiene la muestra. El DQO se utiliza como indicador para medir la eficiencia del proceso, realizando una medición antes y después de la biodigestión (Conde et al., 1978).

#### 1.4.3.7. VFA/TA o FOS/TAC (ácidos grasos volátiles/capacidad de compensación alcalina)

El Centro Federal Alemán de Investigación Agrícola (FAL) desarrolló la relación FOS/TAC para establecer un valor guía que permita evaluar los procesos de fermentación en la biodigestión a través de la concentración de los ácidos orgánicos volátiles y la concentración del dióxido de carbono en el biogás, donde los rangos de operación son propios de cada planta a causa de la diferencia de sustratos (Veluchamy, 2019).

El método FOS/TAC tiene la ventaja de que puede determinar la estabilidad del proceso de degradación anaeróbica de forma temprana, fácil y continua. El resultado es un valor único que depende de la relación de dos parámetros, que son el contenido de ácidos orgánicos volátiles (FOS) y la capacidad tampón de alcalina (TAC). (Rosato, 2015).

Según un estudio sobre la optimización del rendimiento del proceso y producción de biogás de la digestión anaeróbica de flujo pistón mesófilo de ensilaje de maíz, a pesar de que para medir los parámetros del método FOS/TAC se requieren equipamientos de laboratorio de alta precisión y de alto costo, el uso de este método permitió medir la influencia del aumento de la tasa de carga orgánica (OLR) en la producción de biogás y otros parámetros importantes durante la digestión anaeróbica (Veluchamy, 2019).

Según un estudio sobre la importancia del método VFA/TA (FOS/TAC), si la relación FOS/TAC cae en el rango de valores entre 0,23 y 0,3, el proceso de digestión anaeróbica es estable. Con una razón inferior a 0,23 la planta empieza a “sentir hambre” y requiere el aumento de la ración de materia prima a digerir, mientras que un valor superior a 0,3 indicaría el inicio de indigestión. En particular, se muestra el resultado de un ensayo, cuya la relación FOS/TAC varió entre 0,14 y 0,2, indicando que el proceso tiene una alimentación de baja biomasa (Rosato, 2015).

Basado en un estudio sobre indicadores de rendimiento en la biodigestión, la prueba de FOS/TAC es capaz de detectar los ácidos grasos volátiles totales como unidades de ácido acético, pero no distingue entre los diferentes tipos de AGV, por lo tanto, es un buen indicador de la salud del sistema bacteriano aun cuando funciona bien mientras el sistema esté sano. “Gestionar una planta de biogás significa convertirse en un “cultivador de bacterias”. De la misma manera que el ganado requiere regular inspección veterinaria y seguimiento de la calidad del forraje, además un digestor anaeróbico requiere una dieta saludable y equilibrada (Lili, 2011).

#### 1.4.3.8. Coliformes fecales, patógeno biológico

Los coliformes fecales se definen como el grupo de organismos coliformes que pueden fermentar la azúcar lactosa a 44-45°C, incluyen bacterias del género *Escherichia*, entre otros (Cohen, 1973). Este patógeno se genera en el intestino de animales de sangre saliente y frecuentemente su origen es fecal, organismos que dan positivo en este método de prueba pueden provenir de aguas enriquecidas, efluentes industriales y materia vegetal y suelo en descomposición (Parra-Huertas, 2015). La mayoría de las bacterias coliformes no son dañinas, aun cuando, una persona expuesta a estas bacterias se puede enfermar y tener malestar estomacal, vómitos, fiebre o diarrea, especialmente los menores de edad al contraer estas bacterias (Cohen, 1973).

La digestión anaeróbica es un método de bajo costo para reducir los patógenos en los desechos. Diversos estudios demuestran que los niveles de patógenos decrecen en las granjas tras instalar diferentes diseños de digestores usando como indicador la presencia de coliformes fecales (Parra-Huertas, 2015). Se determina que con diferentes diseños de digestores se obtienen distintos niveles de éxito y basado en el estudio sobre la DA de lodos de depuración para la reducción de microorganismos patógenos, se comparan los resultados utilizando un reactor de domo fijo, tambor flotante y globo flexible, y el diseño de domo fijo logró las mayores reducciones en organismos (coliformes, *Escherichia coli* y enterococos) desde la materia prima hasta el digestato, con niveles significativamente bajos ( $p < 0,05$ ). Se señala en el trabajo que también afecta el mayor tiempo de retención hidráulica (Nakamya, et al. 2020).

La cantidad de coliformes fecales se utiliza como un indicador de rendimiento del proceso de biodigestión mediante la medición de los niveles de microorganismos antes y después del proceso, evaluando la capacidad de reducción de patógenos en plantas de biogás, cuyo digestato debe tener

menos de 1000 unidades de NMP por gramo de sólido total de muestra, basado en el ensayo biológico del Número Más Probable (Watcharasukarn, 2009).

Según un estudio sobre la Eliminación de organismos indicadores fecales y parásitos (coliformes fecales y huevos de helmintos) de lodos biológicos municipales mediante digestión anaeróbica mesófila y termófila, los resultados muestran que, en ambas etapas, el digestor anaeróbico termófilo presenta mayor eficiencia en la eliminación de patógenos y parásitos, que el digestor mesófilo. Los resultados muestran que la digestión anaeróbica termófila de lodos biológicos puede considerarse una tecnología adecuada para producir biosólidos Clase A, para su uso posterior en agricultura sin restricciones (Rojas-Oropeza, 2001).

La digestión termófila anaeróbica está cerca de cumplir con los límites de biosólidos tipo “Clase A”, referidos al número de huevos de helmintos parásitos (0.25 HELarval/gTS), y al indicador de patógeno coliformes fecales (<1000 MPN/gTS) (EPA, 1996). En la tabla 9 se muestran los niveles de patógenos aceptados en digestatos según la normativa de Digestato de Chile.

Tipo de microorganismo	Límite máximo
<i>E. coli</i>	< 1 000 NMP por g de digestato, en base seca
<i>Salmonella sp</i>	< 3 NMP en 4 g de digestato, en base seca
Huevos de helminto	< 1 en 4 g de digestato en base seca
NMP = Número Más Probable.	

Tabla 9. Requisitos sanitarios para digestato (MMA, 2015).

Existen un post tratamiento llamado La Letrina de Pasteurización por Digestión Anaeróbica (ADPL), este proceso es un sistema de saneamiento de digestato en origen, autónomo y de energía neutra que utiliza la digestión anaeróbica de lodos fecales para generar biogás y luego utiliza el biogás para pasteurizar el efluente del digestor a 65–75°C para producir un sistema seguro, según pide la norma Chilena y Europea de Digestatos. Permitiendo que el efluente se reutilice localmente como bioinsumo y fertilizante biobasado (Forbis-Stokes, 2016).

Cuando el tratamiento no logra remover el porcentaje total de coliformes, se realizar un post tratamiento térmico al digestato para eliminar el exceso de patógenos, según indica el estudio sobre el Rendimiento del sistema de pretratamiento térmico y fermentación mesófila sobre la inactivación de patógenos y la producción de biogás de lodos fecales: resultados iniciales de laboratorio, donde El pretratamiento térmico es altamente eficiente para inactivar patógenos; la inactivación completa de patógenos (es decir, coliformes fecales, salmonella spp., estreptococos fecales) de 60, 60, 80, 80, 100, 100 y 100 minutos para las concentraciones de lodo fecal TS. del 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% y 12%, respectivamente (Fubin-Yin, 2016).

#### 1.4.4. Tecnología y sensorización

En esta sección se muestran diversos estudios relacionados al uso de tecnología, sensores y modelos matemáticos para el monitoreo y control de los biodigestores.

##### 1.4.4.1. Estudios sobre uso de sensores y monitoreo

La biodigestión es un proceso biológico complejo que, por su naturaleza y formato de desarrollo, debe ser monitoreado y controlado de manera constante, se debe medir tanto el medio acuoso como el gaseoso, pues ambos entregan datos relevantes sobre el proceso (MinEnergía, 2021). En la escala industrial, se utilizan sistemas robustos de monitoreo y control, en particular se usa el software SCADA, el cual es el acrónimo de “Supervisory Control and Data Acquisition” (supervisión, control y adquisición de datos), término que describe las funciones básicas del sistema. Las empresas usan los sistemas SCADA para controlar los equipos de sus centros y recopilar y registrar datos de sus operaciones (Gospodinov, 2014). Además, se han realizado estudios para lograr la Automatización de la Producción de una Planta de Biogás con su Diseño SCADA (Veloz, 2015).

Los sensores electroquímicos microbianos se identifican como una alternativa viable a los métodos de medición actuales, ya que son simples, de bajo costo y precisos. Con base en la experiencia actual de los sensores electroquímicos, aún no se domina su aplicación y deberán ser comparables a los métodos actuales para operar durante períodos prolongados pese a las complejas mezclas de sustratos en el entorno real del biodigestor anaeróbico. Se espera que a medida que los sensores electroquímicos microbianos evolucionen junto a la ciencia, superen estos desafíos y permitan proporcionar los métodos de medición de AGV robustos, en línea y de bajo costo que exige la industria de la digestión anaeróbica (Hill et al., 2020).

Los análisis microbiológicos más fundamentales se pueden utilizar, junto con herramientas tradicionales de monitoreo de reactores, como mediciones de eficiencia de eliminación de CH<sub>4</sub>, AGV y DQO, para proporcionar información completa con respecto al desempeño general de las instalaciones de tratamiento, permitiendo así el vínculo entre el microorganismo y el reactor. Estos análisis detallados de los consorcios metanogénicos tendrán implicaciones prácticas directas para la DA de las aguas residuales domésticas en el futuro, por ejemplo, al informar a los operadores de los reactores sobre las condiciones óptimas de nutrientes, sobre el efecto de las temperaturas fluctuantes, etc., necesarios para el funcionamiento óptimo del reactor (Montañez-Hernandez et al., 2017).

Un sistema de monitoreo proporciona una importante supervisión y funciones de planificación que aseguren un funcionamiento continuo y eficiente funcionamiento de la planta. Se han realizado pruebas con sistemas de monitoreo en base a Arduino y sensores MQ para medir la producción de metano, obteniendo buenos resultados. El sensor MQ4 es más sensible a las bajas concentraciones de oxígeno, llega a un punto de saturación, pues se mantiene sin bajar la tensión eléctrica durante mucho tiempo, lo que indica que esta característica no permitirá medir concentraciones de al menos el 50 % de metano en un ambiente saturado de biogás (Velázquez-López et al., 2017). Asimismo, la presencia de oxígeno requerida por los sensores electroquímicos, indica un riesgo para la explosión del gas metano según sus concentraciones, tal como se muestra en la tabla 10 (Crowcon, 2017).

Gas	Rango de medición
Metano (CH <sub>4</sub> )	0 - 100 LEL (Límite inferior de explosividad)
Metano (CH <sub>4</sub> )	5 - 100 % Volumen
Monóxido de carbono (CO)	0 - 500 ppm
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0 - 25 % Volumen

Tabla 10. Gases y rango de mediciones ofrecida por el sensor (Crowcon, 2017).

Según estudios sobre la integración de redes de sensores y actuadores y el sistema SCADA para promover la migración del sistema de fabricación flexible heredado hacia el concepto de Industria 4.0, se ha logrado desarrollar un sistema de medida basado en microcontrolador Arduino dedicado a la detección de biogás y ha sido presentado con un conjunto de sensores se encargan de medir cuatro gases, hidrógeno, metano, amoníaco y carbono monóxido (González & Calderón, 2018). Estos estudios han continuado permitiendo la Integración de plataforma Arduino hardware open source en sistemas de automatización aplicados a Smart Grids/Micro-Grids (González & Calderón, 2019).

Basado en un estudio sobre la Evaluación de métodos de sensores de software y espectroscopia de infrarrojo cercano para la determinación de la alcalinidad total en digestores anaeróbicos, se determinó que el sensor de software predijo de manera confiable la alcalinidad en la segunda etapa del digestor anaeróbico. Sin embargo, presentó una mala influencia entre la alcalinidad observada y pronosticada en el digestor, probablemente por la falta de limpieza y calibración mensual de las sondas para garantizar una predicción precisa (Ward & Rao Ravella, 2008). El experimento demostró que la digestión anaeróbica se puede monitorear de manera eficiente y económica, y que un sistema como este sería sencillo de instalar en una planta de biogás a gran escala existente (Ward & Rao Ravella, 2008).

El sistema de control de supervisión basado en reglas produjo una tasa de carga orgánica razonablemente estable y enfatizó la importancia de la ponderación correcta de los diversos parámetros de control. Un sistema de control de este tipo permitiría una alimentación óptima de los digestores anaeróbicos, manteniendo así la estabilidad y optimizando la producción (Ward & Rao Ravella, 2008).

## 1.4.5. Indicadores del proceso

### 1.4.5.1. Inhibidores

Existen diversos tipos de inhibidores que afectan el rendimiento de la biodigestión. Según la concentración y presencia de estos. Según estudios límite de producción de biogás, cuando en el medio del reactor existe una cantidad apreciable de sulfatos, se desarrollan con intensidad las bacterias formadoras desulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) comúnmente llamadas sulfobacterias. La presencia de éstas juega un papel importantísimo en el proceso ya que, si la concentración de sulfuros solubles en el digestor excede los 160 mg/l, las bacterias metanógenas se inhiben (Acosta & Abreu, 2015).

Según el origen del sustrato, los desechos pueden contener sustancias inhibidoras o incluso tóxicas para el consorcio de bacterias, como cierta concentración de amoníaco, sulfuro, metales pesados y

de algunos compuestos orgánicos (Chen et al., 2008). Otro inhibidor del proceso se puede medir con el pH, dado que representa determinadas sustancias orgánicas como ácidos grasos de cadena larga y alcoholes que, en elevadas concentraciones, inhibe el proceso de las bacterias, al igual que la presencia de desinfectantes y antibióticos (Varnero-Moreno, 2011).

La inestabilidad del proceso debido al amoníaco a menudo da como resultado la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), lo que nuevamente conduce a una disminución del pH y, por lo tanto, una disminución de la concentración de amoníaco libre. La interacción entre el amoníaco libre, los AGV y el pH puede provocar a un "estado estacionario inhibido", una condición en la que el proceso se ejecuta de manera estable, pero con un menor rendimiento de metano (Chen et al., 2008).

La inhibición por amoníaco dependería del pH, siempre y cuando la concentración de amoníaco libre estuviera por debajo de este nivel, o la del amonio por debajo de 3000 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / L. El límite establecido por Hill para el correcto funcionamiento de un digester anaerobio de 800 mg Ac/L. (Hill et al., 1987), coincide con una concentración de amonio de 2400 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> / L (de Lleida, n.d.) En la figura 8 se puede apreciar la relación entre el pH y la temperatura con el efecto de disociación en H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub> en el medio según sus concentraciones, se espera que dentro del rango de pH 7 y 8, el sistema se mantenga estable, fuera de este rango puede inhibirse (Ahring, 2003).

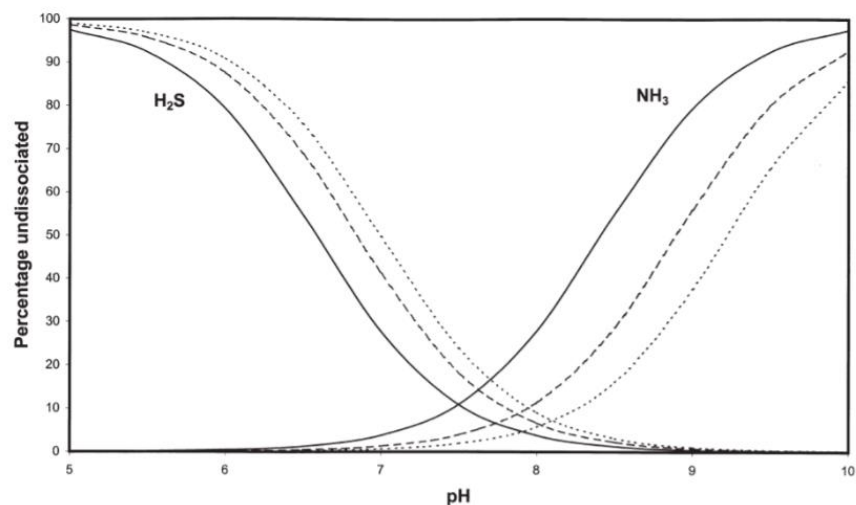


Figura 8. Efecto de pH y temperatura en la disociación de H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub> (B. K. Ahring, 2003).

#### 1.4.5.2. Eficacia

Existen diversos tipos de indicador de éxito de un sistema de biodigestión, entre ellos la producción de biogás, la estabilidad del proceso y la calidad del fertilizante líquido producido. En esta ocasión se consideró la calidad del fertilizante, utilizando la normativa de digestato como modelo referencial. Particularmente se busca disminuir la presencia de patógenos, comprobar la presencia de nutrientes y metales pesados. También se utiliza la remoción de DQO o materia orgánica para ver el desempeño del proceso, sin embargo, dado el enfoque de producción de fertilizante, solo se toma en cuenta la calidad y composición nutricional del digestato.

### 1.4.6. Bioinsumos de la biodigestión

Los bioinsumos son los productos generados tras el proceso de la biodigestión, entre ellos está el Biogas y el Digestato. A continuación, se detalla tanto su definición, características, nivel de producción y aplicación de los bioinsumos.

#### 1.4.6.1. Biogás

El término biogás se usa para referirse a un gas producido por la descomposición biológica de los compuestos orgánicos materia en ausencia de oxígeno. Este se conoce como gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos orgánicos mediante bacterias anaeróbicas, que se puede utilizar como bio combustible dado su alto poder calorífico, en cual se puede revisar en la tabla 11, donde se compara con el poder calorífico de otros combustibles (Varnero-Moreno, 2011).

Valores	Biogás*	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrog.
Valor Calorífico (Kwh/ m <sup>3</sup> )	7.0	10	26	10	3
Densidad (t/m <sup>3</sup> )	1.08	0.7	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Limite de explosión (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

Tabla 11. Cuadro comparativo entre diferentes fuentes de energía (Varnero-Moreno, 2011).

El biogás se compone aproximadamente por una mezcla de metano (CH<sub>4</sub>) en una proporción que oscila entre un 40% a un 70% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre 15 y 30%, conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y amoníaco (NH<sub>3</sub>) (Kougias & Angelidaki, 2018).

Este biogás se puede utilizar a través de antorchas, cocinillas a gas, calefactor a gas, estufa a gas, lámpara a gas, calderas de agua, generadores a gas y refrigeradores. Sin embargo, debe realizarse una limpieza previa, definida en el apartado de Post Tratamiento, para eliminar el exceso de humedad, de dióxido de carbono y/o de ácido sulfhídrico del biogás, para obtener BioMetano, que corresponde a un nivel de metano de más de 90% de la mezcla, basado el estudio sobre Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores (Cepero et al., 2012).

Aunque los biodigestores producen energía, no es el único factor relevante para medir el nivel de inversión y retorno económico de la tecnología. Según el nivel socio económico del país este tratamiento adquiere mayor inversión y por ende mayor escala, sin embargo, esto no justifica que sea la única forma de invertir en ellos, pues existe un mercado para los biodigestores pequeños y medianos (Aguilar & Botero, 2006b).

#### 1.4.6.2. Digestato: Biol y biosol

Otro subproducto del tratamiento de biodigestión anaerobia es el digestato, que se compone por una fracción sólida llamada biosol y una fracción líquida, llamada biol (Bongiovanni et al., 2018). Estos presentan un alto valor nutricional, por lo que puede ser utilizado como fertilizante,

promoviendo la recirculación de nutrientes y considerando la posibilidad de reemplazar parcial o totalmente el uso de fertilizantes sintéticos, disminuyendo su uso y evitando así problemas de contaminación por concentración (Bongiovanni et al., 2018). Basado en diferentes estudios, la composición de estos subproductos varía, dependiendo de la composición del sustrato utilizado y del rendimiento del proceso, tal como se puede apreciar en la tabla 12 sobre un estudio sobre el Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol (Orrego-Trujillo et al., 2019).

<b>Variación de N P K en el Biol</b>			
<b>DIAS</b>	<b>N mg/L</b>	<b>P mg/L</b>	<b>K mg/L</b>
<b>0</b>	13700	556.72	2504.8
<b>15</b>	500	157.6	259.1
<b>30</b>	2100	202.8	741.8
<b>45</b>	10200	86.56	1103.8

Tabla 12. Concentración de mg/L de nitrógeno, Fósforo y Potasio en un biol (Orrego-Trujillo et al., 2019).

Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos (MinEnergía, 2011). Como regla general, se asume que un 10 % de la materia orgánica removida (DQO) durante el proceso anaeróbico se utiliza para la síntesis de biomasa. Esto puede utilizarse para calcular los requerimientos de nitrógeno y fósforo (MinEnergía, 2011).

Según la Normativa de Digestato de Chile, para utilizar éste bioinsumo como bio fertilizante, este debe cumplir ciertos estándares de patógenos y presencia de metales pesados, representados en la tabla 13 sobre las Concentraciones máximas de metales pesados en digestato y la tabla 9 sobre los Requisitos sanitarios para digestato (MMA, 2015).

Metal pesado	Concentración máxima (base seca) <sup>1)</sup>
	mg/kg
Arsénico	55
Cadmio	15
Cobre <sup>2)</sup>	667
Cromo	167
Mercurio	3
Níquel	133
Plomo	367
Zinc <sup>2)</sup>	1 333

1) Concentraciones expresadas como contenidos totales.

2) Para cobre (Cu) y zinc (Zn), se aceptará una concentración máxima de 800 mg/kg y 2 000 mg/kg respectivamente, previa aprobación de la Autoridad Competente [8]. En este caso se deben considerar los fundamentos para el cálculo de las concentraciones máximas de metales, proporcionados en Anexo B.

Tabla 13. Concentraciones máximas de metales pesados en digestato (Varnero-Moreno, 2011).

Basado en un estudio sobre el Uso de digestato como fertilizante derivado de la generación de biogás, se determina que el uso de digestato como fertilizante no modificó significativamente propiedades fisicoquímicas del suelo como son pH y CE (Conductividad Eléctrica), manteniendo los niveles dentro de los parámetros óptimos para el crecimiento de maíz. Además, la aplicación del fertilizante tuvo efectos positivos en los niveles de Fósforo disponible en el suelo y en la respuesta del rendimiento del cultivo de maíz (Bongiovanni et al., 2018).

También se ha identificado que el nitrógeno total del digestato bruto tiene una eficacia como fertilizante comprendido entre el 31 y el 43 % de la del nitrógeno de origen químico según el criterio de medida. Esta eficacia se multiplica por 1,5 si la aportación de nitrógeno se hace en forma de la fracción líquida procedente de la separación en fases del digestato bruto, según su estudio sobre la caracterización y valor fertilizante del digestato y de su fracción líquida Biol, procedente de una planta de biogás (Mangado & Zudaire, 2011).

Según los Estándares de calidad del agua de riego y estrategias de gestión de la salinidad, la Conductividad eléctrica del agua (CE), se define por la concentración total de sales solubles contenidas en las aguas (The Texas A&M University System, 1996). La medida la conductividad eléctrica se realiza mediante una sonda llamada conductivímetro y su medida se puede expresar en diferentes unidades (Siemens/cm, mhos/cm). Las equivalencias son: 1 dS/m = 1 milimhos/cm = 1000  $\mu$ S/cm.

Este parámetro se utiliza en la agricultura para conocer la concentración de sales que traen los fertilizantes. Según estudios sobre la conductividad eléctrica del agua de riego, se puede clasificar las aguas según la salinidad del agua, según se indica en la tabla 14 (James et al., 1982). Además, existen diversos estudios que han determinado una clasificación de los cultivos según la tolerancia al riego con aguas salinas (Hass & Hoffman, 1977), que se muestra en la tabla 15.

<b>Categoría de Aguas de Riego</b>	<b>Rango de Conductividad Eléctrica</b>
Baja salinidad	CE < 0,7 dS/m
Salinidad media	0,7 < CE < 3,0 dS/m
Alta salinidad	3,0 < CE < 6,0 dS/m
Muy alta salinidad	CE > 6,0 dS/m

Tabla 14. Clasificación de Aguas de Riego según su salinidad (James et al., 1982). Elaboración propia.

<b>Clasificación Cultivos</b>	<b>Rango de Conductividad Eléctrica</b>	<b>Ejemplos de cultivos</b>
Alta tolerancia	2,7 CE < CE < 8,0 dS/m	Algodón, Remolacha, Sorgo, Cebada, etc.
Tolerancia media	1,3 dS/m < CE < 4,0 dS/m	Tomate, Olivo, Uva, Maíz, Trigo, etc.
Baja tolerancia (Sensibles)	0,7 dS/m < CE < 2,0 dS/m	Lechuga, Manzano, Cítricos, Pimiento, Frijol, Melón, etc.

Tabla 15. Clasificación de cultivos según la tolerancia al riego con aguas salinas (Hass y Hoffman, 1977). Elaboración propia.

Según el medio en donde se realice la medición de la electro-conductividad, se le entrega una nomenclatura específica. Para referirnos a la Conductividad eléctrica del suelo se utiliza "ECe", expresado en deciSiemens por metro (dS/m) del extracto de saturación del suelo a 25°C. Para la Conductividad eléctrica del agua de riego, se utiliza "ECw". Basado en el Libro Azul SQM sobre la calidad de aguas de riego, en caso de que la ECe y la ECw se mantienen cada una por debajo de 2 dS/m, prácticamente no se generan pérdidas en los cultivos (Aysers, 1977).

## 2. Diseño y fabricación

En este capítulo se muestran las definiciones de diseño, desarrollo y fabricación sobre el sistema completo de biodigestión anaeróbica, esto incluye tanto los componentes y accesorios del biodigestor, como del sistema de monitoreo, donde juntos forman el sistema de micro biodigestión.

### 2.1. Diseño del sistema de micro biodigestión

En este subcapítulo se describen las variables características sobre el diseño del sistema de micro biodigestión, en específico se plantea la determinación de los parámetros de diseño, la definición de los componentes y accesorios complementarios del biodigestor, y la lógica del sistema de monitoreo.

#### 2.1.1. Variables características del sistema de micro biodigestión

En esta sección se plantean las variables características que requiere el diseño del sistema de biodigestión para cumplir con las necesidades básicas del proyecto, incluyendo la influencia del entorno de ambiente extremo en su operación, la escala de tratamiento, la disposición de sustrato/alimento, la producción de bioinsumos, la adaptación del biodigestor para ser trasladado e implementado, y la independencia energética para su operación continua y descentralizada. En la tabla 16 se describe un resumen de todos requisitos del proyecto, levantados durante este subcapítulo según las variables características del sistema de micro biodigestión.

##### 2.1.1.1. Influencia del entorno y medio ambiente

Un biodigestor diseñado para ambientes extremos debe ser de una materialidad duradera y robusta, pues se espera que tenga una **vida útil mayor a 10 años**, y las condiciones climáticas del norte y del sur de nuestro país son altas o bajas temperaturas, radiación solar, humedad, salinidad, además de las oscilaciones bruscas de temperatura durante los días y meses del año. Para ello el reactor debe estar fabricado con **materiales lo suficientemente flexibles y resistentes** a la exposición de calor y frío, radiación, sustancias y cambios climáticos frecuentes.

Este proyecto se enmarca en un contexto de ambiente extremo, para el caso del norte, se define por su condición desértica, clima árido y abundante radiación solar. La temperatura oscila drásticamente entre el día y la noche, alcanzando más de 30°C a medio día, y 0°C en la noche, para trabajar un biodigestor con buen rendimiento, se requirió que el sistema trabaje en **temperatura mesofílica, es decir, 37°C** idealmente en un rango entre 20°C y 40°C, según la figura 7 tabla 8 de la sección 1.4.3.1. Además, según se indica en la misma sección, se deben evitar los cambios de más de 2 °C para asegurar una producción estable.

Para asegurar una operar en promedio a 30°C y obtener un buen rendimiento, se requería que el reactor tenga **aislación térmica mínima, tenga un pequeño invernadero o micro túnel para conservar la temperatura durante la noche y que sea alimentado con agua caliente**, según sea posible. Lo anterior permite disminuir la oscilación térmica para mantener su temperatura más estable a lo largo del tiempo. Dado que se requirió trabajar el reactor **rangos mesofílicos**, determina sus **tiempos de retención** entre **30 y 40 días**, según indica la tabla 17.

##### 2.1.1.2. Escala del tratamiento

El proyecto se plantea para ser de uso comunitario y tener una capacidad de tratamiento sobre la cantidad de residuos que genera una comunidad de **10 a 20 usuarios**. Es relevante que el sistema de

biodigestión y operación se sostenga en el tiempo, por ello se requería un **sistema de escala doméstica de fácil operación** que satisfaga las necesidades de la comunidad.

Según las alternativas de materiales y los tipos de biodigestores, además entendiendo que la escala será doméstica/rural y la definición de una operación sencilla, se define que el tipo de reactor ideal es el **tipo tubular de geomembrana**, la tabla 1. Esto debido a la facilidad de implementación versus los tipos tanque séptico, que muchas veces tienen fugas de gas, o los reactores de domo fijo o flotante, que requieren una infraestructura de hormigón y conlleva obras civiles leves, además, se contó con la facilitación de una empresa fabricante de hdpe que proporcionó material en convenio para realizar estudios, para ello se requirió definir el diseño de la bolsa y el tipo de geomembrana.

Otra razones de la selección del tipo bolsa, se basó en la búsqueda de una operación simple y realizable por una persona, donde destaca el sistema de **flujo pistón** ya que ese mecanismo es ideal para biodigestores de zonas rurales en tamaños pequeños y medianos, según la tabla 1, pues **no requiere de agitación continua** y todo el sustrato ingresado cumple con el tiempo de retención antes de ser evacuado en formato de bioinsumo. demore poco tiempo

#### 2.1.1.3. Monitoreo de parámetros

Los tratamientos biológicos requieren de cuidado y mantención continua para lograr una correcta operación y buen rendimiento, para ello se requería mantener un apoyo en la operación continua, que se puede entregar mediante un **sistema de monitoreo remoto** en el reactor, para guiar y acompañar al operador en la toma de decisiones, sin la necesidad de largos viajes. Además, se requería que el sistema de monitoreo contenga un **visor**, con del estado inmediato del reactor y **con luces** que sirvan para informar al operar en origen.

Dado que es un sistema de escala doméstica para ambientes extremos, debe utilizar sensoramiento efectivo y adecuado a la escala del tratamiento, para ello se requirió diseñar e **implementar un sistema de monitoreo remoto de bajo costo** que sea lo suficientemente **robusto** para funcionar continuamente. Fueron necesarias **sondas resistentes** al agua, que pueda estar sumergida constantemente y que resista las inclemencias del clima, entre ellas el sol, las lluvias, la radiación y los constantes cambios de temperatura y humedad ambiental. Según la necesidad de monitorear ciertos parámetros de operación, se espera encontrar sondas viables económica y técnicamente según las características, para ello se determina que **se medirá al menos la temperatura, el pH y electro conductividad** en el medio líquido, según se indica en el subcapítulo 1.4 sobre Operación, monitoreo y control de procesos.

#### 2.1.1.4. Alimentación continua

Según la cantidad de personas, considerando que cada persona genera un aproximado de 0,6 kg. de residuos orgánicos diariamente (SINIA, 2019), se espera que la comunidad genera un estimado de **5 a 10 kilos diarios de residuos orgánicos** domiciliarios, entre ellos restos de frutas y verduras. Adicionalmente, se espera que el sistema de biodigestión pueda ser utilizado por comunidades agropecuarias y campesinas familiares, donde se puede rescatar un estimado de 2 kilos recuperable al día de estiércol por animal de su ganado, según sea la zona. Para lograr valorizar dicha cantidad de residuos en origen, requería un tratamiento con una mínima **capacidad de 7 kg. sólidos al día**. Basado en el caudal de entrada de un reactor, si el total de sólidos es 7 kg., se debe complementar el sustrato con agua para **definir el volumen del caudal de entrada**.

Entendiendo que la relación agua: sustrato, para un caudal de un biodigestor doméstico debe ser de 2:1 basado en la sección 1.4.1.2. la cantidad de agua es de 14 litros, por lo tanto, litros. Definiendo así que el caudal de entrada debe ser de al menos **21 litros en volumen** aproximadamente. Lo anterior permite que el sistema sea manejable por una sola persona en la operación y alimentación. Basado en la cantidad de mezcla, se plantea como referencia de medida un **balde de 20 litros**, para estandarizar la mezcla total y proporción sólida y líquida de la alimentación diaria.

Considerando un biodigestor con una carga promedio de 20 litros diarios de mezcla, el sistema requirió tener un **alimentador, tanque de mezcla o tanque estabilizador**, para manipular los residuos, agregar agua, homogenizar y condicionar la mezcla antes de ingresarla al reactor.

Según el caudal y el tiempo de retención de 40 días según la temperatura ambiental de la zona, requería que el volumen del **reactor sea de aproximadamente de 800 litros**, considerando que el volumen del reactor es Caudal (Q) por el Tiempo de Retención (HRT).

#### 2.1.1.5. Autoproducción de bioinsumos

El proyecto busca aprovechar residuos orgánicos pecuarios y/o domiciliarios, durante 1 año, para generar una **solución en origen** de tratamiento. El sistema de biodigestión tendrá la capacidad de generar biogás y digestato, donde se plantea generar la **capacidad técnica local de producción** de bioinsumos.

Dependiendo de las necesidades de las comunidades se podrá priorizar la producción de biogás y/o fertilizante para uso complementario a los abonos que usan actualmente, para ello se requería **producir una cantidad útil** para su posterior uso. El uso de estos productos requiere una **caracterización** para conocer su **composición y calidad**.

Considerando que la carga del reactor es de al menos 21 litros diarios, se puede estimar la cantidad de biogás y digestato generado. Según el funcionamiento del reactor tipo flujo pistón, lo que entra es igual a lo que sale, por lo tanto, la **producción de fertilizante líquido es de 21 litros diarios**, se requirió un **contenedor para almacenar** la producción durante unos días, según el uso que le de la comunidad. El volumen de biogás generado requiere de cálculos que se realizarán en los siguientes subcapítulos, y según la cantidad se requirió incluir una **línea de filtrado** de biogás para eliminar impurezas y un **contenedor de almacenamiento**, además de accesorios para su uso.

#### 2.1.1.6. Adaptación al traslado e implementación

Considerando los ambientes extremos, el sistema de biodigestor se plantea para lugares que posiblemente estén alejados de zonas centrales y tengan un acceso limitado. Asimismo, se espera que el biodigestor se debe fabricar en Santiago y luego ser enviado con su embalaje al lugar de destino en diferentes medios de transporte. Para ello, el biodigestor debe ser **transportable**, es decir debe tener un **diseño modular, flexible y liviano**, además de incluir un correcto embalaje, para transportarse fácilmente y ser resistente a movimientos y golpes de los viajes de envío.

Basado en la característica modular del producto, se requirió un sistema de **piezas y encajes** de tal modo que sea modular, esto permite que el modelo sea **fácil y rápido de implementar y también fácil de transportar** por piezas desarmadas. Además, permite reemplazar piezas únicas si hay desgaste o falla, facilitando su disponibilidad usando **repuestos** o no el cambio del sistema completo.

Considerando que el biodigestor debe cumplir con los elementos mínimos para funcionar, se requirió que este cuente con **cinco piezas o componentes**, un receptor de sustrato, una bolsa de reactor, una bolsa de acumulación de biol y otra para el biometano, y una línea de filtrado de biogás.

#### 2.1.1.7. Independencia energética

Considerando que se tendrá un sistema de monitoreo remoto estará generando data constantemente como al menos tres parámetros, además de los datos de tiempo y hora, se requiere poder transmitir y enviar los datos en línea, para ello se requirió **dejarlo conectado a internet** mediante un router de wifi.

Entendiendo las posibles zonas donde se emplazará el proyecto, posiblemente con difícil acceso al agua y/o electricidad cerca, además del consumo requerido por el sistema de monitoreo que incluye sondas, un visor y más elementos de transmisión, se requirió un sistema totalmente **autónomo energéticamente**, para alimentar el consumo de energía de los sensores y del router de wifi, para ello se plantea un **panel fotovoltaico con su respectivo regulador de carga y batería**, con capacidad para abastecer de electricidad a todo el sistema de monitoreo durante la noche.

Variable Característica Sistema de Micro Biodigestión	Necesidades del proyecto y parámetros de diseño
Influencia del entorno y medio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vida útil mayor a 10 años</li> <li>- Materiales lo suficientemente flexibles y resistentes</li> <li>- Trabajar a temperaturas mesofílicas</li> <li>- Tiempo de retención entre 30 y 40 días</li> <li>- Aislación térmica</li> <li>- Pequeño invernadero o micro túnel</li> <li>- Acceso/suministro agua caliente</li> </ul>
Escala del tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De 10 a 20 usuarios</li> <li>- Sistema de escala doméstica de fácil operación</li> <li>- Reactor tipo tubular</li> <li>- Mecanismo de flujo pistón</li> <li>- Sin agitación continua</li> </ul>
Monitoreo de parámetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de monitoreo integrado</li> <li>- Visor y luces para mensajes y alertas</li> <li>- Bajo costo y robusto</li> <li>- Sondas resistentes</li> <li>- Parámetros: T°, pH y EC</li> </ul>
Alimentación continua	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 a 10 kilos diarios de residuos orgánicos</li> <li>- Restos futa y verdura, estiércol del ganado</li> <li>- Aprox. 21 litros de carga al día, incluida el agua</li> <li>- Incluir tanque alimentador</li> <li>- Tanque Reactor cerca de 1m<sup>3</sup></li> </ul>
Autoproducción de bioinsumos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solución en origen</li> <li>- Capacidad técnica de producción</li> <li>- 21 litro de biol al día</li> <li>- Medir calidad y composición</li> <li>- Línea de filtración de biogas</li> <li>- Contenedores almacenaje biol y biogas</li> </ul>

Adaptación al traslado e implementación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportable</li> <li>- Diseño modular, flexible y liviano</li> <li>- 5 piezas y componentes</li> <li>- Sistema de encajes</li> <li>- Fácil y rápido de implementar</li> </ul>
Independencia Energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conexión a internet</li> <li>- Uso de wifi por señal telefónica o internet satelital</li> <li>- Autonomía energética</li> <li>- Panel fotovoltaico</li> <li>- Regulador de carga y batería</li> </ul>

Tabla 16. Resumen de las variables características del sistema de microbiodigestión. (Elaboración propia)

## 2.1.2. Determinación de parámetros de diseño del sistema de micro biodigestión

Para dimensionar el sistema de biodigestión, se revisaron los parámetros de diseño con mayor importancia para decidir el tamaño y volumen de los componentes del reactor. En esta sección se plantean y definen los siguientes parámetros de diseño del reactor: tiempo de retención hidráulica, volumen de carga, volumen total del reactor, volumen útil del reactor, volumen del acumulador de biol, volumen del acumulador del reactor de biogás y el volumen y superficie total del sistema de micro biodigestión.

### 2.1.2.1. Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

Este parámetro indica la cantidad de días que permanece el material orgánico dentro del reactor, para alcanzar a ser consumido por los microorganismos. Está relacionado con la temperatura del proceso, según los parámetros de monitoreo y control del biodigestor de la sección 1.4.3.1. Basado en la figura 7, conociendo el rango de temperaturas a la cual va a operar el biodigestor, se presentan tiempos de retención asociados a la tasa de crecimiento de los consorcios bacterianos. Además, con ello se puede determinar un rango de tiempo de retención ideal, para lo anterior se presenta la tabla 8. Este trabajo se enmarcó en una zona de clima extremo, con temperaturas definidas en la sección 2.1.1.1. Además, busca tener accesorios y procesos que aseguren una temperatura ideal basado en la tabla 17. En este caso, se espera trabajar entre 20 y 30°C, es decir, se trabajó en rangos de temperatura levemente psicrófilo y sobre todo mesofílico, lo que implica un rango de tiempo de retención entre 30 y 60 días, según la tabla 17.

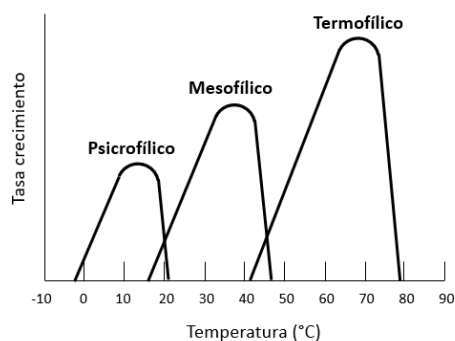


Figura 9. Rangos de trabajo del biodigestor en zonas extremas, basado en la figura 7 de (Speece, 1996). Elaboración propia

Tipo digestión	Rango Mínimo de T°	Rango Óptimo de T°	Rango Máximo de T°	Tiempo de retención
Psicrofílico	4-10°C	15-18°C	20-25°C	+ 100 días
Mesofílico	15-20°C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílico	25-45°C	50-60°C	75-85°C	10-15 días

Tabla 17. TRH según rangos de temperatura y tipos de digestión anaeróbica. Adaptada desde (Lagrange, 1979). Elaboración propia.

#### 2.1.2.2. Volumen de Carga

Este parámetro indica el volumen total del sustrato ya diluido con agua que ingresa al reactor por cada carga, según la frecuencia de carga definida. Es uno de los factores y parámetros de diseño y operación, de la sección 1.4.2.1. Este volumen de carga considera una fracción sólida de materia orgánica y otra de agua, que se mide en ST y SV, basados en la sección 1.3.1.1. Este parámetro, se relaciona con el pretratamiento de las etapas de la biodigestión revisadas en 1.3.2.1, ya que según el volumen de carga se debe considerar un tanque de carga del volumen suficiente para preparar la mezcla antes de entrar al reactor, según la sección 1.3.2.1. Conociendo el rango de tiempo de retención en el cual se trabajará, el volumen estimado del reactor y el tipo de sustrato, se puede determinar el caudal de entrada, es decir, volumen de carga diario. En los biodigestores tubulares se trata de conseguir que la carga de entrada al biodigestor (la mezcla de estiércol y agua) tenga entre 3% y 16% de sólidos totales (ST) (Marti, 2019).

En este caso, el sustrato será estiércol de ganado con restos de fruta y verduras en una proporción de 1:2 sobre materia orgánica y agua, el rango de tiempo de retención será entre 30 y 60 días basados en la temperatura ambiental esperada según la sección 2.1.1.4., y el volumen de la cámara de digestión se plantea en la sección 2.1.1.2., con un máximo de 1000 litros. Se calcula el caudal basado en la ecuación (1) la cantidad de materia orgánica que se puede recoger diariamente para alimentar el biodigestor, el volumen del digestor se calcula mediante la ecuación (1). Asumiendo un TRH de 40 días, se puede calcular la cantidad de mezcla estiércol - agua que se debe alimentar diariamente al biodigestor a partir del día 41, donde la mezcla estiércol-agua se preparará en proporción (1:2). En este caso, se determina que el volumen de carga es de 20 litros.

#### 2.1.2.3. Volumen total del reactor

Este parámetro indica el volumen del contenedor donde se realiza la biodigestión, definido por la sección 2.1.1.1. Conociendo la cantidad de materia orgánica que se puede recoger diariamente para alimentar el biodigestor, el volumen del digestor se calcula mediante la ecuación (1). En este caso se determina que el volumen del reactor sea de 700 litros, para una alimentación diaria de 20 litros de mezcla con un tiempo de retención de 35 días aproximadamente.

$$V_R = (V_{M.O.} + V_{Agua}) \cdot TRH \quad (1)$$

donde:

$TRH$  : Tiempo de retención

$V_{M.O.}$  : Volumen de materia orgánica en la mezcla.

$V_{Agua}$  : Volumen de agua en la mezcla.

$Q = V_{M.O.} + V_{Agua}$  : Volumen de carga o caudal.

#### 2.1.2.4. Volumen útil del reactor

Este parámetro indica el volumen utilizado del contenedor, es decir del medio líquido interno, que incluye la materia orgánica más el agua y los microorganismos. Se considera en promedio un 80% del volumen total del reactor, según se define en la sección 1.2.2, con el tipo de reactor tubular en este caso. Esto se debe a que, dentro de la cámara de biodigestión, hay una fracción líquida y una fracción gaseosa según la generación de biogas. El volumen de la cámara de digestión o volumen útil ( $V_U$ ) constituye entre un 70% y 90% del volumen del digestor, el cual se obtiene utilizando la ecuación (2) (Oberg & Jones, 1979). En este caso, se determina que sea de un 90% del  $V_R$ .

$$V_U = V_R \cdot (0,7 \sim 0,9) \quad (2)$$

#### 2.1.2.5. Volumen del acumulador de digestato

Este parámetro indica el volumen de un contenedor para almacenar la fracción líquida del digestato generado, llevado por rebalse diario del reactor. Se define como parte del post tratamiento y almacenamiento de los bioinsumos generados, según la sección 1.2.3. Se espera que el volumen en  $m^3$  de un acumulador de digestato ( $V_{AD}$ ) esté en el rango de 20% y 25% del volumen digestor, para almacenar el digestato generado de algunos días, sin embargo, para acumular durante más tiempo simplemente se puede optar por tener un tanque más grande, que puede ser hasta el 100% del volumen del reactor (3). En este caso, se determina que sea de 700 L.

$$V_{AD} = V_R \cdot (0,2 \sim 1) \quad (3)$$

#### 2.1.2.6. Volumen del acumulador de biogás

Este parámetro indica el volumen de un contenedor para almacenamiento de gas generado, considerando que no estará presurizado, sino expandido y a presión atmosférica. Se define como parte del post tratamiento y almacenamiento de los bioinsumos generados, según la sección 1.2.3. Se espera que el volumen de un acumulador de biogás ( $V_{AB}$ ) esté en el rango de 20% y 25% del volumen digestor, para almacenar el biogás generado de algunos días, sin embargo, para acumular durante más tiempo simplemente se puede optar por tener un tanque más grande, que puede ser hasta el 100% del volumen del reactor, según la ecuación (4).

$$V_{AB} = V_R \cdot (0,2 \sim 1) \quad (4)$$

donde:

$V_{AB}$  : Volumen del tanque acumulador de biogás en  $m^3$

En este caso se realizó un cálculo estimado de la producción de biogás diaria para que el acumulador de biogás permita guardar la producción de al menos 20 días. Para calcular un volumen de contenedor para almacenamiento hay que considerar un estimado de la producción diaria de biogás. Se estima que la producción biogas para estiércol ganadero aproximado es entre 29 y 39 litros de biogas por cada kilo gramo de estiércol (Martí, 2019). Basado en lo anterior, para calcular el potencial de producción de biogas se utiliza la ecuación 5. Basado en los cálculos, se estima que la producción diaria de biogas puede llegar a los 145 litros de biogas al día.

$$V_{biogas} = F_{biogas\ sustrato} \cdot Kg_{sustrato} \quad (5)$$

donde:

$V_{biogas}$  : Volumen de biogas generado por el sustrato en litros

$F_{biogas\ sustrato}$ : Factor de producción de biogas de sustrato específico, en este caso estiércol ganadero.

$Kg_{sustrato}$  : Kilogramos de sustrato, en este caso de estiércol ganadero.

Según los cálculos anteriores, se determina que el volumen del acumulador de biogas es de 700 litros para acumular la producción de 5 días aproximadamente.

### 2.1.2.7. Volumen total y superficie del sistema de micro biodigestión

Este parámetro indica el volumen de todos los contenedores como volumen total y considera la superficie en m<sup>2</sup> de los contenedores instalados en terreno. Además, considera el área o superficie utilizada por los reactores ensamblados para determinar el área de trabajo. De lo anteriormente planteado se tendrá que el volumen total del micro biodigestor ( $V_{MB}$ ) es la suma del volumen de la cámara de fermentación o volumen del reactor más el volumen de los almacenadores, según la ecuación 6. En este caso, el volumen total sería de 2100 litros, es decir de 2,1 m<sup>3</sup>.

$$V_{MB} = V_R + V_{AD} + V_{AB} \quad (6)$$

Basado en el volumen de los contenedores de reactor, se estima que el área de contenedor es de 1,5 m de ancho por 3,0 m de largo y 0,5 m de alto, aproximadamente. Por cada contenedor se estima que utiliza un área de 4,5 m<sup>2</sup>. Es decir, para los tres contenedores se requiere un mínimo de 15 m<sup>2</sup>, se considera además espacio para manipular, operación, bodegaje, etc. Finalmente, comprendiendo el volumen y el área que utiliza cada contenedor, se estima que el área necesaria para implementar el sistema de micro biodigestión debe ser de al menos 6 m x 6 m, 36 m<sup>2</sup>. Además, según el decreto 119 de MMA sobre la seguridad de pantas de biogás, se debe definir que el reactor esté instalado a 6 metros de alguna construcción o infraestructura.

### 2.1.3. Piezas o Componentes del micro biodigestor

Comprendiendo las dimensiones del sistema de biodigestión y basado en los parámetros de diseño, en esta sección se plantea el diseño específico de cada componente previamente definido en la sección 2.1.2. Se plantea que el sistema de biodigestión sea compuesto modularmente por cinco piezas o componentes que ensamblados forman el micro biodigestor, estos son: alimentador o tanque de carga, tanque reactor o tanque de digestión, tanque de acumulación de biol, línea de filtrado de biogás y tanque de acumulación de biogás. En la figura 10 se puede ver un esquema de conexión entre los componentes del reactor.

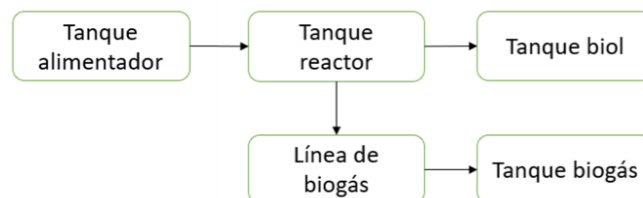


Figura 10. Esquema conceptual reactor y sus componentes. Elaboración Propia.

#### 2.1.3.1. Alimentador o tanque de carga

El alimentador es un contenedor primario donde se realiza el pretratamiento básico a la mezcla de sustratos antes de ingresar al tanque reactor. Basado en la sección 1.3.1.1. sobre Pretratamientos de la biodigestión, este tanque es donde se logra la homogenización y ecualización del alimento para cumplir con una Velocidad de Carga Orgánica adecuada, basado en la sección 1.4.2.1.

Considerando los métodos de trabajo del proveedor Polytex, su calidad de HPDE y sus moldes para tuberías de alta presión estandarizados, se plantea un contenedor de forma cilíndrica con tapa, su volumen está determinado en base a la alimentación y diseño del reactor en la sección 2.1.2.1 sobre volumen de carga del biodigestor.

Finalmente, para el tanque de carga se plantea un contenedor de 60 litros considerando la alimentación de hasta 20 litros diarios, para tener capacidad de mezclar y regular la carga con agua o sustrato. En este tanque, en ocasiones llamado estabilizador, se introduce el material orgánico para luego mezclarse con agua en las proporciones adecuadas, logrando la homogeneización y control de la carga, basado en determinados parámetros de operación. El alimentador debe incluir un conducto o tubo de carga que permita conectar el tanque de carga con el tanque de digestión, este tubo debe tener las medidas externas ajustadas a la medida interna de la entrada del reactor, para que entre encajado y no genere fugas en el sistema. Se busca que el tubo una vez dentro del reactor, se sumerja en el líquido.

#### 2.1.3.2. Tanque reactor o tanque de digestión

Es el compartimiento hermético que denomina el biodigestor como tal, donde se encuentran las bacterias anaeróbicas que van a transformar la materia orgánica. El volumen es de 700 litros. En este caso, se compone de una cámara de fermentación de tipo bolsa, ahí el material que se descompone permanece un tiempo, llamado tiempo de retención, en el que se degrada y libera el biogás. La forma del reactor es rectangular y está conformada por la unión de dos planchas de 1,5 x 3 metros, tiene una entrada para residuos y cuatro salidas, una para digestato, una para biogás y dos para tomas muestras y/o introducir sondas.

#### 2.1.3.3. Tanque de acumulación de biol

En este compartimiento donde se acumula el material ya fermentado (digerido), que posteriormente puede recogerse y utilizarse. El volumen es de 700 litros. La capacidad de este tanque esta creada en base al volumen del biodigestor, en este caso del mismo volumen y forma. Está diseñado para estar conectado al tanque de digestión, de manera que se llena en base al rebalse por alimentación, es decir, diariamente recibe una carga de alimento e inmediatamente rebalsa la misma cantidad en volumen de digestato (biol) hacia el tanque de acumulación.

#### 2.1.3.4. Línea de filtrado de biogás

La línea es una conexión de tubos entre el reactor y el tanque de acumulación de biogás, que permite el traspaso de uno hacia otro, además, cumple la función de limpiar impurezas del biogás, mediante la filtración de ácidos sulfhídricos, para acumular idealmente solo el biometano. Según el decreto 119 de MMA, se recomienda el uso de una válvula de alivio por seguridad. En la figura 11, se plantea un esquema de distribución de la línea de filtrado de biogas entre el tanque reactor y el acumulador de biogas, que incluye una válvula para liberar presión, un filtro de biogas basado en hierro oxidado y al menos cuatro válvulas para manipular el flujo del biogas sin fugas en las conexiones.

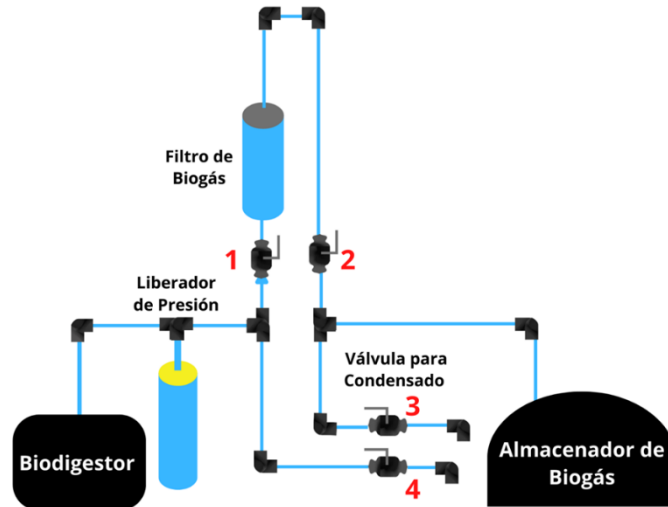


Figura 11. Esquema de la línea de biogás del sistema de micro biodigestión. Elaboración Propia.

#### 2.1.3.5. Tanque acumulación de biometano

El tanque de acumulación es el compartimiento hermético cuya función es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, pues la producción de gas es constante durante los días, por lo tanto, constantemente hay un flujo de biometano, aunque sean cargas pequeñas. El volumen es de 700 litros. La capacidad de almacenaje fue creada en base al volumen del reactor, en este caso del mismo volumen y forma para dar mayor capacidad de almacenamiento.

#### 2.1.4. Accesorios complementarios del micro biodigestor

En esta sección, se plantea el diseño conceptual sobre los accesorios complementarios a los componentes básicos que requiere el sistema de biodigestión para funcionar correctamente durante la operación del proyecto. En la figura 12 se muestran los accesorios complementarios que se plantean, siendo estos un sistema de monitoreo, la habilitación de una línea de agua caliente, el uso aislante térmico en su implementación y la implementación de un invernadero pequeño o micro túnel sobre el tanque de reactor. Adicionalmente, para facilitar el uso del sistema, se plantea el uso de una bodega para guardar herramientas o un extintor.

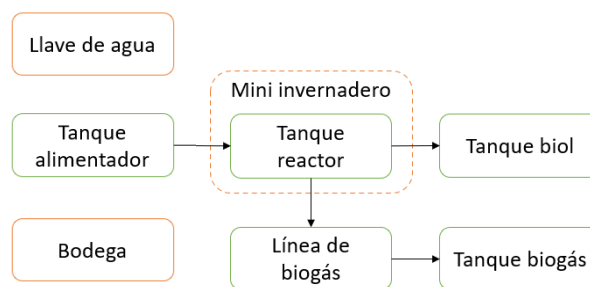


Figura 12. Esquema conceptual del reactor, sus componentes y accesorios complementarios. Elaboración Propia.

#### 2.1.4.1. Sistema de Monitoreo

Se considera un accesorio y pieza clave del proyecto, para según la sección 2.1.1.3, es necesario el monitoreo y los parámetros principales son la temperatura, el pH y el electro conductividad del

medio líquido interno del reactor. El sistema incluye un visor para interactuar con el usuario, informando sobre el estado del reactor, además, los datos se envían y guardan. Este accesorio es por sí solo un área del proyecto, por lo que se detallará su funcionalidad en el subcapítulo 2.1.5. sobre los Elementos y lógica del Sistema de Monitoreo.

#### 2.1.4.2. Línea de agua caliente

Además, para mantener una temperatura apropiada en el reactor, se considera un sistema de calefacción basado en la alimentación con agua caliente, a través de un colector solar simple, es decir, una tubería que lleva agua hacia el lugar fue pintada de negro para retener el calor del día. Se debe conocer la temperatura del agua en la alimentación de septiembre y según análisis con termómetro, ésta alcanzó los 50°C.

#### 2.1.4.3. Aislante térmico

Se considera un sistema de aislación térmica basado en la aislación térmica natural de la tierra, por ende, el reactor está levemente enterrado, evitando así estar expuesto ante el viento directo y las heladas nocturnas. Además, lo anterior permite el desnivel necesario para el flujo de pistón. La aislación térmica, permite regular la temperatura dentro del reactor, para que influya en menor grado la temperatura externa o ambiental, por lo tanto, se busca aislar el reactor de su entorno. Para ello existen diversas maneras, utilizar material tal como espuma expansiva, lana de vidrio, lana de oveja, el suelo mismo dado que conserva una temperatura estable independiente de la temperatura del aire, todos ellos con diferentes factores de aislación. En este caso, solo se considera enterrar el reactor para evitar los cambios drásticos de temperatura del aire.

#### 2.1.4.4. Invernadero

Por otra parte, se considera un sistema de micro túnel o mini invernadero sobre la bolsa del reactor para retener el calor acumulado del día durante toda la noche. Esto permite que la temperatura interna del reactor se mantenga más estable durante la noche, pues la temperatura ambiental llega a los 0°C. Con el sistema de invernadero se logra minimizar la oscilación térmica interna del reactor, para evitar los cambios bruscos de temperatura del día y la noche. En caso del invierno, se recomendó utilizar dentro del invernadero un aislante térmico, como lana de oveja, pues hay menos radiación solar y sirve para evitar que el calor del reactor baje.

#### 2.1.4.5. Bodega

Finalmente, se plantea una bodega de al menos 2m<sup>3</sup> en el lugar de implementación para guardar elementos de trabajo y de seguridad. Tales como palas, baldes, sondas, bomba manual de descarga, paños de limpieza, extintor, entre otros. El extintor es necesario para cumplir los requisitos de la SEC y el decreto 119 de MMA.

### 2.1.5. Elementos y lógica del Sistema de Monitoreo

Para operar correctamente el biodigestor se requiere de un sistema de monitoreo con capacidad de capturar, procesar, guardar, visualizar y enviar datos de forma correcta, mostrando los indicadores basados en los parámetros de operación. Para ello, en este subcapítulo se plantean los elementos del sistema de monitoreo, el diseño de placa y diagrama del circuito, la lógica de programación, un esquema de flujo de datos y la matriz de alerta temprana. En la figura 13, se muestra un esquema conceptual integrado que incluye el reactor, sus componentes, accesorios complementarios y el sistema de monitoreo.

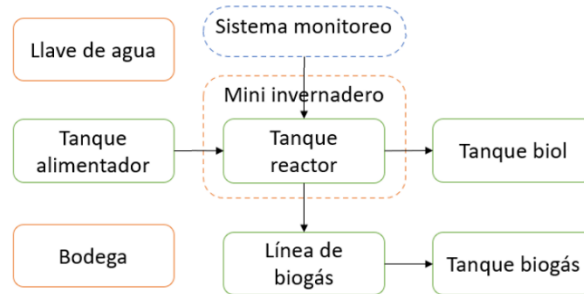


Figura 13. Esquema conceptual integrado con el reactor, sus componentes, accesorios complementarios y el sistema de monitoreo. Elaboración propia.

### 2.1.5.1. Elementos del Sistema de monitoreo

En esta sección se plantean al menos seis elementos básicos según las necesidades del proyecto para poder operar y dar seguimiento a un biodigestor remotamente con un sistema de monitoreo. Estos elementos, las cuales se ordenan según muestra la figura 14 y detallan en la tabla 18 están asociados tanto al hardware como al software del sistema de monitoreo según corresponda.

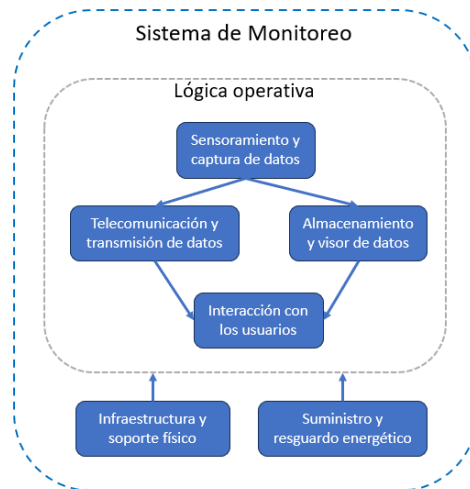


Figura 14. Esquema conceptual de los elementos del Sistema de monitoreo. Elaboración propia.

Elemento del Sistema de Monitoreo	Funcionalidad	Componentes asociados
<b>Sensoramiento y captura de datos</b>	Este elemento se requiere para generar datos de medio interno del reactor, según los parámetros de operación medibles.	En hardware se requieren sondas y un microcontrolador. En software se requiere de programación, para la calibración, medición y codificación de los datos generados por las sondas.
<b>Almacenamiento de datos</b>	Este elemento se requiere para guardar los datos generados por el elemento de sensoramiento y es independiente a internet, por lo tanto, sirve de resguardo antes las caídas de señal.	En hardware se requiere un componente de tarjeta SD para el microcontrolador y una tarjeta SD con capacidad suficiente. En software se requiere de programación.

<b>Telecomunicación y Transmisión de datos</b>	Este elemento se requiere para poder enviar los datos y la información capturada a través de internet, para subirla y visualizarla a través de plataformas.	En hardware se requirió un componente de wifi para microcontrolador y una fuente de internet en terreno. En software se requiere la vinculación de internet a la lógica del sistema, definir la carga y frecuencia de envíos, además de la integración con la plataforma de visualización.
<b>Interacción con el usuario</b>	Este elemento se requiere para habilitar una interfaz que permita al operador en terreno visualizar la información y los datos levantados.	En hardware se requiere un visor para terreno y alguna plataforma para el seguimiento remoto. En software se requiere la lógica de mensajería según los indicadores de operación.
<b>Infraestructura y Soporte físico</b>	Este elemento se requiere para situar y disponer los elementos anteriores.	En hardware se requieren estructuras herméticas, contenedores, espacio adecuado, pilares o postes. Deben ser componentes resistentes a las condiciones climáticas extremas a las que se someterán.
<b>Suministro y resguardo energético</b>	Este elemento se requiere para entregar energía eléctrica a los dispositivos que consuman corriente mediante la generación de energía renovable. También se requiere almacenar esta energía para distribuir en las horas del día la energía generada.	En hardware se plantea un sistema fotovoltaico con una batería.

Tabla 18. Descripción de los elementos del sistema de monitoreo. Elaboración Propia.

#### 2.1.5.2. Lógica de Programación

Basado en los elementos del monitoreo, el software y la programación está en la mayoría de los elementos. El software realiza la captura, procesamiento, almacenamiento y envío de datos. Específicamente el sistema que debe monitorear Temperatura, pH, EC y ORP, se plantea definir los **rangos de trabajo en operación de cada parámetro**, para utilizar esta información en una **matriz de decisión** de operación. Basado en la revisión bibliográfica, al medir la temperatura y pH se pueden asegurar las condiciones ideales de los microorganismos del reactor. Al medir la Electro Conductividad, se puede dimensionar la concentración de sales y nutrientes presentes en el biol. Al medir el Potencial de óxido-reducción, se puede dimensionar el nivel de contaminación del medio líquido.

Se plantea generar una herramienta de **apoyo en operación que advierta sobre los cambios** que sufran los parámetros de operación en tiempo real, traducidos a una cifra, un indicador del estado y un mensaje que entrega una **recomendación sobre qué acción** operar, complementado con luces asociadas a los estados, para facilitar la visualización y entendimiento. Este **método de alerta temprana** sirve para avisar y visualizar, mediante mensajes y luces al operador, que el sistema está cambiando su estado y requiere operación o mantención para su estabilidad. En la figura 15 se muestra un esquema del flujo de datos del sistema de monitoreo del micro biodigestor, desde la captura del dato hasta su visualización en el visor, incluida la interacción con el operador.

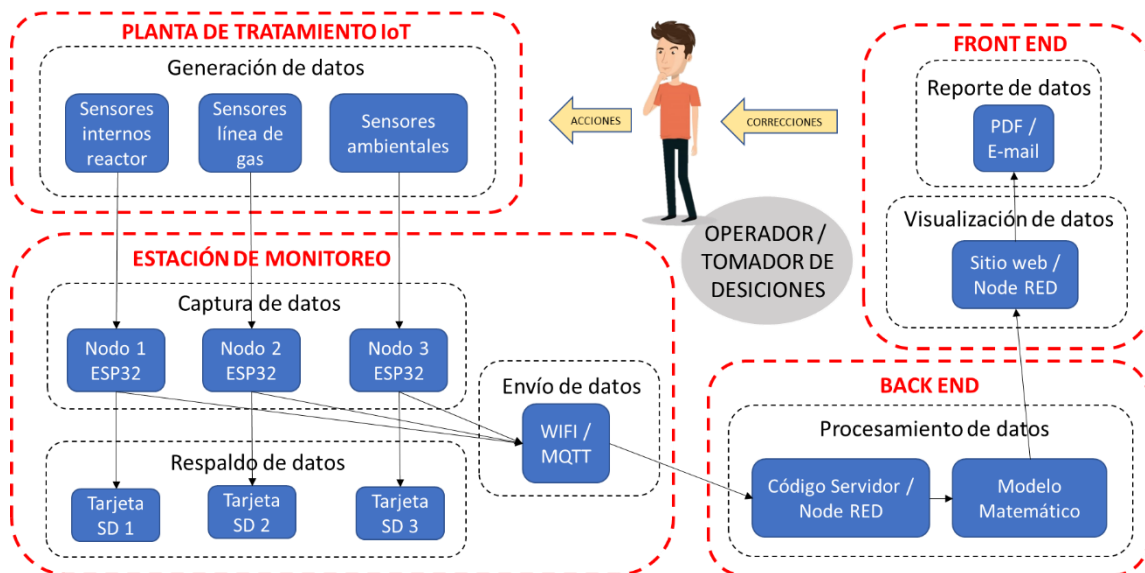


Figura 15. Esquema flujo de datos del sistema de monitoreo del micro biodigestor. Elaboración propia.

A continuación, se muestra un análisis y definición de los rangos y sensibilidad de medición de cada parámetro, que tendrá como resultado el diseño de la Matriz de Alerta Temprana descrito en la siguiente sección, para posteriormente mostrar un Método de Monitoreo, pues están establecidos los rangos para cada parámetro los cuales permiten entregar información detallada sobre el funcionamiento del sistema de biodigestión. Para ello se plantea, medir, procesar y enviar la información a una base de datos, la cual puede disponer de la información en terreno y remoto.

#### A. Temperatura

Es un indicador del proceso y parámetro de operación clave. Basado en las temperaturas promedio y la oscilación térmica de los ambientes extremos, que varían entre  $-15$  y  $45^{\circ}\text{C}$ , se espera un **promedio esperado de  $15^{\circ}\text{C}$  para Chile**. Basado en lo anterior, los biodigestores trabajarán con microorganismos en óptimos de fermentación psicrófilico y/o mesófilico simultáneamente, para entonces el tiempo de retención varía **entre 30 y 60 días**. Para ello se debe utilizar sondas sumergibles, con capacidad de lectura entre  $-50$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , con **sensibilidad de  $0,1$  grado Celsius**. Respecto a la frecuencia de medición, se deberá analizar el parámetro continuamente, al menos **cada 10 minutos**, para ajustar la mezcla interna mediante alimentación tibia y mejorar las condiciones. En caso de que la temperatura esté baja según la matriz, el visor mostrará un **mensaje con una recomendación**, alimentar con agua caliente, disminuir la dosis o bajar la frecuencia de alimentación, la cual se muestra en la matriz de alerta temprana. Adicionalmente, se plantea la medición de la temperatura ambiental.

#### B. pH

Es un indicador del proceso y parámetro de operación clave. Basado en los rangos de funcionamientos de biodigestores declarados por manuales de biogas y/o artículos científicos, se plantea generar un promedio entre las fuentes, para buscar mantener el sistema. Esto implica poder darle una continuidad operativa evitando cambios bruscos, dado que eso inhibe a los microorganismos. Se creó la tabla 19 para identificar los rangos de pH y sus implicancias o efectos en el proceso, definidos por diversos autores, en base a ellos, se plantea una categoría de rangos

que definirán las condiciones el tiempo real. Para ello se debe utilizar sondas sumergibles, con capacidad de lectura entre **3 y 11, con sensibilidad de 0,1**. Respecto a la frecuencia de medición, se deberá analizar el parámetro continuamente, al menos **cada 2 o 10 minutos**, para ajustar la mezcla interna mediante cambios de alimentación y evitar inhibiciones. En caso de que el pH esté bajo según la matriz, el visor mostrará un **mensaje con una recomendación**, disminuir la dosis o bajar la frecuencia de alimentación, la cual se muestra en la matriz de alerta temprana. Adicionalmente, se plantea la medición de la temperatura ambiental. Este sensor **debe calibrarse**, por lo que se incluye la necesidad en la programación. Además, hay que considerar que los sensores de pH deben **cambiarse cada cierto tiempo** porque tienen una vida útil limitada.

Texto	Autor	Efecto o consecuencia	Rango pH
Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal	(Parra-Orobio et al., 2014)	Rango máximo	5,5 - 8,0
		Baja producción CH <sub>4</sub>	5,5 - 6,0
		Capacidad buffer	7,0 - 8,0
		Poca productividad	5,5 pH inicial
		Más tiempo de retención	5,5 - 6,0
		Menos tiempo de retención	6,6 - 8,0
		Buena producción CH <sub>4</sub>	6,5 - 7,7
		Máxima producción CH <sub>4</sub>	7,0
La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)	(Acosta & Obaya-Abreu, 2005)	Rango óptimo	6,8 - 7,2
		Bacterias metanogénicas	6,5 - 7,5
		Bacterias acetogénicas	7,0 - 7,2
		Límites extremos	6,6 - 7,6
Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: Effect of pH	(Wang et al., 2014)	Producción de VFA's	6,0
		Inhibición metanogénicas	5,0 - 6,5
Fundamentos para el diseño de Biodigestores	(Olaya & Gonzales, 2009)	Rango acidogénesis	5,1 - 6,8
		Rango acetogénesis	6,6 - 6,8

Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. Centro NBC y PUCV. Centro CITRAR	(Vivanco et al., 2018)	Rango ideal degradación MO	6,8 - 7,5
		Acidificación reactor	Menor a 6,5
		Presencia de bacterias encargadas de las etapas de hidrólisis y acidogénesis. Hay solubilización de la materia orgánica pero no una metanización.	4,5 - 6,3
CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE GRANULACIÓN EN REACTORES UASB	(Broun et al., 2008)	actividad metabólica hidrolíticas	7,2 - 7,4
		actividad metabólica acetogénicas	5,5 - 6,6
		actividad metabólica acidogénicas	4,5 - 6,0

Tabla 19. Compilado de literatura sobre efectos en la biodigestión en rangos de pH. Elaboración propia.

### C. Electro conductividad

A pesar de la relevancia de este parámetro, se logró incorporar la medición de este solo es una fase del proyecto, por lo que no se consideró en el resultado final. Sin embargo, se buscó un método que permita medir la concentración de sales (nutrientes) del digestato, para conocer la dosis de aplicación. Este es un indicador sobre el estado del digestato y parámetro de rendimiento. Medir este parámetro nos permite conocer la concentración de sales que traen los fertilizantes, por lo tanto, indirectamente información sobre los nutrientes (James et al., 1982). Se plantea utilizar una sonda que maneje los rangos de CE basado en las tablas 14 y 15, sobre cultivos y su tolerancia a la salinidad. Para ello se debe utilizar sondas sumergibles, con capacidad de lectura entre **0,7 dS/m y 5 dS/m y una sensibilidad de 0,1 dS/m**. Así se plantea trabajar con aguas con tan altas en salinidad y puedan utilizarse en cultivos de tolerancia media y baja. Respecto a la frecuencia de medición, se deberá analizar el parámetro continuamente, al menos **cada 10 o 30 minutos**. De la misma forma, se plantea levantar y procesar el dato para indicar al operador mediante un mensaje, sobre la dilución que requiere el digestato para alcanzar concentraciones útiles de sales. Para lo anterior, se define una lógica operativa en la programación con la ecuación 7, que permite obtener la dilución necesaria para obtener un fertilizante en rangos ideales y aplicar en cultivos, así considera la medición del promedio de la electro conductividad entre el agua y el fertilizante.

$$V_{biol} \cdot EC_{biol} + V_{agua} \cdot EC_{agua} = V_{mezcla} \cdot EC_{mezcla} \quad (7)$$

donde:

$V_{biol}$  : volumen en litros de fertilizante concentrado extraído del acumulador de biol\*

$V_{agua}$  : volumen en litros de agua para diluir (incógnita)

$V_{mezcla} = V_{agua} + V_{biol}$  : Volumen mezcla en litros

$EC_{biol}$  : electro conductividad fertilizante concentrado en  $\mu\text{S/cm}$

$EC_{agua}$  electro conductividad agua = 400-600  $\mu\text{S/cm}$  (definido por literatura)

$EC_{mezcla}$  : electro conductividad mezcla para uso en fertirriego = 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
\* Definido a 1 litro de fertilizante en base al uso volumen que se requiera

Reemplazando los valores, se puede simplificar la ecuación 7 para crear una ecuación 8.  
Considerando que:  $V_{biol} = 1\text{L}$ .  $EC_{agua} = 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

$$V_{agua} = \frac{EC_{biol}}{500} - 2 \quad (8)$$

donde:

$V_{agua}$  : volumen en litros agua para diluir (dato recomendado por el Visor)

$EC_{biol}$  : electro conductividad fertilizante concentrado en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (dato capturado por el sensor)

Ejemplo de aplicación. Si la electro conductividad del fertilizante concentrado ( $EC_{biol}$ ) que mide el sensor es 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Utilizando la ecuación 8, resulta ( $V_a = 4000/500 - 2 = 8 - 2 = 6$  (litros)), para este caso, la fórmula indica que por cada 1 litro de fertilizante se deben utilizar 6 litros de agua, para diluirlo de tal modo que quede listo para el uso en fertirriego a una EC de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### D. ORP

Del mismo modo que la electro conductividad, el ORP se identificó como un parámetro útil y medible con sondas, sin embargo, en el proyecto solo se logró medir en una fase, por lo que se descartó como indicador a utilizar en este trabajo hasta encontrar mejores sondas de bajo costo. Este es un indicador sobre el estado del proceso y parámetro de rendimiento. Actualmente, se utiliza la ecuación 9 que según (Lee, 2008 relaciona el indicador de Potencial de Oxido Reducción (ORP) con los ácidos grasos volátiles (VFA) que indica el estado de biodigestión, específicamente en 3 de sus etapas de proceso. Sin embargo, es algo que no se está validando en terreno aún. Se esta manera, midiendo el ORP y utilizando la ecuación se podría estimar la producción y cantidad de ácidos grasos volátiles en tiempo real dentro del reactor.

$$VFA \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 7,05 \cdot ORP + 387,29 \cdot Temp. - 3502,45 \quad (9)$$

#### 2.1.5.3. Diseño matriz de alerta temprana

Considerando la experiencia práctica de medir los parámetros de operación, se determinó que solo se trabajará con pH y Temperatura, sin embargo, en algunas fases del proyecto se midió EC y ORP. En esta sección se plantea la matriz de decisión para el operador, basado en el análisis de parámetros de operación y monitoreo, con rangos de temperatura y pH para operar el sistema de manera informada. Es por eso que se planteó trabajar con un promedio entre ellos y rangos que abarquen distintos puntos de vista según las experiencias de operación y condiciones ambientales particulares de cada caso de estudio. Básicamente, se busca generar un programa que mida cada cierto tiempo los parámetros temperatura y pH, para determinar cambios de condiciones que pueden advertir y alertar tempranamente sobre algún inconveniente producto de los cambios de los parámetros de operación y monitoreo.

El sistema de monitoreo se plantea para entregar un apoyo al operador sobre las condiciones de operación, donde se indica en tiempo real en el origen sobre el cuidado y mantención del micro

biodigestor. Según sea el escenario, se muestra un mensaje y una luz que indica el estado del proceso. En la tabla 20 se puede apreciar los mensajes y luces de diferentes rangos de parámetros de operación definidos.

Color de luz	Mensaje	Escenario
Verde	Todo bien, continua así.	pH entre 6,5 y 8,5 y/o Temperatura entre 25 y 37°C
Amarilla	Cuidado, uno de tus parámetros está cambiando.	pH entre 6 y 9 y/o Temperatura entre 15 y 40°C
Roja	Alerta, debes detener o cambiar la alimentación.	pH menos a 6 y mayor a 9 y/o Temperatura menor a 15 y mayor a 40°C

Tabla 20. Matriz de decisión y mensajería de alerta temprana del sistema de monitoreo. Elaboración propia.

## 2.2. Fabricación del sistema de micro biodigestión

En este subcapítulo se muestra el trabajo de fabricación realizado tanto para el sistema de micro biodigestión como para el sistema de monitoreo. Finalmente, se muestra la integración de la fabricación del sistema completo, que incluye la micro biodigestión y el monitoreo.

### 2.2.1. Fabricación biodigestor

#### 2.2.1.1. Planimetría y diseño 3D

Para fabricar el biodigestor se inició el trabajo de planimetría y diseño tridimensional de cada componente del micro biodigestor determinado a partir de la volumetría generada en la sección anterior. Según las dimensiones de las láminas de geomembrana desarrollada por las fábricas, éstas tienen un ancho aproximado de 7m, por una largo indefinido, lo cual incide en la fabricación de las bolsas del tanque reactor y de las bolsas de acumulación. De tal forma, se plantea un diseño que cumpla con dichas medidas, por lo tanto, se definen reactores rectangulares de 1,5 m x 3 m. Para lo anterior se utilizó un programa de diseño tridimensional llamado Rhinoceros 3D, este es un software para modelado en 3D basado en un modelo matemático muy utilizado en la computación gráfica para generar representaciones de curvas y superficies. Es un software de diseño asistido por computadora, originalmente ofrecido por AutoCAD de Autodesk. En la figura 16 se puede ver la representación 2d con vista superior de los 5 componentes. En la figura 17 y figura 18 se muestra el plano en mayor detalle con las medidas y piezas del tanque de reactor, el cual incluye 5 perforaciones, de las cuales una es para la entrada de carga, dos son para la salida de los productos, entre ellos biogas y digestato líquido, y dos perforaciones que serán utilizadas para ingresar las sondas de monitoreo y toma de muestras. En las figuras 19 y 20 se muestra el diseño 3d del sistema de micro biodigestión realizadas con el mismo software de planimetría, el cual plantea que estas piezas sean encajables y ensamblables entre sí, para una implementación simple en terreno.

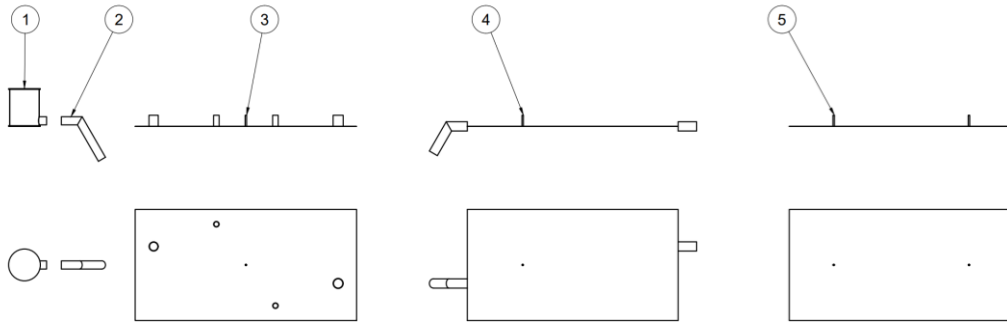


Figura 16. Representación de los componentes del micro biodigestor. Elaboración propia.

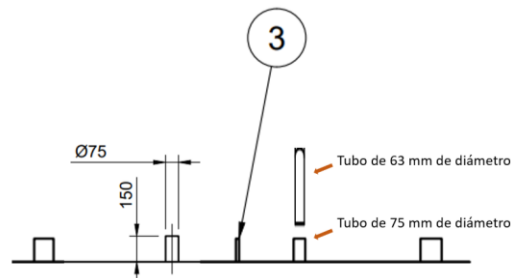


Figura 17. Plano lateral del tanque reactor del micro biodigestor. Elaboración propia.

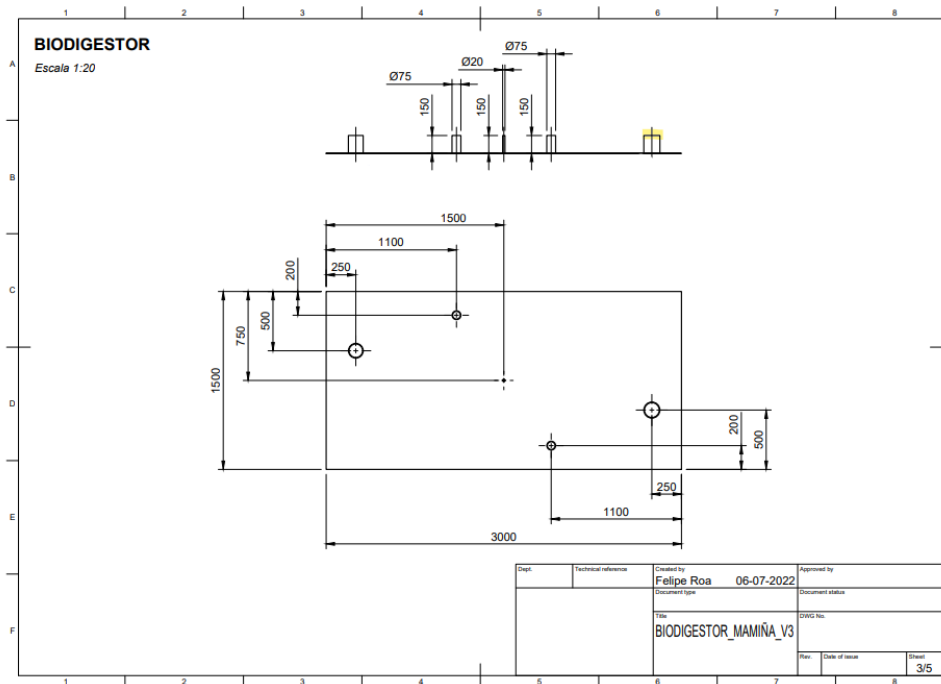


Figura 18. Plano cenital del tanque reactor del micro biodigestor. Elaboración propia.

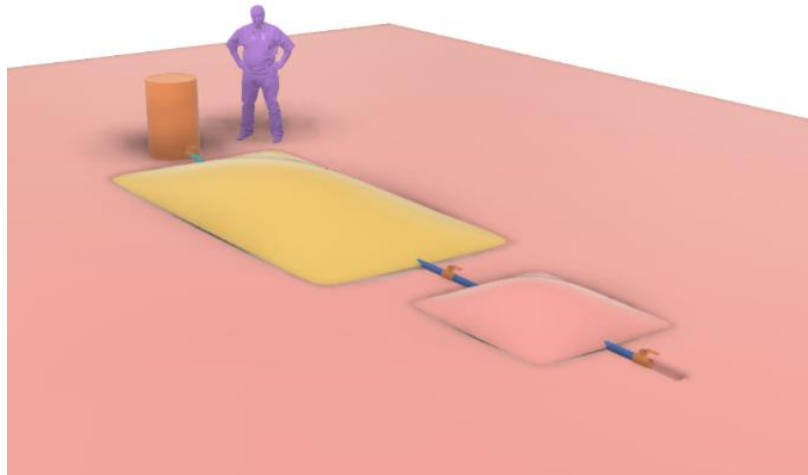


Figura 19. Diseño 3d del sistema del micro biodigestor ensamblado, vista lateral.  
Elaboración propia.

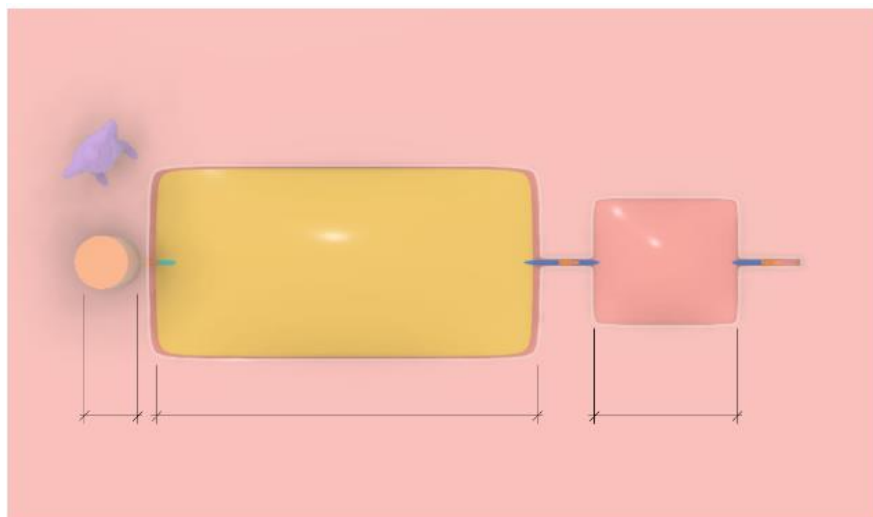


Figura 20. Diseño 3d del sistema del micro biodigestor ensamblado, vista cenital.  
Elaboración propia.

#### 2.2.1.2. Manufactura física

Para fabricar el biodigestor, luego de haber realizado el trabajo de planimetría y diseño tridimensional de cada componente del micro biodigestor, se planteó trabajar con una fábrica de confección que pueda desarrollar el diseño realizado. Basado en los diferentes parámetros de diseño revisados en la sección 2.3.1 sobre los componentes del micro biodigestor, se plantea que según la influencia del entorno en el diseño del sistema de biodigestión, los tipos materiales con los cuales se puede construir un biodigestor de tipo rural según la tabla 1, que puede ser cemento, plásticos o geomembranas, y según las capacidades internas y las condiciones climáticas de los ambientes extremos, se definió la **geomembrana de Polietileno de Alta Densidad** o HDPE porque **soporta altas temperaturas y químicos**, además de ser **reparable** por termofusión, para ello se identificó un **proveedor nacional** que tiene la capacidad de fabricación. Además, basado en la adaptación al

traslado y al ambiente que debe tener el sistema de micro biodigestión y dado el formato de trabajo de la fabricación de las planchas de geomembrana, se determina que tenga un **formato rectangular** para aprovechar toda la manga de geomembrana, facilitar el doblado y embalaje de la bolsa. Finalmente, basado en el material de la bolsa del biodigestor, se requirió que sea una geomembrana flexible de **HDPE de al menos 1500 micras**. Se define este material tiene propiedades **contra la radiación UV, químicos** y cambios de temperatura, por ende, tiene una vida útil de al menos 20 años. Además, es **reparable mediante termofusión o parchado** y es **reciclable** una vez terminada su vida útil. Todo lo anterior, buscó que sea un producto **resistente, duradero y amigable con el medio ambiente**, para evitar que falle por mala manutención o incidentes varios.

Dado que el reactor ideal es el tubular de geomembrana, según la tabla 1. Esto indica que hay que definir el diseño de la bolsa y el tipo de geomembrana para fabricarlo. Para la fabricación se buscó una empresa que desarrollara su propia materia prima, en este caso HDPE, en base a lo anterior se contactó a Polytex S.A., fábrica nacional de geomembranas flexibles que cumplen con las normativas ISO 9001, ISO CASCO 5, lo que permite contar con la seguridad que se busca del micro biodigestor. Por su parte, esta empresa solicita la planimetría para la confección pues además de fabricar las geomembranas cuenta con un taller de armado donde se realizan piezas especiales para los clientes, en ese caso para el sistema de micro biodigestión. Una vez validado por el gerente de operación, se realizó la primera versión de una bolsa de 700 litros, con 3 metros de largo y 1,5 de ancho, llegando a 50 centímetros de altura una vez lleno de agua. La geomembrana utilizada fue de 1500 micras de espesor. Una vez fabricado sirvió como prueba de concepto. En la imagen 1 se puede apreciar una fotografía del proceso de fabricación de la bolsa del reactor.



Imagen 1. Fotografía del tanque reactor de geomembrana de HDPE.

Para la bolsa del reactor se utilizó una forma rectangular y con volumen de paralelepípedo plano, en ese sentido se planteó un 90% de volumen útil, separando el espacio para el gas en otro contenedor que permitirá su acumulación. La razón de separar las fases líquida y gaseosa en diferentes contenedores o bolsas es para darle mayor control al manejo de cada material. Además, la forma de la bolsa del reactor permite mayor contacto al líquido interno con la pared superior, pues tiene baja altura y tiene mayor largo y ancho, de tal forma que aprovecha la superficie superior como captador de calor solar.

Para el receptor de sustrato, alimentador o tanque de equalización y mezclado, se planteó un contenedor cilíndrico de HDPE de 10 mm de espesor, con tapa, donde se busca manipular el sustrato previo a su ingreso al reactor, según se muestra en la imagen 2. Además, este tanque de alimentación está en mayor altura del suelo lo que permite que entre fácilmente al reactor por la diferencia de pendientes.



Imagen 2. Fotografía del Alimentador o tanque de mezclado.

Se definió un sistema de filtrado de biogás con tubos de HDPE de 25mm de diámetro que conectan la salida de biogás del reactor con la entrada de la bolsa de acumulación de biometano. Esta línea de tubería cuenta con una válvula de alivio de presión, un filtro para retener el ácido sulfhídrico y un decantador para retener la humedad del biogás. Cuando el biogás pasa por el sistema de filtrado se obtiene biometano, que se acumulará en su contenedor.

Finalmente, se trabajó con proveedores y fabricantes nacionales para contar con la capacidad técnica de producción del sistema de biodigestión y no depender de proveedores o técnicos extranjeros, pues encarecen la solución y la ralentiza.

### 2.2.2. Fabricación del sistema de monitoreo

En esta sección se define cómo se diseñó el sistema monitoreo, qué se decidió usar para sondas y microcontroladores, detalles de ficha técnica, diagrama del circuito y la programación.

### 2.2.2.1. Esquema de circuito

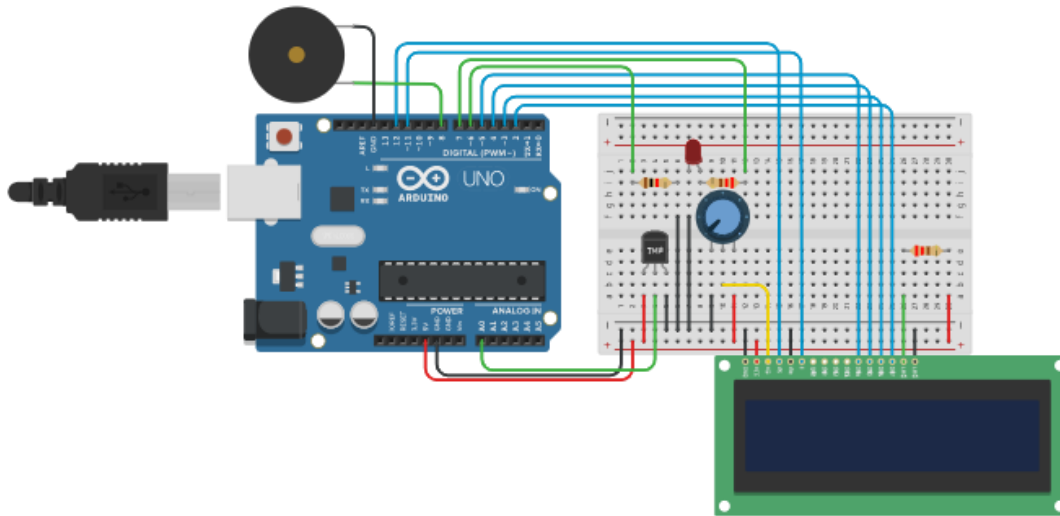


Figura 21. Esquema simple de Circuito Electrónico creado en TinkerCad.

### 2.2.2.2. Placa y diagrama del circuito

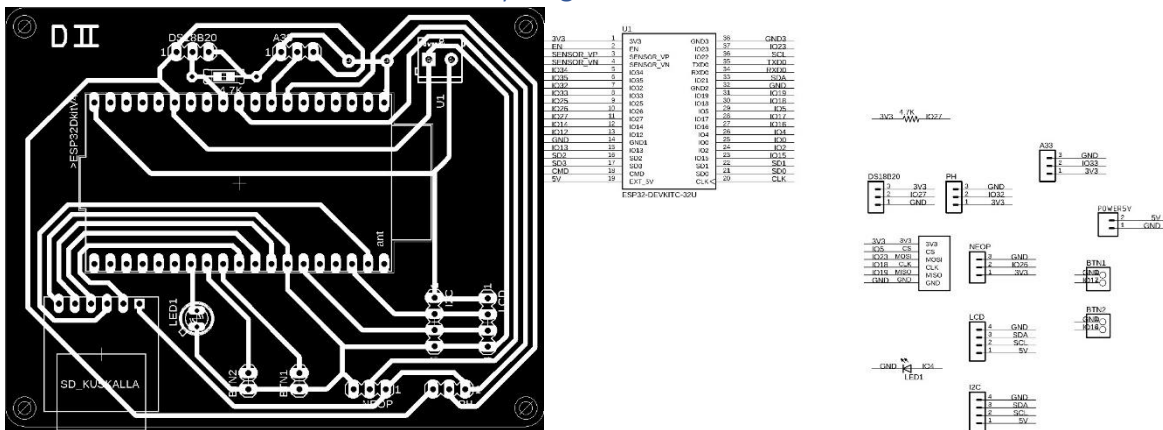


Figura 22. Diagramas de circuito. Sistema conceptual electrónica.

### 2.2.2.3. Manufactura electrónica

Para la manufactura del sistema de monitoreo, según los elementos descritos de la sección 2.1.5.1. y los parámetros de medición definidos en el subcapítulo 1.4.3., se define a modo general el uso de una caja estanca grande para contener todo el circuito del sistema, una placa electrónica central que integre todos los componentes del circuito, una tarjeta SD como elemento de almacenamiento de datos, una pantalla LCD con luces led como elemento de visualización e interacción con el usuario, y sondas de pH, temperatura y EC para medición y captura de datos. Se definen también accesorios complementarios tales como un soporte de sondas para asegurar un buen funcionamiento de las sondas dentro del reactor y una fácil mantención, un router de wifi como componente de transmisión de datos, y finalmente un regulador de voltaje, panel fotovoltaico y batería para resguardo y autonomía energética del sistema. Para el desarrollo de este sistema se utilizan diferentes softwares, y el código del sistema de monitoreo incluye el almacenamiento y visualización de datos en origen, la conexión a internet, el envío de datos y la visualización de estos en una

plataforma web. A continuación, un detalle de cómo se manufacturó cada elemento, en qué material, con qué máquina se hizo el hardware y con qué programa se hizo el código.

Se define utilizar una tarjeta de desarrollo con un microcontrolador ESP32, pues cuenta con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, ofrece pines digitales, ADC, DAC y varios buses de conectividad alámbrica. Trabaja con un voltaje de alimentación de 5 V mediante USB y tiene un procesador de 2 núcleos.

Se define utilizar una sonda digital, Sensor Temperatura Ds18B20 con cable de 2 metros, pues tiene una termocupla de acero inoxidable, es resistente a los líquidos, tiene una fácil lectura a través de I2C, su rango de alimentación es de 3 V a 5 V. Mide temperaturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $+125^{\circ}\text{C}$ , con precisión en el rango de  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  y un error de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Se define utilizar una sonda análoga, sensor de pH Gravity Industrial Pro-Kit V2 con cable de 5 metros que también mide temperatura, pues tiene un rango de medición entre 0~14 de pH con una sensibilidad de  $\pm 0.1\text{pH}$  (a  $25^{\circ}\text{C}$ ). Además, dado que los sensores de pH dependen de la temperatura, el rango de lectura es entre  $0^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ . Este sensor requiere calibración al momento previo y durante la implementación, el cual se realiza con un kit de soluciones de concentraciones con pH 4, 7 y 10. Como alternativa, también se define una sonda análoga que mide simultáneamente, pH, temperatura y ORP, de la marca Atlas Scientific, pues tiene rangos de pH entre 0 a 14, ORP entre -2000 y 2000mV y Temperatura entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $99^{\circ}\text{C}$ , con una precisión  $\pm 0.002\text{pH}$ ,  $\pm 1\text{mV}$  para ORP y de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  para temperatura. Tiene una comunicación de datos a través de SMA y tiene un cable de 3 metros. Tiene una vida útil de 4 años. Este sensor requiere calibración al momento previo y durante la implementación, el cual se realiza con un kit de soluciones de concentraciones para calibrar.

Se define una sonda para Electro conductividad, con el sensor industrial de Atlas Scientific K1.0, con un rango de medición entre 5 y 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ., con una precisión de  $\pm 2\%$ . Esta sonda funciona entre los rangos de temperatura  $0^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ , tiene un cable de 3 metros de largo y una vida útil de aproximadamente 10 años. Debido a que las sondas de conductividad no tienen ningún electrolito que se agote, solo es necesario calibrarlas durante la implementación.

Se define un soporte estructural interno para las sondas que va dentro del tubo de medición, según se muestra en la figura 23, donde se incluye un tapón de silicona para cerrar el tubo. El objetivo es mantener los sensores en una posición vertical y libre de contacto directo con los sedimentos que se encuentran en el fondo del reactor.

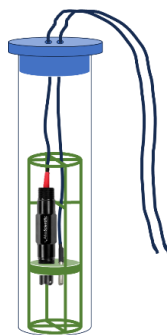


Figura 23. Esquema y diseño 3D de soporte de sondas.

Se define un sistema de visualización y alerta mediante una pantalla LCD led de 16 x 2 caracteres, más una luz led, que permitan emitir las respuestas según la tabla de matriz de decisión. Por otra parte, para el almacenamiento interno de los datos se incorpora un componente de tarjetas SD con una tarjeta de 5 Giga bytes de capacidad, para guardar los datos capturados por las sondas.

Se utilizó un sistema de alertas tempranas basado en una matriz de decisión para el operador, que incluye restricciones y rangos de parámetros de operación, en particular de la temperatura interna del reactor y del pH del reactor, para que el sistema de monitoreo muestre los datos de la operación continuamente y en caso de que estos parámetros se encuentren fuera del rango deseado según literatura, este sistema de monitoreo muestre un mensaje con una sugerencia sobre qué decisión tomar.

Se define un sistema de conexión a internet basado en la instalación de un Router de Wifi con la incorporación de un chip de telefonía móvil, dado que la señal telefónica es masiva incluso en lugares remotos, lo que permite generar un foco de wifi en el lugar de la implementación. Se espera obtener conexión y visualización remota de los datos de las sondas, para supervisar y apoyar las decisiones de operación.

Se define un sistema resguardo energético mediante un panel fotovoltaico de 30 a 50 Watts, un regulador de carga para paneles de 10 amperes con 12/24V y una batería de ciclo profundo de 12V con una corriente de 9Ah, para proveer electricidad a las sondas, el microcontrolador y el Router, de forma que sea un sistema de monitoreo autónomo energéticamente. Se estima que el consumo eléctrico es de 10W.

#### 2.2.2.4. Programación

Para la programación del sistema de monitoreo se considera que incluya un sistema de adquisición y procesamiento de los datos capturados por los sensores, este proceso se denomina cuantificación, y se realiza mediante un conversor analógico/digital, dado que el sensor es un dispositivo diseñado para captar un estímulo de su entorno y traducir esa información que recibe. Esa información recibida se convierte a un impulso eléctrico que luego se procesa en la programación para poder verlo como dato e información. Una vez adquirido y procesado el dato, la programación considera el registro y almacenamiento de los datos de funcionamiento del biodigestor basado en las sondas. Además del registro y levantamiento de los datos de la sonda, la programación incluye el registro del día, hora y minuto de la adquisición de los datos, para referenciar la captura. La programación también incluye la transmisión y conexión a internet, por donde se envían los datos en paquetes de información, cada 2 minutos a un repositorio en línea alojado en un servidor de la universidad, vinculado a una plataforma virtual donde poder acceder a visualizar y descargar los datos, en este caso la plataforma es <https://makayabiodigest.web.app/>. Finalmente, en la programación se incluye una sección para visualizar la información en la pantalla LCD que estará en terreno, para lo cual se trabaja en el procesamiento de los datos basado en la Matriz de Decisión creada según la tabla 20, donde se muestra el mensaje y se enciende la luz correspondiente al dato de pH y temperatura adquirido en tiempo real. Para revisar el código de programación se puede acceder al repositorio de documentación de GITHUB.

Para la programación se utilizó el programa Arduino. Para la fabricación de la placa, el cableado, soldadura y testeo de calidad se utilizó el equipamiento de los laboratorios de manufactura del Centro de Investigación en Tecnología para la Sociedad (C+) de la Facultad de Ingeniería. Entre ellos

se fabricó la placa en la máquina Wazer y se imprimieron piezas 3D en una máquina Ender 3. Las piezas electrónicas, como cableado, resistencia y otros son comprados a proveedores extranjeros. La caja estanca con pantalla LCD, entre los componentes del sistema, se debe crear un soporte dentro de la caja estanca para fijar la placa y el resto de la electrónica, además en la parte frontal de la caja, se incrustará la pantalla LCD para visualizar los datos y mensajes hacia el operador.

### 2.2.3. Integración del sistema completo

En esta sección se muestra el sistema micro biodigestor incluido el sistema de monitoreo, contemplando todos los elementos descritos en los apartados anteriores. A continuación, se numeran los elementos del sistema completo que se muestran en la figura 24, ilustración 3D creada con el programa Google SketchUp.

- A. Tanque Alimentador
  - B. Tanque Reactor
  - C. Tanque almacenamiento Biol
  - D. Tanque almacenamiento Biometano
  - E. Bodega y baldes
- 
- 1. Válvula de carga alimentador
  - 2. Tubo de muestreo reactor
  - 3. Tubo de sensores reactor
  - 4. Válvula de descarga biol
  - 5. Válvula de emergencia línea de gas
  - 6. Caja estanca sistema de monitoreo
  - 7. Filtro de biogás
  - 8. Línea de biogás
  - 9. Válvulas de manejo de presión
  - 10. Válvula de descarga de humedad
  - 11. Válvula de descarga de humedad
  - 12. Panel fotovoltaico
  - 13. Válvula conexión bolsa biometano
  - 14. Tubo de descarga de biometano

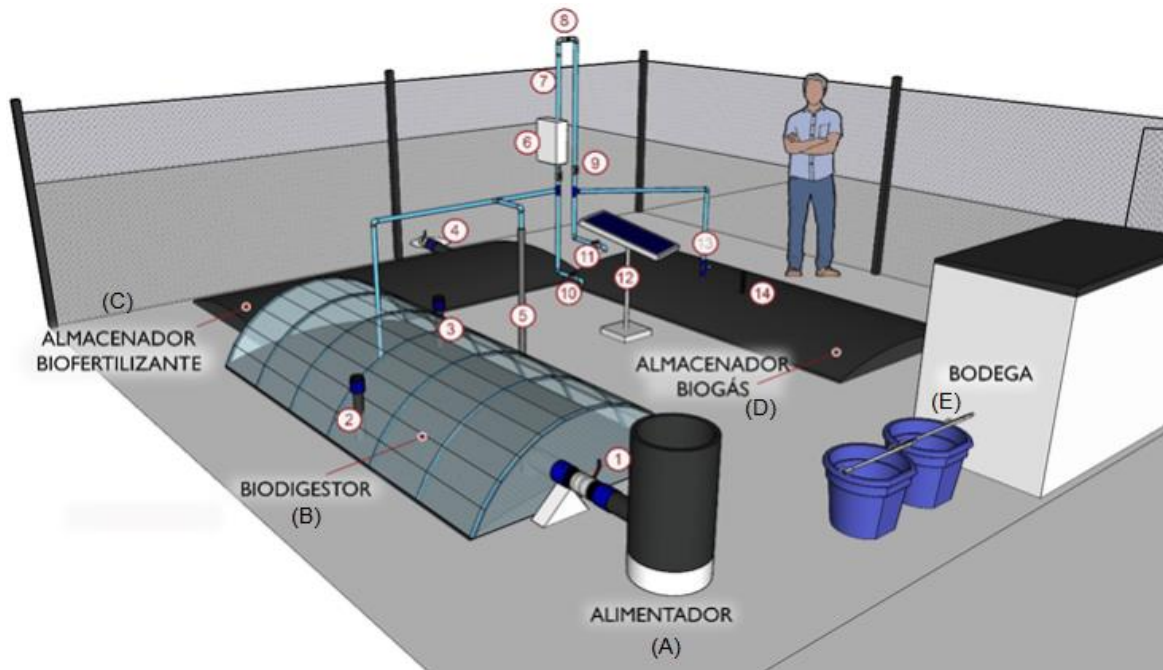


Figura 24. Representación 3D del sistema integrado de micro biodigestión sensorizado. Elaboración propia.

### 3. Implementación en terreno

Este capítulo se centra en la fase crucial de implementación de la investigación, donde se ejecutará el despliegue de los micro biodigestores sensorizados en las zonas extremas de Chile con el objetivo principal de producir bioinsumos. La implementación es el punto de confluencia donde la planificación estratégica y la aplicación práctica se encuentran para materializar la visión de este estudio. En este capítulo, se detallará minuciosamente el proceso de instalación de los biodigestores en ubicaciones geográficas específicas, considerando las particularidades ambientales, climáticas y geográficas de estas regiones extremas. Asimismo, se describirán los sistemas de monitoreo y sensores utilizados para la recopilación de datos en tiempo real, los procedimientos de puesta en marcha y las estrategias de gestión de operación y mantenimiento necesarias para garantizar la eficiencia y sostenibilidad a largo plazo del proyecto.

A través de la implementación, se busca dejar capacidad técnica instalada, y esa capacidad incluye infraestructura y conocimientos. La implementación incluye capacitaciones hacia la comunidad para que el proyecto pueda sostenerse en el tiempo, que sea robusto y fácil de usar, para que sea beneficioso y se mantenga una correcta operación y mantención.

#### 3.1. Identificación de zonas de prueba

En este primer apartado de la fase de implementación, se abordará la elección de las zonas extremas de Chile, con un enfoque particular en Mamiña, ubicada en el norte extremo, y Puerto Natales, en el sur extremo, como sitios estratégicos para la aplicación de los micro biodigestores sensorizados en la producción de bioinsumos. La selección de estas ubicaciones no es fortuita, sino que se fundamenta en una evaluación simple de diversos factores que respaldan su elección. A lo largo de este capítulo, se profundizará en las razones que respaldan la selección de Mamiña y Puerto Natales, al mismo tiempo que se explorarán sus condiciones ambientales singulares. Se analizarán en detalle las características climáticas, geográficas y ambientales de estas zonas extremas, destacando cómo estas condiciones no solo plantean desafíos, sino también oportunidades significativas para la implementación exitosa de los biodigestores y la producción sostenible de bioinsumos.

##### 3.1.1. Factores de selección

Estos factores indican la viabilidad para elegir Mamiña en el norte extremo y Puerto Natales en el sur extremo de Chile como ubicaciones para la aplicación de los micro biodigestores sensorizados en la producción de bioinsumos.

- A. Disponibilidad de materia prima: La presencia de residuos orgánicos o materiales adecuados para la alimentación de los biodigestores es un factor crítico. La evaluación de la disponibilidad y calidad de estos insumos influye en la elección de las ubicaciones.
- B. Condiciones climáticas: Las condiciones climáticas únicas en estas regiones extremas pueden influir en la eficiencia y la operación de los biodigestores. La temperatura, la humedad y las variaciones estacionales pueden ser factores clave a considerar.
- C. Impacto ambiental: La selección de ubicaciones en zonas extremas puede estar relacionada con la preocupación por el impacto ambiental y la necesidad de abordar problemas específicos en estas áreas, como la gestión de residuos orgánicos.

- D. **Potencial de producción:** Se considera el potencial de producción de biogás y bioinsumos en función de las condiciones locales, la cantidad de materia prima disponible y las necesidades de la comunidad.
- E. **Accesibilidad y logística:** La accesibilidad a las ubicaciones y la infraestructura logística, como el suministro de energía y agua, también pueden influir en la elección de las zonas.
- F. **Interés y necesidad de las comunidades locales:** La participación y el interés de las comunidades locales en la implementación de los biodigestores y la producción de bioinsumos pueden ser un factor importante en la toma de decisiones.

### 3.1.2. Mamiña: extremo norte de Chile

Se realizó la implementación en esta zona dado que se trabajó bajo el marco del proyecto Kuskalla, que determinó la necesidad de incluir un tratamiento de residuos para Mamiña, localidad ubicada en la comuna de Pozo Almonte en la Región de Tarapacá. Esta localidad está a 2.8 km de la operación minera de Cerro Colorado, de la empresa BHP. En el Censo del 2017, Mamiña contaba con una población de 1.076 habitantes, donde conviven comunidades quechua y aymara, junto con una población no indígena. La Comunidad Indígena Quechua de Mamiña (CIQM), en el Línea Base de Medio Humano del 2019, realizado como parte del Estudio de Impacto Ambiental de Recursos Hídricos, identificó una población Indígena actual en Mamiña de 363 personas. En el mismo estudio, se identifica el número de socios de la CIQM en 222 personas. Desde el Censo del 2002 se ha registrado un aumento en la población de Mamiña en un 49%, con la proporción de hombres superando el 77% del total.

Mamiña es un pueblo con una extensa historia agrícola-ganadera. Desde tiempos prehispánicos se ha cultivado en el valle y las quebradas, por medio de sistemas de terrazas en donde el agua es conducida por medio de acequia y el riego es por inundación. Los habitantes tienen una economía basada en el cultivo intensivo, bajo riego, de alfalfa y hortalizas. A continuación, se muestran los factores de viabilidad que fueron revisados:

#### A. Disponibilidad de materia prima

Los habitantes tienen una economía basada en actividades agropecuarias. Entre ellos están la ganadería y la agricultura. Por otra parte, existen varios hoteles y zonas de descanso donde tienen casino para recibir turistas y/o trabajadores de la mina. De lo anterior, se desprende la generación de residuos orgánicos que existe en la localidad, donde las principales fuentes son la ganadería y el comercio, siendo los guanos y los restos de fruta y verdura el mayor volumen de residuos generados, ideales para su aprovechamiento con tratamientos de valorización mediante biodigestión.

#### B. Condiciones climáticas

Mamiña está ubicada a unos 3 mil metros de altura sobre el nivel del mar y tiene un clima desértico. Las temperaturas varían significativamente entre el día y la noche, con mínimas que llegan a 0°C durante la noche y máximas que superan los 30°C durante el día. Estas condiciones climáticas únicas pueden influir en la eficiencia y la operación de los biodigestores. En específico, basado en datos meteorológicos, el mes más cálido (con el máximo promedio de temperatura alta) es Noviembre

(24.1°C). El mes con el promedio de temperatura alta más bajo es Julio (21.3°C). El mes con el promedio de temperatura baja más alto es Febrero (15.1°C). El mes más frío (con el promedio de temperatura baja más bajo) es Julio (9.2°C).

La escasez hídrica de la zona también es un factor relevante, el mes con la humedad relativa más alta es Febrero (58%). El mes con la humedad relativa más baja es Agosto (35%). El mes más húmedo (con la precipitación más alta) es Febrero (18mm), puesto que está cercano a Bolivia y le llega el invierno boliviano. Los meses más secos (con la precipitación más baja) son mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (0mm). El mes con el número de días lluviosos más alto es Febrero (10.5 días). El mes con el número de días lluviosos más bajo es Agosto (0 días).

#### C. Impacto ambiental

Hoy existe un conflicto entre la comunidad y el Municipio, quien está a cargo de la gestión de los residuos, debido a que estos son retirados y llevados a una quebrada ubicada en Mamiña, la cual es considerada por sus pobladores como un lugar patrimonial. La comunidad ha solicitado una solución, por lo que se está evaluando un nuevo vertedero. Además, no existe la práctica de una recuperación de los residuos orgánicos, lo que podría tener un impacto ambiental significativo. Por otra parte, la práctica actual de fertilización es en base a aplicación de guano directo y/o urea, lo que conlleva ciertos impactos negativos ambientales, que pueden ser mitigados mediante un tratamiento adecuado de valorización.

#### D. Potencial de producción

Dado los distintos tipos de residuos orgánicos generados y la cantidad generada por la población, se identifica un gran potencial de producción de bioinsumos pues disponen de la materia prima y también se identifica la disponibilidad de terreno para poder implementar un sistema de valorización en origen. Es decir, teniendo la materia prima, la infraestructura y capacitaciones, se cumplen los requisitos para tener una producción continua de bioinsumos. Basado en el diseño del proyecto, se podrían producir 20 litros de bioinsumo concentrado diariamente, con un potencial de cerca de 600 litros mensualmente.

#### E. Accesibilidad y logística

Mamiña está ubicado a 67 km al este de la ciudad de Pozo Almonte. Su acceso es directamente desde el camino de Pozo Almonte y solo existe transporte privado, basado en autos y buses que suben a Mamiña desde Iquique. La zona remota impide que tenga una conectividad directa con proveedores y otros servicios, generando una falta de recursos locales. Dado lo anterior, es conveniente desarrollar un sistema de tratamiento y valorización de residuos en origen para evitar traslados de residuos hacia fuera de la localidad, además de evitar el transporte de insumos agrícolas hacia la zona.

#### F. Interés y necesidad de las comunidades locales

Dentro de las diferentes asociaciones, se destaca la Asociación Agropecuaria Indígena de Mamiña, que cuenta con cerca de 30 agricultores y ganaderos, de los cuales solo 15 están activos. De ellos, 5 participan en el piloto de micro biodigestión, cada uno con diferentes roles. Actualmente, la Asociación es representada por Fermín Mamani, quien indica que la poca accesibilidad a la localidad y los altos costos de fertilizantes agrícolas ha generado una sensación de necesidad de nuevas fuentes de bio insumos, por lo que demuestran interés en participar del proyecto de biodigestión

para autogestionar los residuos y producir sus propios bio fertilizantes. Finalmente, la comunidad indica la disponibilidad para participar en talleres, capacitaciones y operación del proyecto.

### 3.1.3. Puerto Natales: extremo sur de Chile

Esta zona se seleccionó debido a una oportunidad del laboratorio C+ en el contexto del Nodo Magallanes, donde una empresa de la zona requería de un tratamiento para valorizar sus desechos productivos, entre ellos estiércoles ovinos. Puerto Natales es una ciudad de la comuna Natales ubicada en la Patagonia Chilena, en la Región de Magallanes. Esta ciudad puerto, está a 247 kilómetros al norte de Punta Arenas, la capital regional. En el Censo del 2017, Natales contaba con una población de 21.477 habitantes. La población masculina es del 51,2%, mientras que la femenina es del 48,8%. En cuanto a grupos etarios, el 20,62 % de la población es menor de 15 años, un 28,17 % tiene entre 15 y 34 años, seguido de un 33,36 % de población entre los 35 y los 59 años, para finalizar en un 17,85 % de población por encima de los 60 años, según datos del INE y la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Históricamente, el rubro que entregó trabajo a los habitantes fue el frigorífico, que aportó en el desarrollo económico de Puerto Natales y de la toda la Patagonia. En 1917 la Compañía Frigorífica de Puerto Natales funda el Frigorífico de Puerto Natales, el cual daba vida y trabajo al puerto, al que recalaban buques mercantes los cuales llevaban a Europa la carne de ovino y vacuno.

A continuación, se muestran los factores de viabilidad que fueron revisados:

#### A. Disponibilidad de materia prima

En Puerto Natales, se trabajó junto al Frigorífico MacLean, una empresa que produce carnes de cordero, liebre y guanaco para consumo humano y por ende en cierta temporada del año genera grandes cantidades de guano animal proveniente del lavado de camiones, del corral donde esperan el ganado, la zona faenadora y residuos orgánicos del casino. Actualmente, estos desechos son canalizados y tratados para ser descargados en alcantarillado que finalmente llegan a la planta de tratamiento de aguas de la comuna. También cuentan con fuente directa de agua caliente y fría que utiliza para sus operaciones, por lo tanto, la empresa cuenta con la disponibilidad de materia prima para los biodigestores.

#### B. Condiciones climáticas

Puerto Natales está ubicada a la altura del nivel del mar y al ser Patagonia tiene un clima templado a frío. Las temperaturas varían significativamente entre el día y la noche, en promedio con mínimas que llegan a -10°C durante la noche y máximas que superan los 20°C durante el día. Estas condiciones climáticas únicas pueden influir en la eficiencia y la operación de los biodigestores. En específico, basado en datos meteorológicos, el mes más cálido (con el máximo promedio de temperatura alta) es enero (20°C). Los meses con el promedio de temperatura alta más bajo son junio y julio (5°C). El mes con el promedio de temperatura baja más alto es enero (8°C). Los meses más fríos (con el promedio de temperatura baja más bajo) son junio y julio (-3°C).

La lluvia se hace presente en la Patagonia, siendo lo opuesto al problema hídrico del norte extremo, el mes con la humedad relativa más alta es Junio (84%). El mes con la humedad relativa más baja es Noviembre (73%). El mes más húmedo (con la precipitación más alta) es Abril (39mm). El mes más seco (con la precipitación más baja) es Enero (8mm). El mes con el número de días lluviosos más alto es mayo (9 días). Los meses con el número de días lluviosos más bajo son agosto y noviembre (4

días). Por último, en la Patagonia hay presencia de nieve, el mes con el número de días de nevadas más alto es Julio (5 días). Los meses con el número de días de nevadas más bajo son enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre (0 días), según datos meteorológicos del Atlas Mundial.

#### C. Impacto ambiental

La generación de residuos y la falta de tratamiento adecuado, implica que existe un impacto ambiental negativo. Por otro lado, existe una necesidad de la empresa por valorizar dichos residuos ya que no solo son un problema ambiental, sino que también implica gastos de traslado, disposición final en el vertedero de la comuna e incluso multas cuando la descarga de líquidos en las alcantarillas está saturada de contaminantes. Además, tanto el vertedero como la planta de tratamiento de aguas de la comuna están operando al límite de su capacidad, donde más de una vez han tenido que negar el acceso a residuos, generando problemas sociales y ambientales. Finalmente, en la comuna no existe la práctica de una recuperación de los residuos orgánicos robusta, solo existe una planta de compostaje domiciliar, lo que podría tener un impacto ambiental significativo.

#### D. Potencial de producción

Dado los diferentes tipos de residuos generados en el Frigorífico MacLean, existe un gran potencial de producción de bioinsumos y/o biogás a partir de estos residuos. Por otra parte, el Frigorífico como tal cuenta con terreno apto para implementar una pequeña planta de valorización de residuos. También, dentro del personal, existe un equipo técnico capacitado y dedicado a la gestión de residuos, lo que permite realizar y sostener un proyecto de valorización en origen. Finalmente, el acceso directo a agua caliente permite mejorar el rendimiento y uso de un biodigestor para tratar residuos internos.

#### E. Accesibilidad y logística

Independiente de la ubicación geográfica extrema de Puerto Natales, la ciudad cuenta con múltiples accesos y vías de logística, llegando aviones, buses y embarcaciones a dicho lugar. El frigorífico está en el camino costero en la avenida Los Arrieros 1517, facilitando su acceso y permitiendo un correcto proceso de abastecimiento de insumos de todo tipo. El único factor relevante, es la presencia y abundancia de nieve y viento en ciertas temporadas del año, que impiden el transporte normal dentro de la ciudad. Hay que mencionar que para descartar los desechos actualmente, deben ser enviados al relleno particular del frigorífico que queda aproximadamente a 7 kilómetros de la planta productiva.

#### F. Interés de las comunidades locales

Dada la urgencia y los costos de la gestión actual de residuos, la empresa se ve muy interesada en probar diferentes soluciones para el tratamiento y valorización de dichos residuos. En particular, se muestra interés en tratar los residuos provenientes de los corrales cuando están en temporada de producción de carne de cordero, pues generan en promedio más de 100 litros de guano diariamente. Además, la oportunidad de producir y comercializar fertilizante les parece muy provechoso, dado que podrían generar un ingreso de un desecho que actualmente solo genera gastos.

### 3.2. Instalación de los micro biodigestores

La fase de implementación de este proyecto es esencial para llevar a cabo con éxito la aplicación de los micro biodigestores en las localidades de Mamiña y Puerto Natales, en las regiones extremas de Chile. En este nuevo subcapítulo, se detallarán las actividades clave relacionadas con la instalación

de los micro biodigestores. Esta etapa se divide en dos aspectos fundamentales: la preparación del terreno y el ensamblaje de los biodigestores. La preparación del terreno implica la adecuación del espacio físico y las condiciones necesarias para albergar los biodigestores, mientras que el ensamblaje se enfoca en la construcción y configuración de estos sistemas. Ambas actividades son de suma importancia, ya que sientan las bases para el funcionamiento eficiente y efectivo de los biodigestores en el contexto de las condiciones ambientales y las necesidades específicas de estas localidades extremas. A lo largo de este subcapítulo, se explorarán los procesos y consideraciones clave que guían la instalación de los micro biodigestores en Mamiña y Puerto Natales, destacando la importancia de cada paso en la consecución de los objetivos de este estudio.

### 3.2.1. Preparación del terreno

A continuación, se entrega la información sobre las actividades necesarias para acondicionar el terreno, garantizando una base sólida y adecuada para la ubicación de los biodigestores. Exploraremos factores como la topografía, la accesibilidad y la disponibilidad de recursos impactan en esta fase esencial, y cómo se abordan las particularidades de las condiciones extremas en estas regiones.

### 3.2.2. Evaluación del sitio

Se realizó una evaluación simple de los sitios seleccionados en Mamiña y Puerto Natales para determinar la ubicación más adecuada para la instalación de los biodigestores, considerando factores como consideraciones ambientales, la accesibilidad y la cercanía a las fuentes de recursos. Para definir límites, en aspectos topográficos se buscaba un lugar con:

#### A. Consideraciones ambientales:

Evaluar las implicaciones ambientales y reglamentaciones locales para garantizar el cumplimiento de los requisitos ambientales y permisos necesarios.

- Exposición solar la mayor cantidad de horas al día.
- Suelo plano, pero con una leve pendiente de no más de 5°, pues permitirá instalar las bolsas del micro biodigestor con un desnivel y actuará el rebalse como medio de traspaso de bolsas.
- Resguardado del viento directo, es decir que los lugares ventosos, buscar al menos 2 paredes que rodeen al sistema, a más de 6 metros de distancia para respetar la normativa de seguridad de plantas de biogás.
- Distancia de caminos de agua que puedan generar un cauce y con él un desplazamiento del sistema.

#### B. Accesibilidad y recursos:

Verificar que haya acceso adecuado a recursos como agua y energía, que son esenciales para el funcionamiento de los biodigestores.

- Espacio mínimo de 6 x 6 metros cuadrados.
- Camino de acceso establecido, que contenga al menos una vía de entrada y salida donde pueda transitar una persona.
- A no más de 100 metros de una toma agua, para facilitar el acceso a una llave que permita el acceso directo.
- A no más de 100 metros de la fuente del residuo, para facilitar el traslado.

- Distanciamiento de otros lugares destinados a alimentación, como casinos, o destinados a descanso, como plazas o patios comunes de la comunidad.
- Debe estar cerrado por reja o muros cercanos, sin embargo, la construcción más cercada debe estar a más de 6 metros para respetar el distanciamiento que propone la SEC para biodigestores.



Imagen 3. Fotografía de terreno seleccionado en Puerto Natales

### 3.2.3. Acondicionamiento del suelo

Se preparó el terreno asegurando que esté nivelado y compacto para proporcionar una base sólida para los biodigestores, según se muestra en la imagen X. A continuación, los pasos de acondicionamiento:

- A. Medición del lugar de implementación: En el lugar de implementación se tomarán medidas con hinchas de medir sobre el terreno y se marcará con un tizador (tiralíneas de tiza) la zona para cada módulo del reactor, luego se debe posicionar el sistema y revisar que esté bien marcado. Una vez validado, se procede al siguiente paso.
- B. Remoción de tierra: En el sector del terreno que marca la posición del módulo reactor, se deberá soltar la tierra con un chuzo para luego, entre 2 personas con palas y una con carretilla, se sacará una profundidad de 30 centímetros de tierra en un área de 3 metros x 1,5 metros.
- C. Nivelación de superficies: Para terminar, se deberá nivelar todo el sector específico donde estará implementado el sistema de biodigestión, incluyendo el tubo y las 3 bolsas.



Imagen 4. Fotografía de la implementación en Mamiña.

#### 3.2.4. Instalación y ensamble

A continuación, se entrega la información sobre herramientas de trabajo, artículos de seguridad y materiales necesarios para instalar y ensamblar todos los módulos del sistema de micro biodigestión. Además, se entregan las instrucciones paso a paso de instalación del sistema completo. Para lo anterior fue necesaria la Adquisición de equipos, herramientas y materiales, detallados en la tabla 21. Adquirir todos los componentes necesarios, incluidos los biodigestores, sensores, tuberías, y sistemas de recolección y almacenamiento de biogás.



Imagen 5. Fotografía de la implementación en Mamiña.

Herramientas de trabajo	Artículos de seguridad	Materiales de construcción
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 palas con mango de plástico</li> <li>- 1 chuzo</li> <li>- 1 carretilla</li> <li>- Desatornillador</li> <li>- Taladro</li> <li>- Alicata</li> <li>- Caimán</li> <li>- Sierra</li> <li>- Tijeras</li> <li>- Encendedor</li> <li>- Baldes de 20 litros</li> <li>- Palo para revolver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Guantes</li> <li>- Zapatos de seguridad</li> <li>- Lentes de seguridad</li> <li>- Mascarillas</li> <li>- Overoles</li> <li>- Protector solar</li> <li>- Gafas de sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 listones de madera de 2x2 pulgadas y 6 metros</li> <li>- Lona de plástico de 4x4m<sup>2</sup></li> <li>- Silicona para altas temperaturas</li> <li>- Pistola Calafatera (de Silicona)</li> <li>- Bolsas de hdpe</li> <li>- Tubos de hdpe</li> <li>- Contenedor de hdpe</li> <li>- Cañerías de lpde</li> <li>- Mangueras de lpde</li> <li>- Conectores de hdpe</li> <li>- Reductores de resina</li> <li>- Conectores de acero</li> <li>- Válvulas tipo bola</li> <li>- Abrazaderas</li> <li>- Manómetros</li> <li>- Válvula de alivio con PVC</li> <li>- Válvulas de bola</li> <li>- Tubos de PVC para filtros de H<sub>2</sub>S y H<sub>2</sub>O.</li> <li>- 200 gramos de Virutilla oxidada</li> </ul>

Tabla 21. Herramientas y materiales para la implementación.

### 3.2.5. Montaje de biodigestores

Ensamblar los biodigestores de acuerdo con las especificaciones del fabricante, asegurando una instalación segura, libre de fugas y con la pendiente necesaria.

- A. Conexiones: Lo primero será colocar todos los conectores de compresión de HDPE en el circuito del sistema. El primero es uno de 110mm que va conectado al tubo del contenedor de alimentación, luego se coloca la válvula de bola de 110mm en la rosca del conector. Lo siguiente es poner conector con rosca a la válvula para luego conectar con el tubo de alimentación del reactor con el mismo conector de compresión.
- B. Inserciones: Una vez realizadas las conexiones, se debe lubricar los tubos del reactor internamente, para luego introducir los tubos hacia el interior del reactor, dejando que entren al menos 25 centímetros. Esto para todos los tubos en la bolsa del reactor en su entrada y salida, además de los tubos medición.
- C. Conexiones y plomería: Configurar el sistema de plomería para la alimentación de residuos orgánicos y la recolección de biogás y biol, conectando adecuadamente todas las tuberías y sistemas de recolección.

- D. Montaje soporte de línea de gas: Se debe agregar una pequeña repisa en la reja actual para generar el soporte donde estará montada la línea de gas completa.
- E. Línea de gas: Una vez ensamblado el reactor, sus componentes y construido el soporte, se deberá ensamblar las partes de la línea del gas, que incluye, manómetros, válvulas de alivio, válvulas de bola, mangueras flexibles y tubos de Idpe, conectores, filtros de H<sub>2</sub>S y H<sub>2</sub>O. Para luego montar la línea en el soporte y conectarlo a las salidas de gas del reactor y acumulador de digestato, a la entrada de gas del acumulador de gas.



Imagen 6. Fotografía de la implementación y ensamble de los componentes del reactor en Mamiña.

Una vez implementado los sistemas de microbiodigestión, uno en Mamiña y otro en Puerto Natales, se determinó que se dará prioridad y énfasis en el sistema ubicado en Mamiña dado que la operación, capacitación y seguimiento del proyecto depende de visitas mensuales y trimestrales. Por lo tanto, a partir de este momento, este trabajo se enfocará en el caso de Mamiña, dado que el micro biodigestor se enmarca en un proyecto de relacionamiento comunitario que facilitó los traslados necesarios para el seguimiento. Lo anterior permite tener una profundización mayor sobre el análisis de la implementación y desarrollo del proyecto.

Una vez realizado el montaje y activación de ambos biodigestores, se determinó que solo será considerado para el presente trabajo el biodigestor de Mamiña dado que el proyecto Kuskalla facilitó las visitas y el seguimiento necesario por más de 2 años, sin embargo, no se pudo continuar con el proyecto de Puerto Natales por falta de recursos para realizar visitas.

### 3.2.6. Instalación de sensores y montaje de sistema tecnológico

Se utilizó un sistema de sondas que van introducidos dentro del reactor a través de un tubo especialmente diseñado para ello. Se utilizaron las sondas pH y Temperatura, se consideró preliminarmente la medición de EC dado que no se definió como parámetro de operación, pero si puede entregar información relevante de la dosificación del digestato para su posterior aplicación. Para calibrar y programar la lectura de los sensores se utilizó el programa Arduino. En la etapa de

integrar los sensores necesarios para la monitorización en tiempo real de los parámetros, como temperatura y pH para producción de biol, fue necesario asegurar los siguientes aspectos en terreno:

#### **A. Fuente de energía**

El sistema del panel solar incluye un marco de aluminio, un panel solar de 30W, una batería de 12V y un regulador de carga, más el respectivo cableado. Se ancló la caja del módulo del panel, con los componentes batería, regulador y cableado, a la estructura de soporte general. Por otra parte, se ancló el marco de aluminio con el panel a la reja circunda el terreno de la implementación. Una vez instalado y cableado el sistema completo, se empieza a revisar que el regulador de carga tenga conectado solo la batería, y que muestre la carga, luego se conecta el panel y automáticamente se regula al nivel de carga de la batería, entonces comienza a carga si está descargada. Una vez que funcione todo el circuito, se le pueden comenzar a conectar consumidores, como el sistema de monitoreo y el sistema de comunicación.

#### **B. Monitoreo**

Se tuvo que calibrar el sistema de sensores por última vez en terreno mediante el uso del computador, el software Arduino y las soluciones de calibración del sensor de pH.

Luego se instaló la placa madre del sistema de monitoreo en una caja estanca principal, que se anclará a la estructura general. Una vez calibrados los sensores, se desconecta el computador de la placa madre del módulo de monitoreo, dejándolo totalmente autónomo y configurado para tomar la lectura de los datos de pH cada 5 minutos y al mismo tiempo guardarlos en la tarjeta SD en formato txt y subirlo a la nube mediante el IoT (Internet of Things). Finalmente, se introducen los sensores en el tubo inferior del reactor, utilizando un soporte para sensores (mostrado en el esquema de la sección 2.1.3.), y un tapan de silicona que permite el paso de los cables, pero mantiene hermético el sistema. Además, es fácil de manipular para futuras mantenciones.

#### **C. Comunicación**

Se instaló un Router de telefonía con un chip prepago para generar una red de wifi dado que en Mamiña hay buena señal telefónica en el lugar de implementación. Se ancló la caja del módulo de comunicación, que incluye Router, cableado y antenas, a la estructura de soporte general. Para dejarlo funcionando se tuvo que activar el chip con la respectiva compañía y se dejó configurado el número telefónico con el Router. Finalmente, se dejó la señal de wifi con clave por temas de seguridad "bdg12345678".

#### **D. Activación general**

Configurar todo el sistema tecnológico y validar su funcionamiento y conexiones.



Imagen 7. Fotografía de la caja estanca con la electrónica del sistema de monitoreo y el sistema energético, incluido el regulador de carga y la batería.

#### E. Accesorio complementario

Además, se utilizó una estructura que sostiene las sondas dentro del reactor a 10 centímetros del suelo para evitar que las sondas estén en contacto directo con los lodos o sedimentos que se acumulan al fondo del reactor. Además, esta estructura está pensada para ser de fácil extracción y mantención. El tubo incluye un tapón de silicona que permite cerrar herméticamente el tubo y a la vez acceder fácilmente a éste para revisar, calibrar y realizar mantención a las sondas.

Una vez listo todo lo anterior, el sistema de monitoreo montado y activado, enviando datos. Se abrió uno de los tubos del reactor que son para muestreo y monitoreo, se introdujo el par de sensores y se tapó nuevamente con silicona y su tapa, según muestra la imagen 8.



Imagen 8. Fotografías del soporte de sondas y tapón de silicona.

### 3.2.7. Pruebas y ajustes

Realizar pruebas de hermeticidad mediante la inyección de aire para asegurarse de que los biodigestores funcionen correctamente. Por otra parte, se realizaron calibraciones cada visita para ajustar los parámetros según sea necesario para optimizar la producción de biol y la degradación de los residuos.

### 3.2.8. Construcción invernadero

En algunas zonas extremas, puede ser beneficioso construir un invernadero para proteger los biodigestores de las condiciones climáticas extremas. Incluso, el invernadero es útil también en la zona extrema del norte para ayudar a estabilizar y disminuir la oscilación térmica entre el día y la noche. La construcción del invernadero debe realizarse para permitir un adecuado acceso y ventilación para los biodigestores.

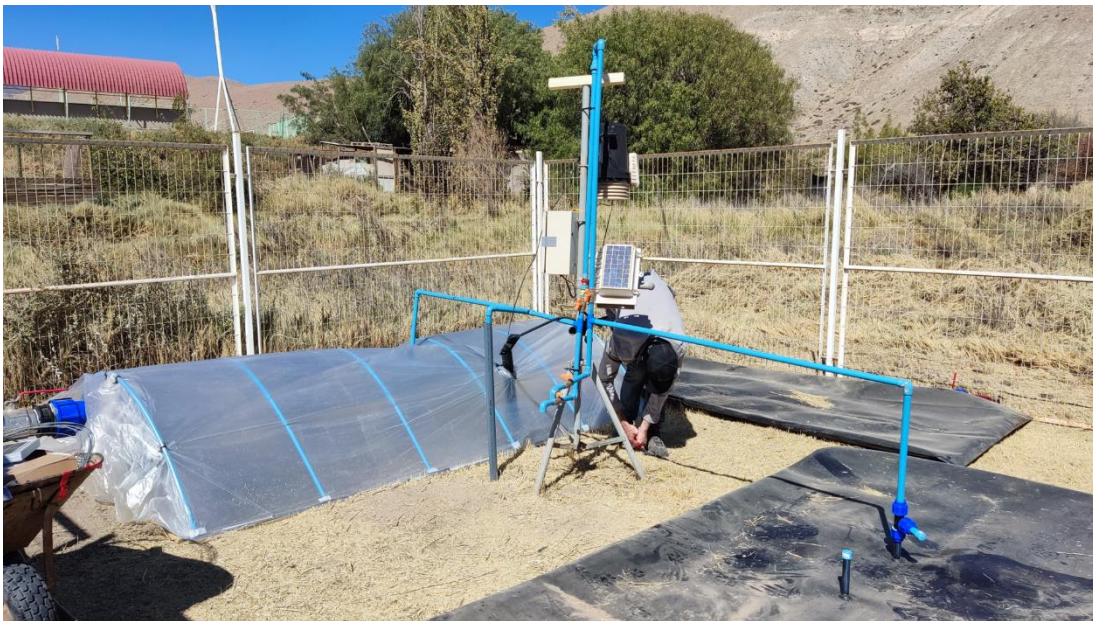


Imagen 9. Fotografía de la construcción del invernadero en Mamiña.

### 3.2.9. Documentación y registro

Llevar un registro detallado de la instalación, los procedimientos de operación y los resultados de las pruebas iniciales para fines de seguimiento y evaluación. Se ha documentado cada visita, lo que permite revisar los avances y cumplimiento de hitos.

## 3.3. Puesta en marcha y operación continua

En este capítulo, nos adentraremos en la fase crítica de la implementación de los micro biodigestores en las localidades de Mamiña y Puerto Natales, ubicadas en las regiones extremas de Chile. La puesta en marcha y operación continua representan el puente entre la instalación inicial de los biodigestores y la producción sostenible de bioinsumos a lo largo del tiempo. Aquí, se explorarán los procesos y consideraciones clave que rodean el inicio de la operación de los biodigestores, desde la activación inicial, la capacitación a la comunidad, hasta el monitoreo y mantenimiento continuo. Esta etapa es esencial para garantizar la eficiencia, estabilidad y longevidad de los sistemas, así como para maximizar la producción de biol y la transformación de los residuos orgánicos en valiosos

bioinsumos. En este capítulo se analizarán las estrategias de puesta en marcha, los protocolos de operación y los procedimientos de mantenimiento, centrados en la adaptación a las condiciones climáticas extremas y las necesidades de estas localidades remotas.

### 3.3.1. Activación con manejo de purines

La activación de un proyecto de biodigestión representa el punto de partida esencial en la ruta hacia la producción sostenible de bioinsumos. A lo largo de este subcapítulo, examinaremos las etapas clave de la activación, las estrategias de manejo de purines y las prácticas que optimizan la eficiencia del proceso. Se destacará la relevancia de este primer paso en la consecución de los objetivos de sostenibilidad y producción de bioinsumos en estas comunidades desafiantes. Para una adecuada activación se deben considerar los siguientes aspectos:

- Obtención de agua: Se debe utilizar una bomba sumergible para traer agua de la fuente más cercana hacia el lugar del reactor para llenarlo por completo, que son cerca de 700 litros.
- Recolección de purines: Se deben acumular 5 baldes de 20 litros de estiércol para obtener 100 litros de inóculo fresco.
- Mezcla: Se deben utilizar baldes de 20 litros para introducir 1/4 de estiércol, para ello se debe llenar con agua el balde hasta los 15 litros, luego se introduce estiércol hasta llegar a la marca de los 20 litros. Aportando 5 litros de estiércol por balde.
- Inoculación: Se deben incorporar 20 baldes de mezcla, o hasta acabar los 5 baldes de estiércol recolectados.



Imagen 10. Conjunto de fotografías del lleno del reactor y la activación con estiércol en Mamiña.



Imagen 11. Fotografía activación con estiércol biodigestor Puerto Natales.

### 3.3.2. Estrategia de seguimiento y mantenimiento

La implementación de micro biodigestores en entornos desafiantes como Mamiña y Puerto Natales es un proceso continuo que requiere una atención cuidadosa más allá de la fase inicial de puesta en marcha. Esta estrategia integra varios componentes clave, incluyendo capacitaciones regulares, definición de roles y gobernanza efectiva, y la generación de manuales e instructivos. Exploraremos cómo estas actividades se entrelazan para crear un enfoque integral de supervisión y cuidado de los sistemas, y cómo se adaptan a las condiciones únicas de estas localidades extremas. Se destacará la importancia de una gobernanza participativa y la distribución clara de responsabilidades para mantener una operación sostenible. Además, se analizará cómo la disponibilidad de manuales e instructivos proporciona orientación y referencia constante para los operarios locales, contribuyendo a la longevidad y eficiencia de los micro biodigestores.

### 3.3.3. Capacitación del personal local

Comprendiendo la situación de las comunidades de Mamiña, se define que era necesario generar capacidades que serán entregadas mediante un plan de capacitaciones y un plan de gobernanza, para transferir el conocimiento básico y técnico sobre el correcto manejo de residuos orgánicos y la operación del biodigestor. Además, se debe identificar a un líder operario, capaz de organizar reuniones con el equipo y a la vez que tenga capacidad técnica de manejar y mantener el sistema funcionando. Capacitar a los operarios locales en la operación y mantenimiento de los biodigestores, garantizando que estén preparados para operar y mantener los sistemas de manera eficiente. Estas

capacitaciones son de tipo teóricas y talleres prácticos: Transferencia de conocimientos de operación, mantenimiento y uso de biol líquido.

Se definieron 4 temáticas de capacitaciones teóricas/prácticas, a continuación:

1. Qué son los residuos y cuáles se pueden valorizar en el origen
2. Qué es un biodigestor y cómo funciona
3. Cómo mantener un sistema de biodigestor con sistema de monitoreo
4. Cómo se aplica el biol

Durante más de 12 meses se realizaron las siguientes 6 visitas y capacitaciones teóricas/prácticas:

- a. Capacitación técnica I: Temática: residuos, tratamiento mediante biodigestor y sensores. Realizada el 29 julio 2022, donde participan 3 miembros de la comunidad.
- b. Capacitación comunitaria I: Temática: residuos, tratamiento y biodigestor. Realizada el 18 agosto 2022, donde participan 5 miembros de la comunidad, según se muestra en la imagen 14. Para dicha capacitación, se realizó un Taller tipo gamificación de creación propia, con un tablero y fichas que se muestran en la imagen 12 y 13.
- c. Capacitación comunitaria II. Las temáticas fueron la activación, alimentación y mantenimiento del biodigestor. Se realizó el 11 octubre 2022 y participaron 5 miembros de la comunidad.
- d. Capacitación técnica II. Las temáticas fueron profundización en biodigestor y sensores. Realizada el 1 diciembre 2022, donde participaron 3 miembros.
- e. Taller I del Ciclo de Talleres. Temática: mostrar resultados, aplicación biol, reactivación y gobernanza. Se realizó el 12 septiembre 2023, donde participaron 4 miembros de la comunidad.
- f. Taller II del Ciclo de Talleres. Temática: mantenimiento reactor y sensores, extracción de lodos, aplicación biol. Se realizó el 8 noviembre 2023, donde participaron 5 miembros de la comunidad.

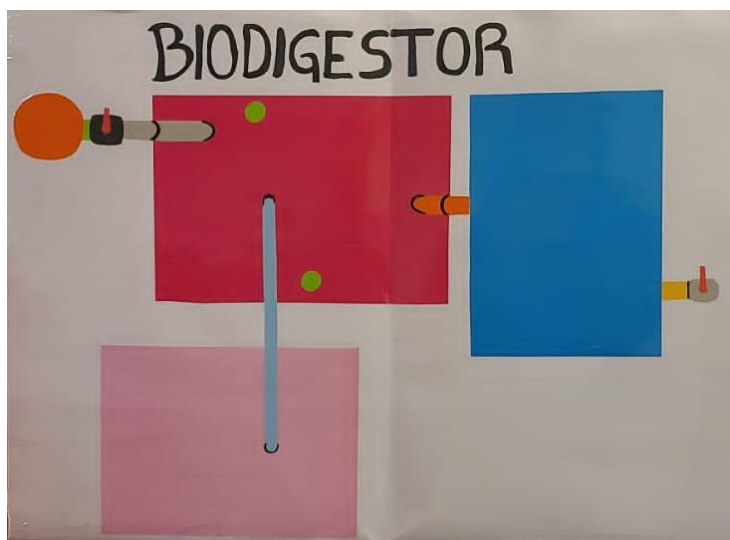


Imagen 12. Tablero de gamificación para taller de biodigestión.



Imagen 13. Fichas del tablero de gamificación para taller de biodigestión.



Imagen 14. Fotografía de la capacitación comunitaria I en Mamiña.



Imagen 15. Fotografía de la capacitación 1 comunitaria en Mamiña.

### 3.3.4. Definición de roles y gobernanza

La implementación exitosa de los micro biodigestores en las localidades no solo depende de la tecnología y los procesos técnicos, sino también de la colaboración eficiente y la distribución adecuada de responsabilidades. En esta sección se detalla cómo se distribuyen las tareas y responsabilidades entre los diversos actores involucrados, desde el personal local hasta los expertos en biodigestores, y cómo se establecen los mecanismos de toma de decisiones y supervisión. Además, se destacará la relevancia de una gobernanza transparente y participativa que involucre a las comunidades locales y promueva la apropiación de la tecnología por parte de todos los interesados. Se definió la utilización de un calendario para agendar la semana donde cada persona tendrá el rol de alimentar el biodigestor. Por otra parte, se define que debe quedar un canal de comunicación directo con la comunidad que será un grupo de chat de WhatsApp pues todos los participantes cuentan con dicha aplicación móvil.

Dentro de los roles identificados están:

- a. Líder: conocimiento técnico y práctico. Que se comunique con el resto. Que obtenga algún beneficio directo.
- b. Recicladores: separar lo compostable en sus propios hogares.
- c. Alimentadores: deben conocer lo básico de mezcla de residuos v/s agua e ir una vez a la semana según el calendario.
- d. Supervisor: rol externo de acompañamiento para dar seguimiento al equipo.

### 3.3.5. Registro de actividades

Se define que para llevar una operación correcta se debe registrar cada operación realizada, entre ellos el registro de la alimentación del biodigestor que se muestra en la imagen 16 y el registro de la cosecha o retiro de biol en la imagen 17, este último dado que la producción de biol se reparte entre los beneficiarios del proyecto.

Registro de la Alimentación del Biodigestor

Nombre operador	Día alimentación	Hora alimentación	Temperatura agua	Volumen de agua	Tipo residuo	Volumen residuos	pH mezcla

Imagen 16. Tabla de registro de alimentación del biodigestor.



## B. Manual de uso



Imagen 19. Portada del manual entregado para la comunidad de Mamiña.

C. Mantenimiento de la línea de gas: Se generó un documento simple de un manual sobre mantención de la línea de biogás.

D. Seguridad: Se definieron aspectos regulatorios y se de trabajo seguro.

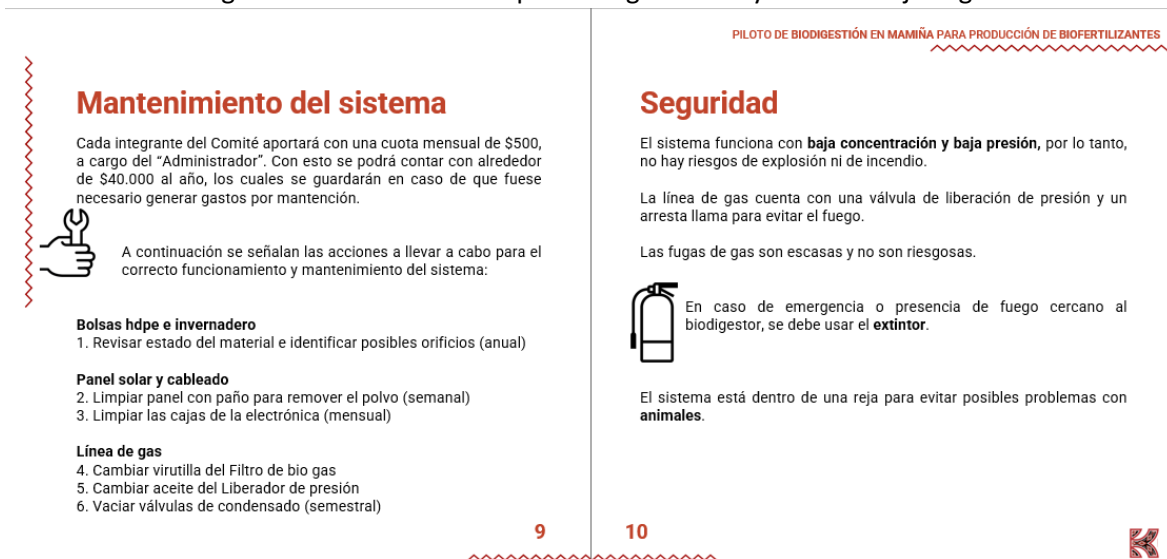


Imagen 20. Hojas del manual relacionadas al mantenimiento y seguridad del sistema.

### 3.3.7. Almacenamiento y Visualización de datos

Una vez montado todo el sistema de micro biodigestión junto al sistema de monitoreo. Se habilitó el método para almacenar los datos recolectados por las sondas con una tarjeta microSD de capacidad 4Gb, donde cada 2 minutos se registra un dato y almacena en esta tarjeta, que puede retirarse en terreno para revisar la data contenida. Por otra parte, para visualizar los datos generados, se presentó el siguiente diseño de visor de datos mediante una pantalla LCD, según se muestra en la imagen 21, 22 y 23, y paralelamente se realiza el envío de los datos a la nube mediante IoT y el punto de conexión wifi del Router implementado, que permite visualizar los datos en una plataforma online, descrita en la sección de programación 2.2.2.4., según se ve en la imagen 24 e imagen 25.



Imagen 21. Visor de pantalla LCD para visualización de datos en terreno, Mamiña.



Imagen 22. Fotografía de la estación de monitoreo (caja estanca, visor LCD, luz led y Router).



Imagen 23. Fotografía de la estación de monitoreo (caja estanca, visor LCD, luz led y Router).

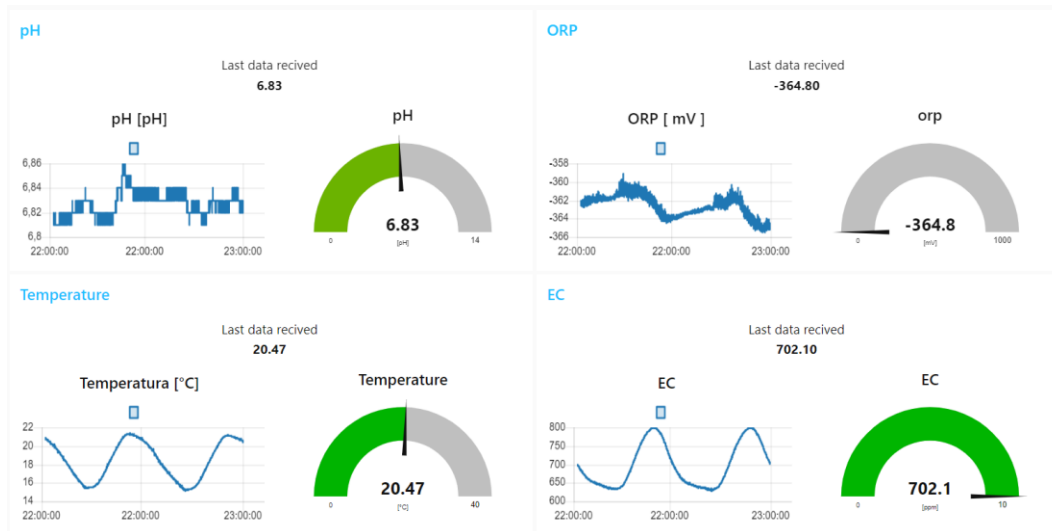


Imagen 24. Visualización de datos en sitio web en la nube, versión 1.

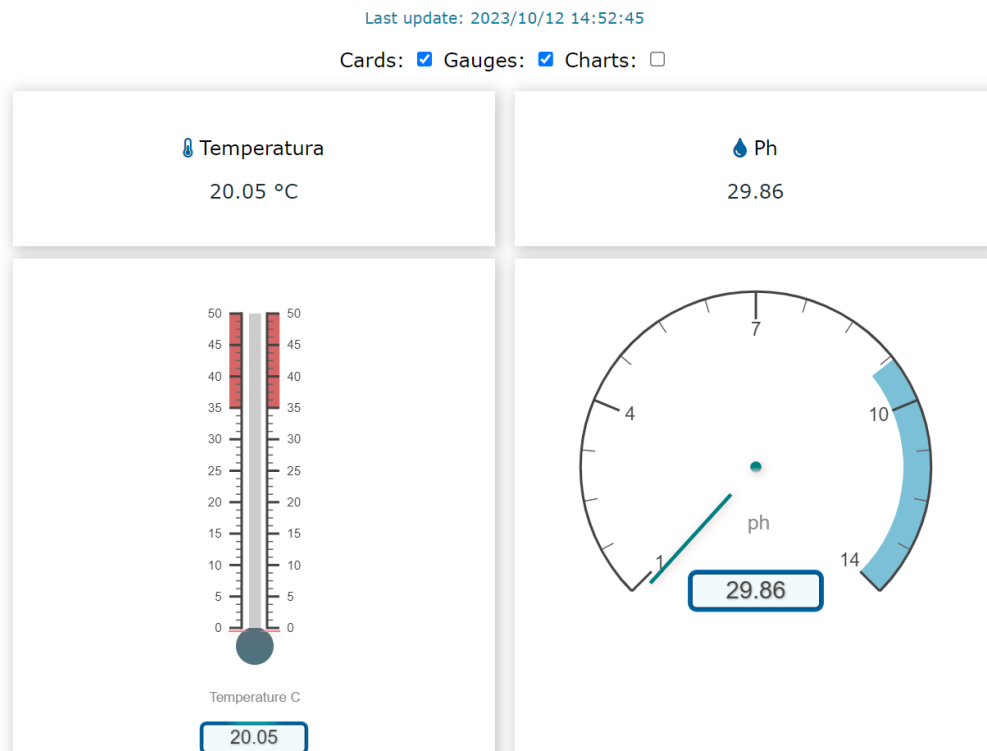


Imagen 25. Visualización de datos en sitio web en la nube, versión 2.

La visualización en dos formatos (en terreno y remoto) permite tener un doble control sobre el proceso dado que en terreno facilita al operador tomar decisiones dado que entrega recomendaciones con el mensaje y se muestra el dato puntual en línea, permitiendo al operador conocer el estado presente del micro biodigestor. Mientras que la visualización en formato remoto permite que se pueda descargar los datos históricos para realizar un análisis de datos, identificando patrones, comportamientos inusuales y el estado del biodigestor a lo largo del tiempo incluso en horarios nocturnos. Lo anterior ayuda a proponer cambios de diseño para realizar una mejora continua en la operación.

## 4. Análisis y resultados

A lo largo del recorrido de este proyecto, se han llevado a cabo numerosas acciones, desde el diseño, la fabricación, implementación y seguimiento de los sistemas hasta la capacitación de los beneficiarios y la producción de bioinsumos. Ahora, es el momento de examinar en detalle cómo estas acciones se han traducido en resultados tangibles. En particular, se mostrará el resultado sobre el sistema de monitoreo, y también los resultados de la producción de biol, en términos de calidad del producto. Este capítulo se centra en presentar un análisis crítico del uso de sensores como herramienta de monitoreo y para guiar la toma de decisiones del operador. También se presentan los desafíos encontrados, y cómo estos hallazgos respaldan o ajustan la hipótesis inicial de este proyecto. A través de un enfoque integral, se buscará comprender el alcance real de la implementación y su contribución al desarrollo sostenible de estas comunidades en zonas extremas de Chile.

### 4.1. Análisis del biol

En el siguiente subcapítulo se muestran los resultados y análisis del bioinsumo generado, llamado biol, por ser la fracción líquida del digestato. Este bioinsumo, según literatura y dependiendo del sustrato, presenta muchos beneficios, entre ellos la presencia de nutrientes, la eliminación de patógenos, la disminución de metales pesados y la presencia de microorganismos beneficiosos para la estructura de los suelos.

#### 4.1.1. Toma de muestras

Se realizó 4 muestreos, separados aproximadamente cada 2-3 meses. Para el muestreo se utilizó una bomba manual, con el fin de obtener una muestra del interior del reactor utilizando una de las tuberías especialmente diseñada para ello. En cada muestreo se recolectaron 1,5 litros separados en 6 frascos de 250 ml de color ámbar para protegerlo de la luz. Además, para transportarse en frío, según la metodología de muestreo de muestras biológicas y manual de toma de muestras (INN Chile, 2014), se utilizó un mini cooler con ice pack para mantener la muestra a menos de 4°C durante el traslado, hasta la recepción en laboratorio donde se guardaron las muestras en un refrigerador. Para el análisis microbiológico, no debía pasar más de 48 horas desde la toma de muestras, para conservar los microorganismos.

#### 4.1.2. Análisis biológico

A pesar de la intención de medir todos los patógenos, debido a la falta de recursos y de capacidades del laboratorio utilizado, solo se logró medir la presencia de coliformes fecales en el digestato, tomando estos como un resultado parcial, que nos permite visibilizar la remoción de uno de estos patógenos. Se realizó un análisis de patógenos antes y después del tratamiento, revisando en particular la remoción y presencia de Coliformes Totales, Fecales y E. Coli. del fertilizante mediante ensayo biológico según el método de “número más probable”. La metodología utilizada es la NOM-112-SSA1-1994 y MNX-AA-042-SCFI-2015. Estos ensayos se realizaron en los laboratorios del centro de investigación de medicina de la Universidad del Desarrollo. Los resultados del primer ensayo del Número más probable (NMP) están en la tabla 22.

Experimento N°	Dilución	A(1)	B(1)	C(1)	A(2)	B(2)	C(2)	D(1)	E(1)	F(1)	D(2)	E(2)	F(2)	N° coliformes / 100 mL
1	[1:10]	5	5	5	5	5	5	-	-	-				
2	[1:1000]	0	0	3	0	0	4	-	-	-				
3	[1:100]	5	4	1	5	3	1	5	4	1	5	3	1	5,4,1: 170 5,3,1: 110
4	[1:100]	5	3	1	5	2	2	5	3	1	5	2	2	5,3,1:110 5,2,2: 95
5	[1:100]	5	3	3	5	4	4	5	3	3	5	4	4	5,3,3: 180 5,4,4: 350

Tabla 22. Resultados de los análisis de NMP de la primera muestra de biol, previo al tratamiento.

De la tabla, se puede conocer que el promedio es  $133 \pm 38,9$  N° de coliformes por cada 100 ml de muestra de mezcla previa a la biodigestión. Luego de 40 días de tratamiento, se tomó muestra del biol obtenido y se analizó en NMP, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Muestra	Fecha	Hora	Coliformes totales (ufc por 100 mL)	Coliformes fecales(ufc por 100 mL)	Resultado final (coliformes por 100 mL)
Muestra Kuskalla N°1	04-12-22	16:00 hrs	Ensayo N°1: 13 Ensayo N°2: 15	Ensayo N°1: 13 Ensayo N°2: 15	$14 \pm 1,4$
Muestra Kuskalla N°2	04-12-22	16:00 hrs	Ensayo N°1: 17 Ensayo N°2: 19	Ensayo N°1: 17 Ensayo N°2: 19	$18 \pm 1,4$
Muestra Kuskalla N°3	04-12-22	16:00 hrs	Ensayo N°1: 0 Ensayo N°2: 0	Ensayo N°1: 0 Ensayo N°2: 0	0
Muestra Kuskalla N°4	04-12-22	16:00 hrs	Ensayo N°1: 0 Ensayo N°2: 12	Ensayo N°1: 0 Ensayo N°2: 12	$6 \pm 1,5$

Tabla 23. Resultados de los análisis de NMP de las muestras de biol, posterior al tratamiento.

De la tabla, se puede conocer que el promedio es  $9,5 \pm 1,4$  N° de coliformes por cada 100 ml de muestra de mezcla posterior a la biodigestión, biol puro.

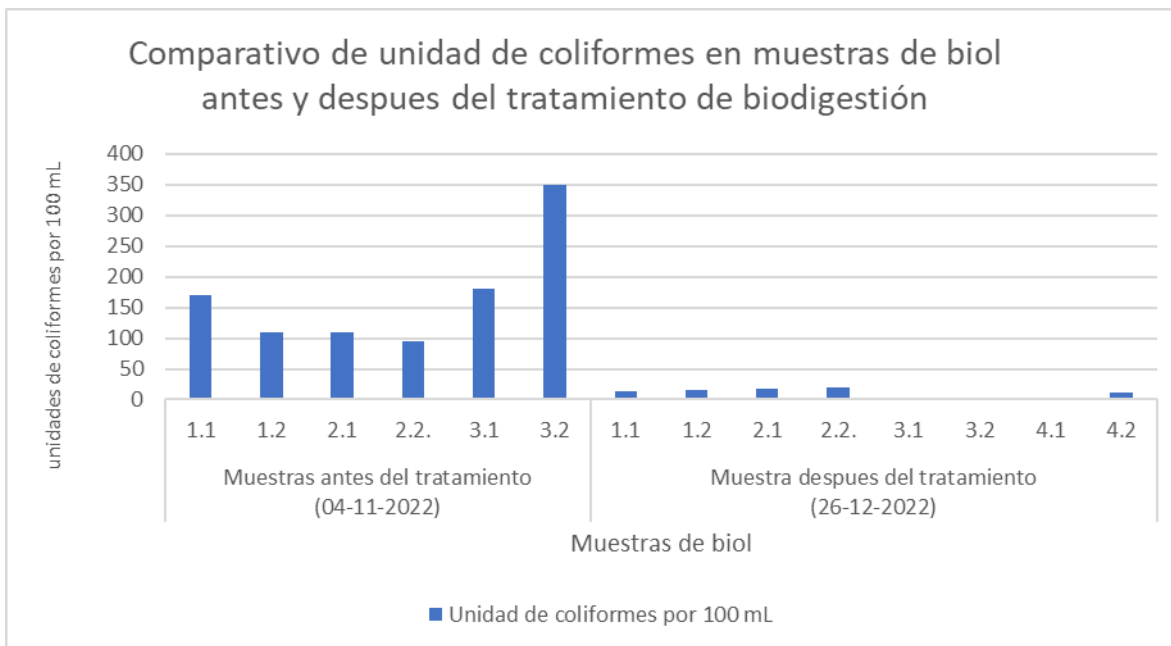


Gráfico 1. Comparativo entre coliformes del biol antes y después del proceso de biodigestión.

Es decir, la cantidad de patógenos, en particular n° de coliformes, disminuyó un 92%, logrando una correcta remoción de coliformes fecales. Basado en la Norma de Digestato (NCH 3375) - Requisitos de calidad, los requisitos sanitarios se describen en la Tabla 9, descrito en la sección 1.4.3.8. Dado nuestros resultados estamos muy por debajo del límite, por lo tanto, cumple parcialmente la norma dado que el resultado obtenido no supera los 1.000 NMP por g de digestato en base seca.

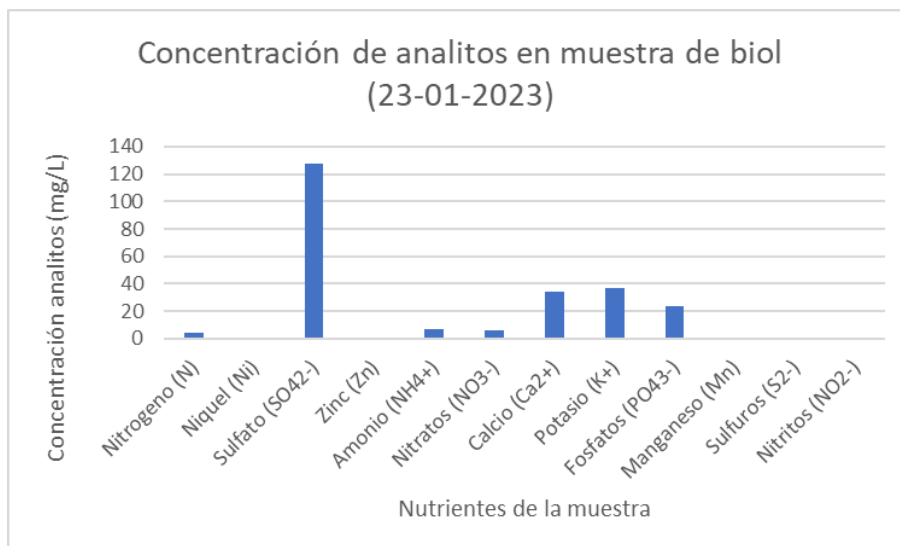
### 4.1.3. Análisis químico

A pesar de la intención de medir la mayoría de los analitos, debido a las capacidades e insumos del laboratorio donde se realizaron los ensayos, solo se determinó la composición nutricional de ciertos analistas, al igual que solo se midieron algunos metales pesados, obteniéndose este resultado parcial sobre la composición. Cabe mencionar, que se realizó una muestra de sulfato del agua utilizada para alimentar el biodigestor dada la presencia de azufre propia de las termas de Mamiña. Los resultados de componentes sulfatados del agua utilizada en Mamiña se muestra en la tabla 23. A pesar de la alta presencia de este analito, se tomó el supuesto que este no influye directamente en el proceso pues no aparece como uno de los inhibidoras, sin embargo, no se indagó mayormente para validar el supuesto, considerando los resultados de manera parcial sobre la composición nutricional.

Parametros	valor medición	Resultado
Sulfuro (S <sup>2-</sup> )	0,005 A	0,002 ppm
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	1,869 A	198 ppm

Tabla 23. Resultados de composición de sulfatos del agua de Mamiña. Elaboración propia.

En el gráfico 2 se muestran las concentraciones de micro y macronutrientes de los ensayos químicos realizadas a la primera tanda de biol cosechado del biodigestor tras 50 días desde la activación. Para la muestra de biol, un fertilizante de color amarillo claro, distinta a las cualidades del agua, medidos los siguientes parámetros con metodologías APHA.



Gráficos 2. Resultado de concentración de analitos en la primera muestra de biol de Mamiña. Elaboración propia.

A pesar de que estos son resultados parciales, aquí se pudo ver una mayor concentración de Calcio, Potasio y Fosforo, analitos propios y útiles para la fertilización. Sin embargo, se destaca la baja

presencia del nitrógeno, como también es importante mencionar que disminuye la concentración de azufre.

Finalmente, dada la Norma de Digestato, se busca cumplir parcialmente la concentración de metales pesados que se muestra en la tabla 13 de la sección 1.6.2, según los resultados parciales obtenidos, se logró medir la concentración del Zinc y Níquel. A la derecha del gráfico 2 se muestran los resultados de dichos metales, obteniendo un resultado positivo dado que cumplen la normativa basado en dichos metales, donde se propone en el futuro poder analizar una mayor cantidad de metales. Cabe destacar que en las unidades de concentración de la tabla 13, 1ppm = 1 mg/kg.

En el gráfico 3, se muestra el resultado del análisis comparativo y evolutivo de nutrientes presentes en las diferentes tomas de muestras y sus duplicados, según su fecha de recolección. Se puede ver que concentración de nutrientes se mantiene estable durante el tiempo, considerando que el único analito que tuvo mayor variación depende de la concentración de sulfatos del agua.

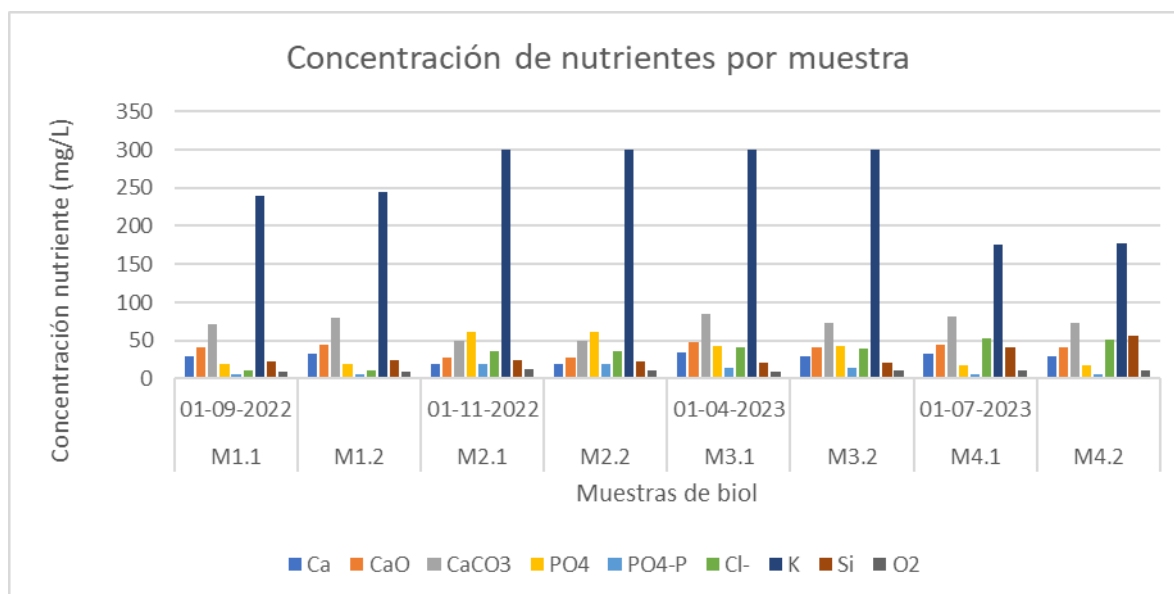


Gráfico 3. Concentración de nutrientes de las muestras biol de Mamiña. Elaboración Propia.

## 4.2. Análisis de datos del Sistema de monitoreo remoto

El sistema de monitoreo estuvo funcionando intermitentemente durante más de 12 meses. Durante ese tiempo, funcionó correctamente cerca de un 30% del tiempo, esto significa que se tiene registro de casi 4 meses del período completo, esto, proveniente de diferentes formatos de registro pues hubo un cambio de método durante la implementación y seguimiento del proyecto.

### 4.2.1. Recopilación de datos en terreno

En principio, en el sistema de monitoreo se generó, capturó y visualizó los datos de manera correcta, sin embargo, el panel fotovoltaico y la batería instaladas no producían la energía suficiente, por lo que en las noches el sistema dejó de tomar datos. Para lo anterior, se realizó un cambio de panel y batería por unos de mayor capacidad, permitiendo este cambio que se produzcan y envíen datos a toda hora. Para la recolección de los datos se tomó la tarjeta SD, los cuales muestran los datos de la siguiente forma:

#### 4.2.2. Procesamiento y análisis de datos

Una vez generados y recopilados los datos, ya sea desde la tarjeta microSD y descargados desde la plataforma online, estos se encuentran en un formato sin procesar, según se muestra en la imagen 26. Para luego realizar un procesamiento y obtener datos procesados, mediante depuración, filtro y estudio estadístico, según se muestra en la imagen 27. A partir de los datos procesados se pueden realizar análisis de datos que se muestran en los gráficos 4, 5, 6, 7, 8 y 9. A continuación, se muestran los diversos análisis realizados a los datos recolectados.

1654810034507,13.82499981,7.625,26.79999924,0
1654810064630,13.66499996,7.622000217,27.70000076,0
1654810095534,13.81200027,7.622000217,28.79999924,0
1654810125656,13.81299973,7.631999969,29.10000038,0
1654810156565,13.8210001,7.625,29.60000038,0
1654810187390,13.81900024,7.629000187,30.10000038,0
1654810218112,13.81900024,7.638000011,30.5,0
1654810248827,13.82600021,7.638999939,30.89999962,0
1654810279551,13.8210001,7.631000042,31.20000076,0
1654810309670,13.81900024,7.644000053,31.39999962,0
1654810340581,13.83699989,7.650000095,31.79999924,0
1654810370706,13.88899975,7.651000022,32.09999947,0

Imagen 26. Ejemplo de datos descargados sin procesar.

DIA	pH Promedio	pH Min	pH Max	T° Interna Min.	T° Interna Max.	T° Externa Min.	T° Externa Max.
12-oct	6,723297381	6,7	6,76	19,76	22,67	18,2	50
13-oct	6,934782826	6,51	7,45	13,26	29,5	6,9	40,4
14-oct	7,432348597	7,38	7,49	19,69	26,8	11,6	50,3
15-oct	7,44300282	7,41	7,49	20,75	27,29	14,1	33,9
16-oct	7,429641256	7,4	7,45	21,46	27,58	14,9	48,7
17-oct	7,405676784	7,38	7,43	22,38	28,84	22,6	51,5
18-oct	7,369150858	7,32	7,39	22,29	28,81	20,1	55,5
19-oct	7,30831075	7,26	7,33	21,79	28,6	18,9	52,5
20-oct	7,258940853	7,21	7,29	21,7	28,41	17,2	56,3
21-oct	7,207396694	7,15	7,24	21,3	28,24	13,8	49,6
22-oct	7,141610209	7,06	7,18	21,39	28,38	15	43,3
23-oct	7,052793167	6,99	7,11	21,06	28,32	13,9	45,9
24-oct	7,004164706	6,94	7,05	20,98	28,36	10,9	43,1
25-oct	6,953445978	6,9	6,99	21,12	28,25	16,6	38,8
26-oct	6,919113861	6,86	6,95	21,27	28,57	12,1	54,3
27-oct	6,88450577	6,85	6,91	21	28,35	11,7	46,9
28-oct	6,852343096	6,83	6,87	21,48	28,59	10,4	40,6
29-oct	6,819066814	6,8	6,84	21,65	28,81	13,9	56,2
30-oct	6,794392073	6,77	6,81	21,82	28,85	12,7	48,3
31-oct	6,76780554	6,74	6,79	21,95	28,84	13,6	43,9
01-nov	6,754211117	6,73	6,77	21,63	28,83	10	42,9
02-nov	6,735122268	6,71	6,75	21,75	28,81	10,6	42,4

Imagen 27. Ejemplo de datos descargados procesados.

En el gráfico 4 se ve una pequeña muestra de cómo se obtuvo el registro de los diferentes sensores con parámetros del reactor (Temperatura, pH, EC y ORP) durante 4 meses tras la implementación, activación y operación del sistema de micro biodigestión. A continuación, se muestran diversos

análisis realizados con esta información recopilada, entre ellos se realizaron análisis acerca del promedio de los parámetros durante 4 meses de operación, también un análisis de la temperatura interna versus la externa del reactor, entre otros.

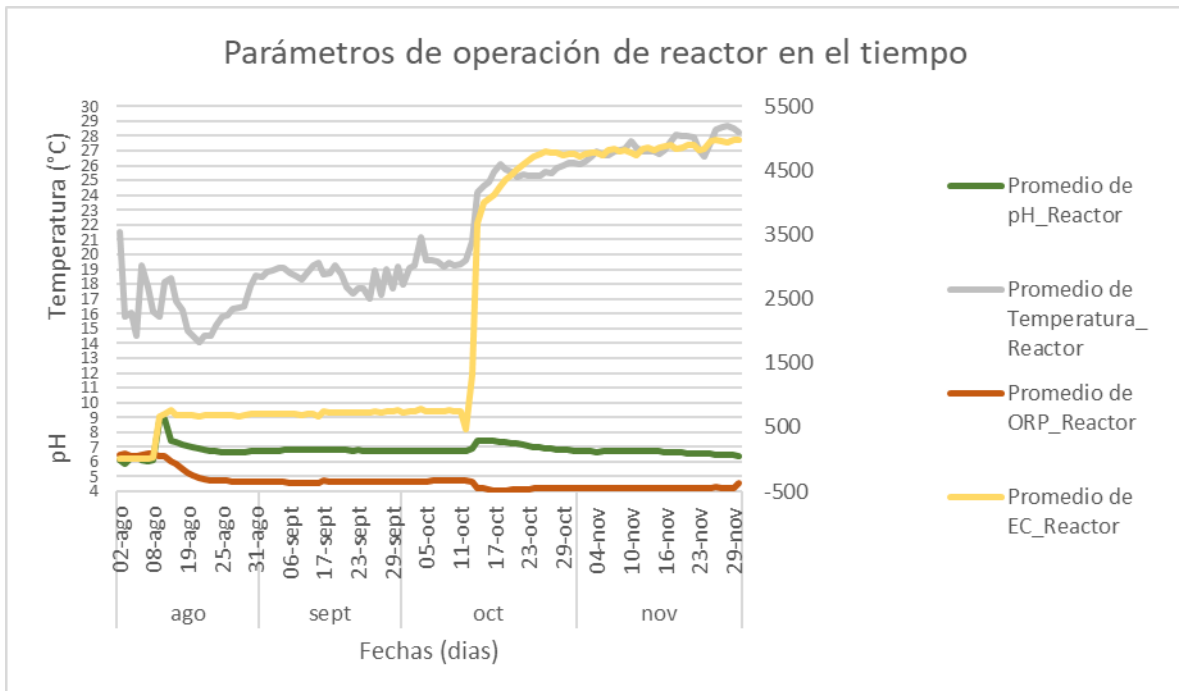


Gráfico 4. Parámetros de operación de reactor durante 4 meses continuos. Elaboración propia.

En el gráfico 4 se muestra como el sistema de micro biodigestión se dejó instalado el 31 de julio y se llenó de agua el 18 de agosto 2022. En el 31 de julio también se instaló el micro túnel o mini invernadero, que permite mantener la temperatura interna del reactor más estable y con menos oscilaciones entre día y noche. De hecho, se puede apreciar que desde el 31 de agosto aproximadamente, la temperatura ya no baja de 16°C y va en aumento. Se puede ver en la gráfica que el reactor con agua mantiene estables los parámetros de pH, EC y ORP. El reactor se activó con estiércol el 12 de octubre, donde se puede ver una subida de los parámetros pH, electro conductividad y temperatura. De manera inversa el ORP se redujo y llegó a valores de -500 mV al tratarse de un “agua contaminada” o agua sucia con guano.

El sistema se estabiliza aproximadamente al mes de la activación, es decir cerca del 12 de noviembre, donde se observa que el pH llega a 7, la EC llega a un promedio de 4400uS/cm y la temperatura alcanza promedios sobre 25°C al día, lo que permite un ambiente propicio para la reproducción del consorcio microbiano al interior del reactor.

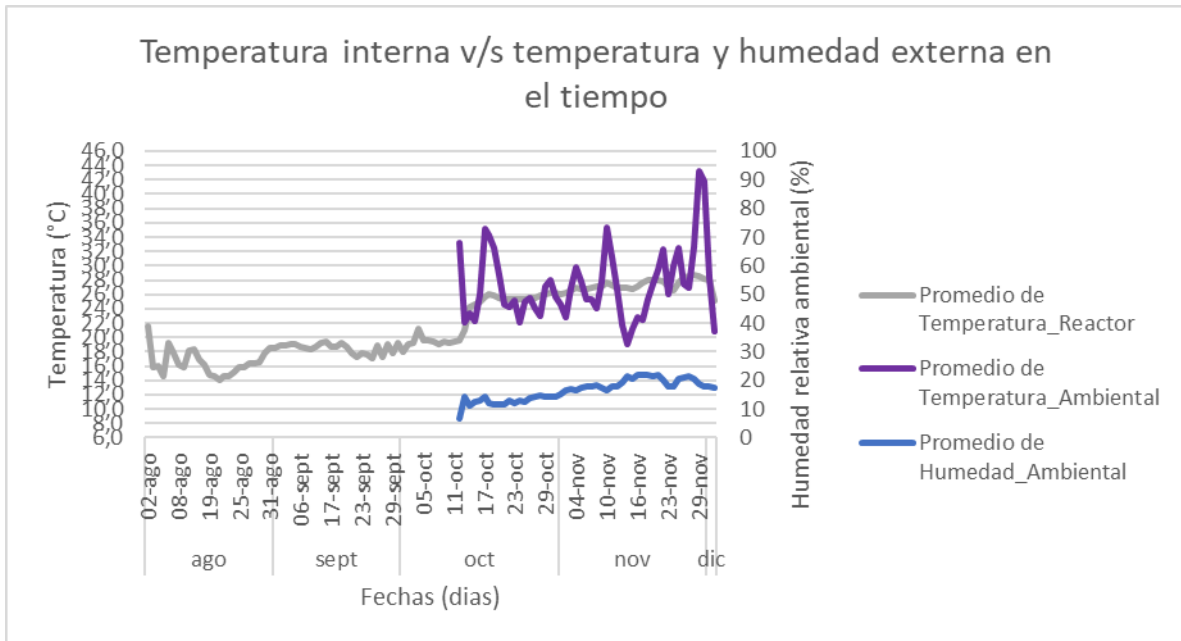


Gráfico 5. Temperatura interna del reactor v/s temperatura y humedad externa.

En el gráfico 5 se puede ver la influencia del uso de mini invernadero para ayudar a disminuir la oscilación térmica al interior del reactor por la influencia de la oscilación térmica ambiental, donde la línea morada muestra cambios bruscos entre la temperatura del día y la noche. Justamente esa variabilidad es la que se busca disminuir porque las condiciones de temperatura que requiere el consorcio microbiano buscan tener una varianza menor a  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Por otra parte, podemos ver la influencia de la temperatura ambiental con la humedad ambiental (línea azul) y la temperatura del reactor, donde hay una influencia. En el gráfico 5, se puede ver la influencia de la EC con la temperatura y el pH.

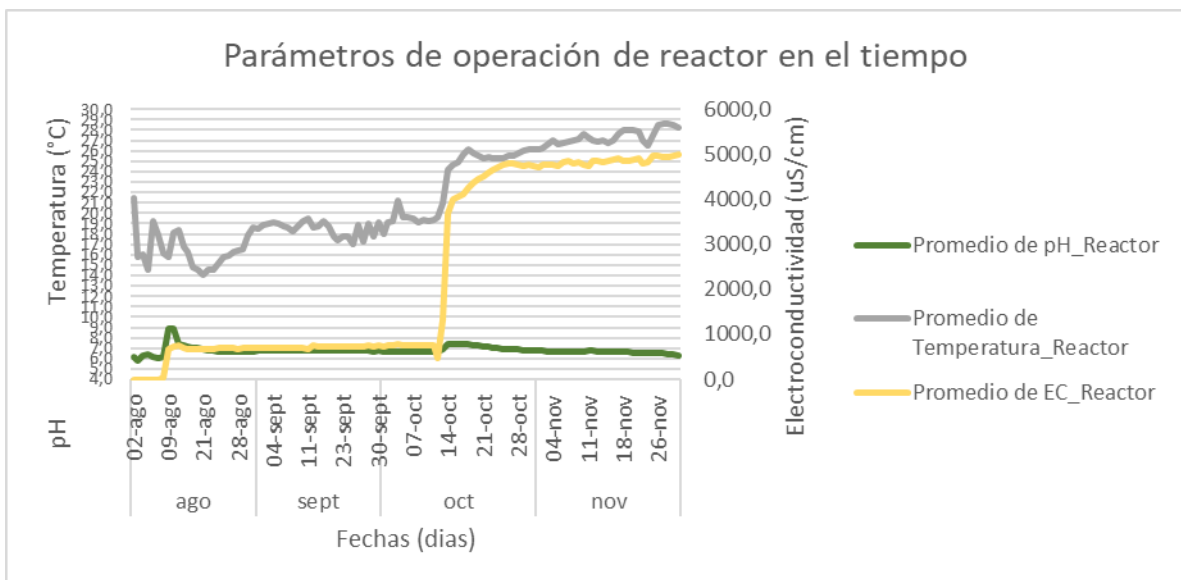


Gráfico 6. Parámetros de operación del reactor. Elaboración propia.

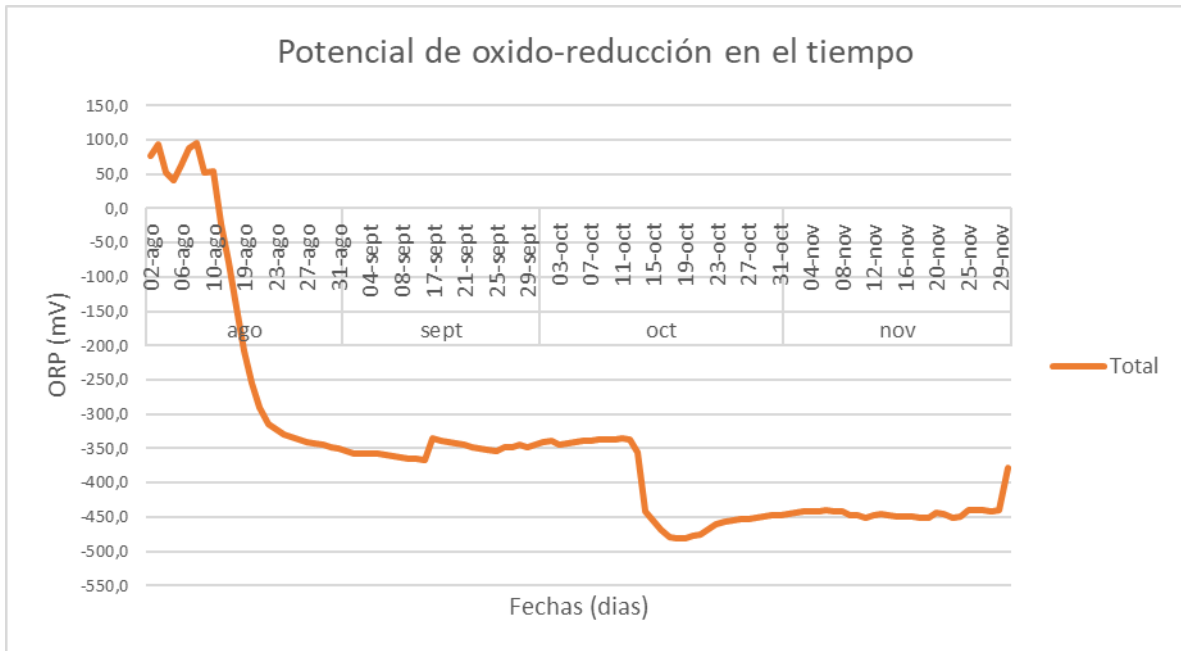


Gráfico 7. Potencial de ORP en el reactor. Elaboración propia.

En el gráfico 7, se puede revisar el comportamiento del potencial de óxido reducción, que mide indirectamente la carga y contaminación del medio líquido interno del reactor. En este caso, podemos ver como la contaminación disminuye a través del tiempo dado la activación y reproducción de los microorganismos, demostrando la remoción de contaminantes, logrando una estabilidad desde mediados de octubre. Este dato, en base a la sección 1.4.3.4, permite medir indirectamente algunos parámetros de operación, específicamente la cantidad de ácidos grasos volátiles acumulados en el proceso, permitiendo prevenir la inhibición por exceso de estos.

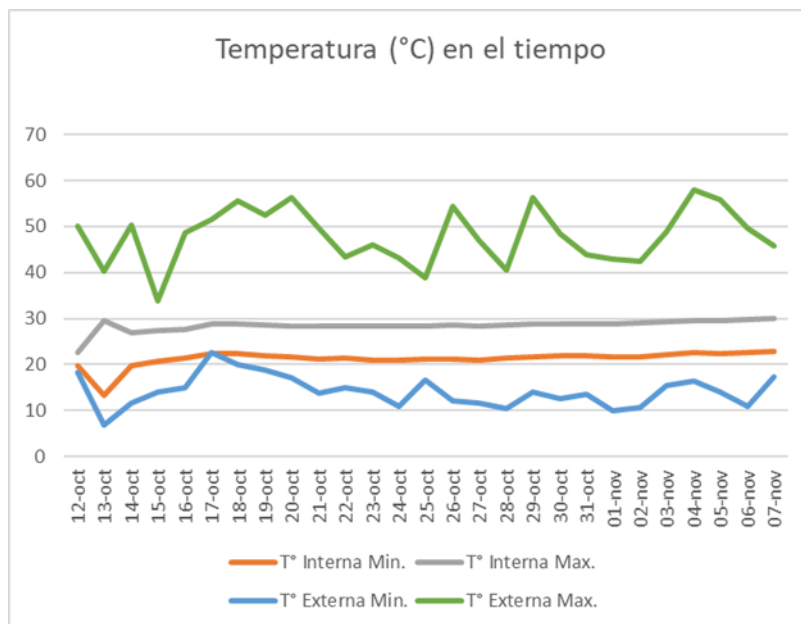


Gráfico 8. Análisis de temperatura interna y externa durante 4 semanas tras activación. Elaboración propia.

En el gráfico 8, podemos ver un análisis del parámetro de temperatura durante las 4 semanas de operación desde la activación del biodigestor. Este gráfico nos permite ver y comparar el comportamiento de la temperatura interna y externa del reactor, donde se aprecia que la temperatura ambiental tiene una alta variabilidad según el cambio día/noche, la cual se pudo estabilizar mediante el uso del mini invernadero, generando una operación estable entre 20° y 30°C dentro del reactor, permitiendo con esto un funcionamiento correcto en rangos mesofílicos.

A continuación, se muestran las gráficas 8, 9 y 10, donde se analiza por separado la temperatura interna de reactor y los datos ambientales, tanto de temperatura externa y humedad. En dichos gráficos se puede ver la variabilidad de dichos parámetros, evidenciando los máximos y mínimos de operación, con una temperatura interna promedio de 25°C, aun cuando la varianza entre día y noche alcanza los +-5°C. Esta varianza se regula bastante comprendiendo que la temperatura ambiental es en promedio 30°C, sin embargo, tiene una varianza de +-20°C, con mínimos de 10°C y máximas de 50°C, por lo tanto, se puede identificar la eficacia de la estabilidad en el reactor. En gráfico Z nos muestra los datos recopilados por un sensor sobre la humedad ambiental, comprendiendo los parámetros ambientales de la zona, el cual puede afectar directamente a la temperatura ambiental.

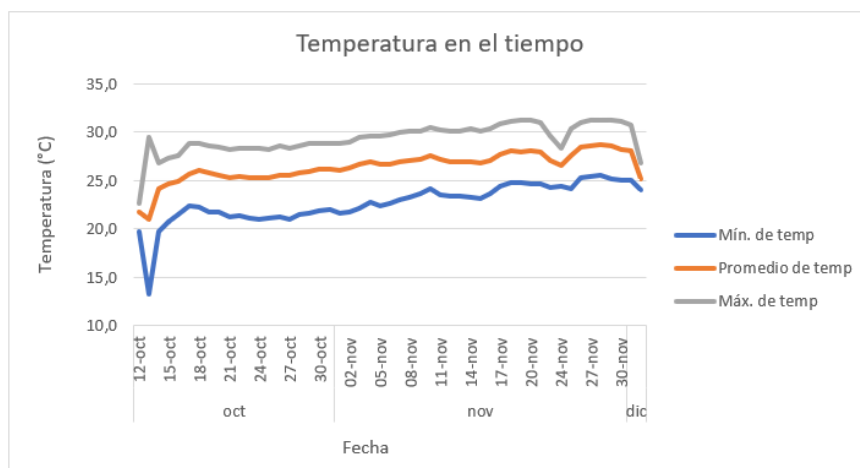


Gráfico 9. Temperatura mínima, promedio y máxima dentro del reactor. Elaboración propia.

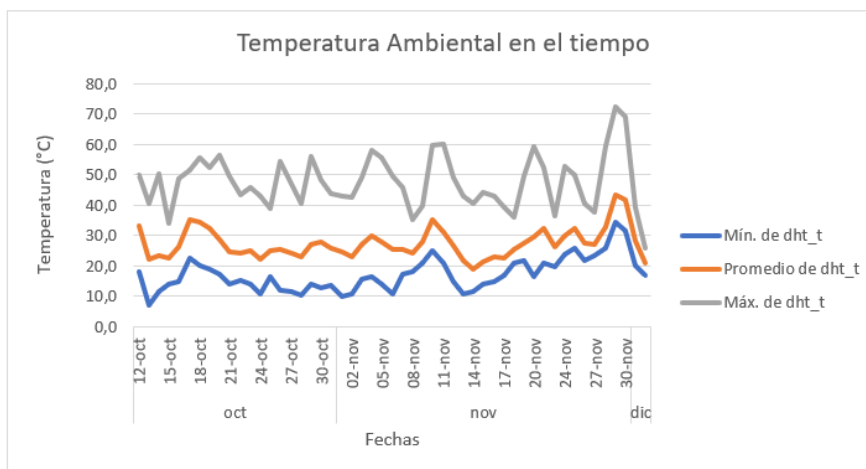


Gráfico 9. Temperatura mínima, promedio y máxima afuera del reactor. Elaboración propia.

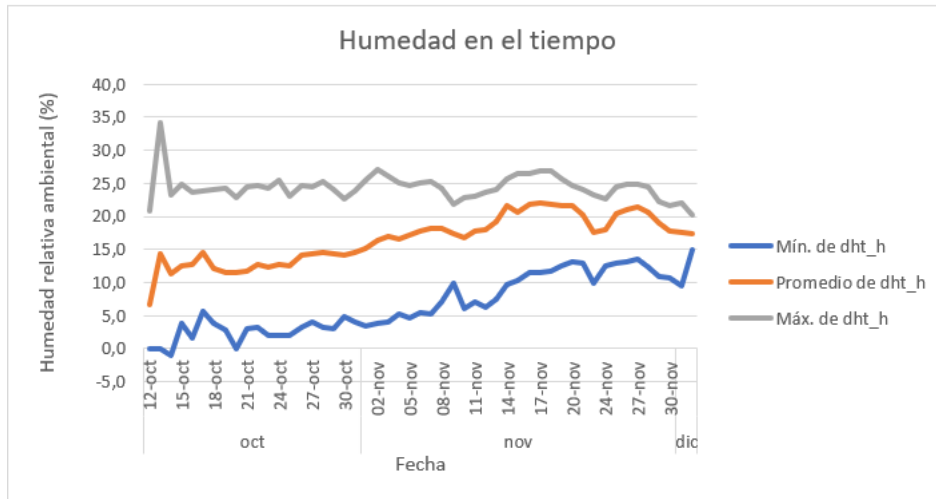


Gráfico 10. Temperatura mínima, promedio y máxima afuera del reactor. Elaboración propia.

En el gráfico 11, se puede revisar el análisis de pH dentro del reactor durante 4 semanas de operación desde la activación de este. Se aprecia que el comportamiento del pH comienza en un pH mayor a 7,2 conforme pasan los meses, se estabiliza y neutraliza, operando correctamente en un pH neutro o cercano a 6,7 operando en los rangos ideales y logrando una operación correcta. Este comportamiento del pH es el adecuado según se muestra en literatura, pues una vez activado el reactor, el pH tiende a bajar y acidificar el medio, pero a la vez se genera un buffer que permite estabilizar el medio. Por otra parte, se aprecia el comportamiento extendido del pH, a finales de noviembre 2022 fue en un periodo donde el reactor no se alimentó, donde el pH decae mayormente llegando hasta un pH 6,5 cerca de salir del rango seguro de operación.

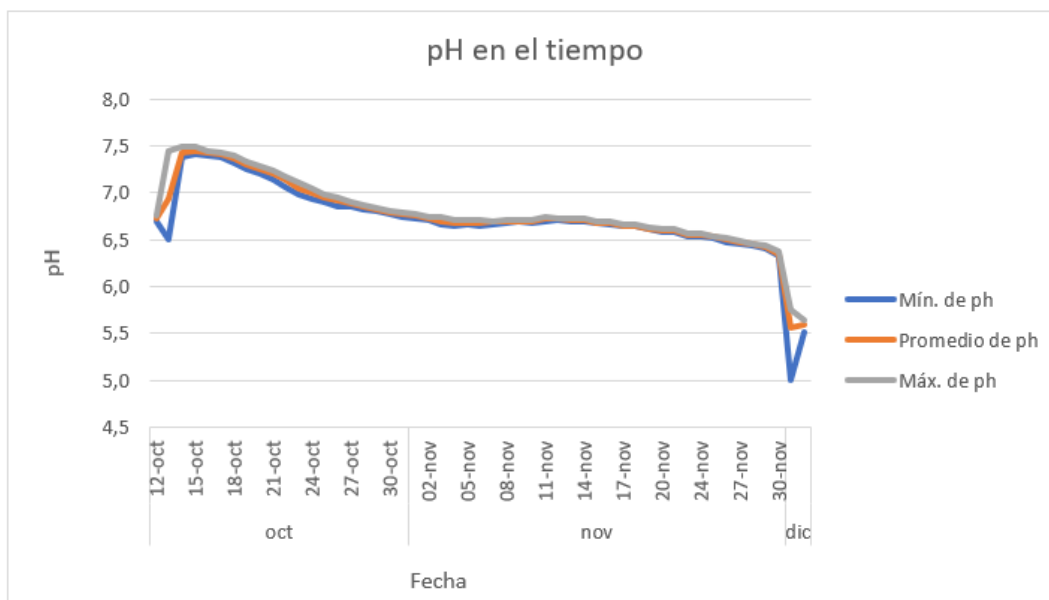


Gráfico 11. Análisis de pH durante 4 semanas tras activación, año 2022. Elaboración propia.

Finalmente, en el gráfico 12 se aprecia el comportamiento del parámetro pH y sus variaciones en el año 2023, 6 meses tras la activación, mostrando una oscilación menor a 0,4 unidades, logrando una estabilidad y promedio en pH 7 operando en condiciones ideales. Por otra parte, en el gráfico 12 se puede ver el comportamiento de la temperatura dentro del reactor y sus variaciones en los datos del periodo del año 2023, observando el promedio máximo y mínimo por día, logrando una oscilación térmica menor a 4°C, que no es lo ideal según literatura, pero si se puede apreciar una estabilidad promedio en los 20°C, operando en condiciones inferiores mesofílicas o superiores psicrófilicas.

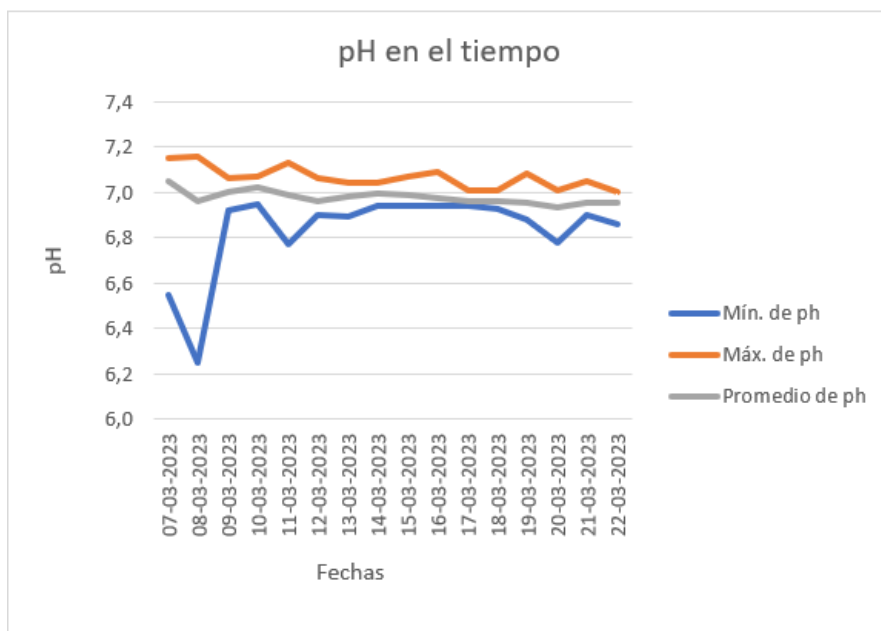


Gráfico 12. Análisis de pH durante marzo año 2023. Elaboración propia.

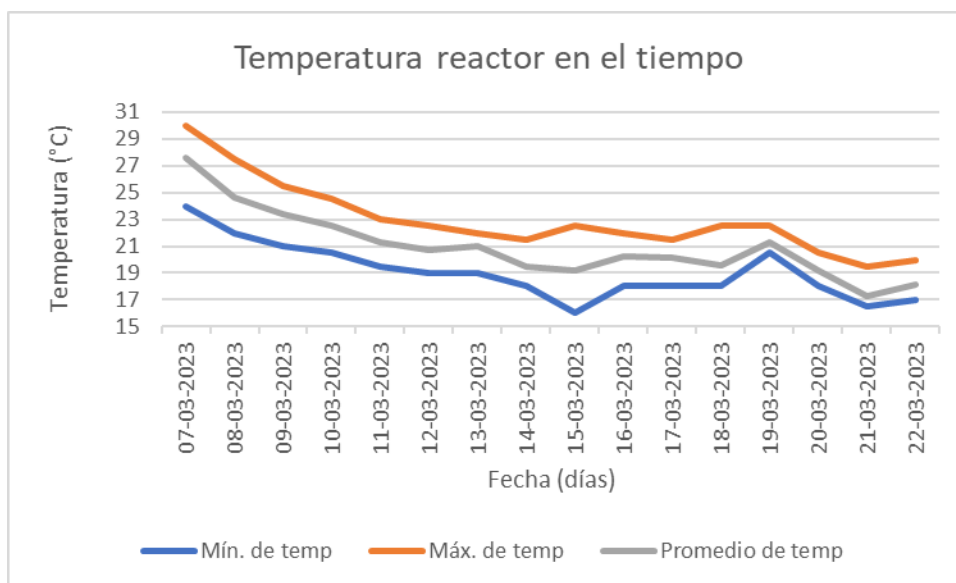


Gráfico 13. Análisis de temperatura durante marzo año 2023. Elaboración propia.

### 4.3. Interpretación de los datos capturados y ensayos de laboratorio

A partir de los análisis de datos, tanto de los análisis de laboratorio como de los sensores en terreno, se puede identificar en general un correcto funcionamiento del sistema de micro biodigestión. Entre ellos, destaca un buen rendimiento, obteniendo un biol o fertilizante líquido con buena concentración y presencia de nutrientes biodisponibles para diversos cultivos,, asegurando una remoción del más del 92% de los coliformes fecales y la baja cantidad de metales pesados, validando sus propiedades y asegurando una buena calidad de bioinsumo, de esta forma, mediante el sistema de monitoreo, se facilita un método de dilución que permita al operador conocer la concentración de nutrientes y la oportunidad para aplicar directamente a sus cultivos según sea el caso. También destaca la eficiencia del proceso dado que en general se trabaja en rangos de temperatura y pH adecuados, según se aprecia en los datos del sistema de monitoreo.

### 4.4. Sostenibilidad del modelo de biodigestor

#### 4.4.1. Capacidad instalada en infraestructura

Basado en la habilitación de infraestructura, se logró dejar un espacio cercado específicamente para el uso del micro biodigestor, con una capacidad de 2.1 m<sup>3</sup> y una vida útil mayor a 10 años, un sistema de monitoreo totalmente autónomo energéticamente y todos los accesorios necesarios para la operación y mantenimiento del sistema completo. En la imagen 26 se puede ver una fotografía del resultado final de la implementación en Mamiña.



Imagen 26. Fotografía del modelo finalizado de Micro Biodigestor de Mamiña.

#### 4.4.2. Capacidad generada en plan de gobernanza y capacitación de la comunidad

Basado en la entrega de conocimientos y técnica de manejo del proceso, se logró dejar más de 4 capacitaciones teórico-prácticas para la comunidad, tanto en conciencia general sobre el impacto de los residuos orgánicos y la oportunidad de valorizarlos a partir de la separación en origen, como en la operación del sistema de biodigestión y la aplicación de los bioinsumos preparados, conociendo la dosificación y composición del biol generado.

Este resultado, muestra la toma de decisiones basada en la experiencia de usuario, como la incorporación gradual de residuos de cocina, para evitar residuos mezclados muy diversos, lo que dificulta la estabilidad del sistema. Adicionalmente, se tiene un documento de plan de gobernanza como resultado parcial, cocreado con la consultora EBP Chile.

Dado que un biodigestor internamente posee todo un consorcio de microorganismos, que trabajan en conjunto para degradar cooperativamente la materia orgánica de los residuos. Estas se reproducen a medida que encuentran las condiciones en el entorno (correcto pH y Temperatura) como también encuentren las dosis y composición adecuadas de alimento. De tal manera, que están sujetas a un suministro de residuos con poca variabilidad, es decir, idealmente alimentar con el mismo tipo de residuo. Es por lo anterior, para conseguir el éxito en la operación de un biodigestor, se comienza con un primer año operativo solo con estiércol, dado que introduce bacterias benéficas para el proceso y porque asegura la homogeneidad del residuo. Durante este proceso, es posible incluir gradualmente otro tipo de residuos que no varíen mucho en su composición ni cantidades, para que las bacterias no lo rechacen, y poco a poco se llega a la receta con la cantidad de residuos que se requirió para generar ciertas propiedades en el biol (fertilizante líquido) resultante.

Es importante mencionar que este plan de alimentación gradual se basa en la práctica más viable y eficiente para lograr sostener el biodigestor operativo durante largo tiempo, para no desequilibrar el consorcio microbiológico interno. Es por eso por lo que se decidió utilizar estiércol el primer semestre y aumentar gradualmente hasta equilibrar la "receta". Dada la experiencia práctica del primer mes de alimentación con estiércol y a los resultados obtenidos del biol, se toma la decisión de que la proporción de residuo y agua en la alimentación será de 1:3, es decir si el flujo diario de alimentación es de 20 litros de mezcla, quiere decir que 5 de estos con residuos orgánicos y 15 son agua, pues esas cantidades aseguran una cantidad mínima de materia orgánica como alimento en el ambiente para las bacterias, además, esta proporción facilita el acto de introducir la mezcla al biodigestor pues ayuda a escurrir. Cuando se alimentó con la proporción 1:1, se produjo un estancamiento, lo mismo ocurría con la proporción 1:2. Finalmente, se decide alimentar con 1:3, dicho sea de paso, la literatura también opta por esa proporción. (Literatura). Otro de los resultados particulares de la gobernanza, fue la organización de un WhatsApp entre los ejecutores del micro biodigestor y los usuarios/beneficiarios, para mantener una comunicación directa, sobre cualquier duda que tenga, como así para el reforzamiento de las actividades periódicas que debe hacer la comunidad agrícola para sostener el proyecto.

## Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación es posible señalar que, bajo condiciones de mejora, fue posible diseñar, implementar y dar seguimiento a un sistema de microbiodigestión para su uso en comunidades con el apoyo de un sistema de monitoreo y alerta temprana de parámetros que guíe la operación. Se pudo evidenciar no solo la producción de biol con propiedades parciales de fertilizante, sino que hubo producción de biogás en ciertos períodos del proyecto aún cuando no fue el foco de estudio, validando la posibilidad de producción de bioinsumos partir de residuos orgánicos de una comunidad, además del uso y aplicación de estos mismos para su beneficio colectivo. Cabe mencionar que las condiciones extremas del lugar donde se desarrolló el proyecto no fueron impedimento para la operación continua y producción de bioinsumos. Los parámetros fisicoquímicos seleccionados, pH y temperatura, permiten visualizar datos relevantes del proceso en tiempo real, siendo de utilidad para guiar la operación y alimentación del biodigestor. Ambos sistemas de visualización entregan información útil desde el punto de vista del operador en terreno, como del supervisor en remoto, generando la suficiente data para conocer el comportamiento histórico del proceso, identificando puntos de inflexión y cambios internos.

El primer objetivo específico fue cumplido tras diseñar un sistema de micro biodigestión modular, resistente y adaptado a un contexto ambiental particular, para condiciones ambientales extremas. El segundo objetivo también se cumplió al diseñar un sistema de monitoreo que permitió visualizar remotamente los parámetros fisicoquímicos y generar un método de alerta temprana para operar el biodigestor en los rangos ideales de pH y temperatura. Adicionalmente, se logró el tercer objetivo al implementar el sistema de micro biodigestión junto a el sistema de monitoreo en una localidad representativa de ambientes extremos para testear su operación. Una vez implementado y activado, el sistema ha estado en funcionamiento por más de 12 meses, en los cuales se ha obtenido un rendimiento regular, proporcionando una producción continua de bioinsumos, ya que ha generado bioles y en ocasiones biogás. Gracias a la producción de biol, se cumplió el cuarto objetivo específico dado que se pudo caracterizar el bioinsumo generado, mediante análisis de laboratorio según indicadores de fertilizantes orgánicos (nutrientes, metales pesados y presencia de coliformes), validando que el biol tiene propiedades de fertilizante orgánico, no tanto por la presencia de micro y macronutrientes, sino por la eficiencia de remoción de carga orgánica, remoción de patógenos y mínima presencia de metales pesados. Finalmente, dado lo anterior, se pudo cumplir el último objetivo específico pues se logró validar la implementación y evaluar su capacidad de apoyo en la toma de decisiones. A continuación, se detallan alguno de las reflexiones y aprendizajes sobre el proyecto.

## Retroalimentación Sistema de micro biodigestión

El sistema de micro biodigestión fue efectivo para y logró cumplir con las características definidas. La modularidad de su diseño fue necesaria desde su fabricación hasta su traslado y ensamblado en terreno, logrando una eficiencia en el proceso pues cuando este estuvo embalado no utilizó un volumen mayor a 0,5 m<sup>3</sup> y un peso de 80 kilogramos, lo que facilitó su envío a través de encomienda por bus. Por otra parte, la robustez del material permitió que las piezas llegaran en perfecto estado a las zonas de implementación, tanto para Mamiña como para Puerto Natales. Además, el diseño basado en el ensamblado facilitó y agilizó la implementación de 2 días para cada caso, definiéndose así los pasos y un manual de instalación para las futuras implementaciones. La robustez del material soportó sin problemas la operación durante el proyecto, que tiene una vida útil de más de 10-15

años, asegurando su continuidad, incluso se entregó parches especiales para reparar la geomembrana por rajadura o apertura accidental. La materialidad de la geomembrana y su espesor, resultaron ser un contenedor idóneo para generar las condiciones anaerobias, incluyendo la flexibilidad y resistencia requerida.

Por otra parte, los accesorios seleccionados ayudaron a generar las condiciones ideales para la operación en rangos ideales, con un mini invernadero que mantiene la temperatura del día hacia la noche. Cabe destacar que la materialidad inicial del invernadero fue reemplazada por la poca resistencia a las condiciones climáticas, dado que en la implementación se utilizó un plástico cobertor de bajo grosor, lo que generó una rápida degradación del material por la radiación UV. Posteriormente, se reemplazó este material por otro plástico de mayor grosor y resistencia, sin embargo, aun así, se presentó fatiga del material. Lo que llevó a replantear la materialidad del invernadero, para definir las planchas de policarbonato.

### Retroalimentación Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo costo/efectivo, realmente permite visualizar el estado del proceso del reactor, en donde normalmente se trabaja a ciegas, es decir, sin información relevante sobre los parámetros de operación. En este caso, el sistema de monitoreo permite medir el pH y temperatura adecuadamente, pero no pudo registrarse datos por más de 2 meses seguidos, porque los sensores, en particular de pH, contienen un reactivo al interior gastado al estar en constante uso, tras cierto tiempo no lee bien. Por otra parte, el sensor de pH es sensible a partículas que tapen el cabezal e interrumpen la lectura, por lo que es importante crear una estructura que soporte y mantenga el sensor fuera de contacto de los sedimentos del fondo del reactor. Para ello se creó un soporte de PLA que mantiene el cabezal del sensor al menos a 10 centímetros sobre suelo y fondo del reactor, asegurando el contacto solo con la fase líquida y sin sumergirse en los sedimentos.

El sistema de monitoreo depende de la energía solar, por lo tanto, en ocasiones, por mal clima, el panel no alcanzó a cargar la batería por completo y se terminó por agotar, dejando sin energía al sistema completo, incluido el Router, las placas y los sensores, para ello se realizó un cambio y mejora, instalando un panel más grande y una batería más grande también. Incluido en este desafío, dado la gran cantidad de polvo generado en el ambiente de Mamiña, se identificó que el panel solar se ensucia muy rápido, generando una capa de polvo que disminuyendo su rendimiento. Por lo tanto, se incluyó a las capacitaciones y manuales de uso y mantención del sistema, el ítem de limpieza de los paneles de manera frecuente y continua.

Otro tema con el sensor de pH es que debe recalibrarse idealmente cada 1 o 2 meses, por lo que se propuso cambiar la forma de introducir y sacar del reactor, para que sea fácil de usar. Además, es importante mencionar que se realizaron capacitaciones específicas para el uso y mantención, limpieza y calibración de los sensores. Para lo anterior, se dejó un kit de soluciones estándar de calibración.

Como el sensor funciona durante 1 y 2 meses, es ideal para la fase de activación, donde se alimenta el reactor con una carga de inóculo y se espera hasta estabilizarla, llegando a pH 7 y determinó el tiempo de retención hidráulica, por lo que el primer día de alimentación continúa ya que llegó a 7 a 12 días tras la activación.

Con el uso de sensores de pH y temperatura, se identificó la oscilación de los parámetros durante el mismo día, con una variabilidad de 3 puntos promedio durante el día en caso del pH, y una variabilidad de 5°C promedio durante el día para la temperatura.

El uso de sensores de temperatura permitió evidenciar la oscilación térmica que existe en ese lugar entre el día y la noche, lo que permitió decidir sobre el uso del mini invernadero, que, a su vez, con el uso de sensores, se evidenció que el uso de invernadero ayudó a minimizar la oscilación térmica entre el día y la noche, manteniendo el reactor con una mínima de 15°C, versus los 0° que llegaba de noche sin el invernadero.

Otra de las dificultades, fue que la caja estanca, dado las condiciones climáticas de las zonas, no quedó lo suficientemente hermético, provocando que entre humedad y malogrando algunas partes de las placas que está dentro de la caja estanca, generando óxido y sulfatación, por lo tanto, generando una falla en la lectura de los datos.

El sensor de EC fue útil para entender la concentración de sales del tratamiento durante el proceso. Por otra parte, se comprendió que éste dato puede ser de mayor utilidad cuando se mide una vez terminado el proceso, es decir, directamente al biol resultante. Así se identifica indirectamente la concentración de nutrientes que tiene y por ende se puede definir la dilución que se debe aplicar para alcanzar concentraciones establecidas en agricultura para el uso de fertilizantes, que rondan entre 0,5 y 2 dS/cm dependiendo del cultivo a aplicar. Los valores encontrados en el reactor de Mamiña fueron entre 4 y 5 dS/cm, y el agua de Mamiña tiene un EC de 0,5 dS/cm, es por ello que se creó una tabla y ecuación que permita de manera inmediata determinar la cantidad de litros de agua a utilizar para diluir 1 litro de biol según la EC del momento.

### Análisis de bioinsumo

Análisis patógenos: En particular coliformes fecales. Para ello se utilizó el ensayo de Número más probable.

Se realizó una toma de muestra antes y después de proceso. También se tomaron muestras del interior del reactor. En este ensayo, realizado por triplicados (o más) se determinó que la carga microbiana en un principio era del orden de 133 NPM en promedio, y de la muestra tomada 50 días después, se identificó una carga de 9,5 NMP en promedio, por ende, en este ensayo se determinó que el tratamiento eliminó el 92% de los coliformes fecales.

Se realizaron más ensayos con muestras de biol y basándonos en la normativa de digestato industriales, que establece los siguientes límites máximos de coliformes fecales, podemos concluir que el biol resultante cumple con la cantidad de patógenos pues en los ensayos biológicos realizados se muestra una presencia menos a 1000 NMP por g de digestato seco, que muestran que hay concentraciones bajas de coliformes fecales.

Por otra parte, se realizaron análisis de composición de analitos varios, entre ellos micro, macro nutrientes y ciertos metales, para conocer la concentración de nutrientes presentes en el biol obtenido tras el proceso.

## Recomendaciones para futuros trabajos

Se propone seguir mejorando el sistema de monitoreo, tanto la infraestructura como en uso de la data, para mejorar el diseño de usuario y el procesamiento de los datos.

Se propone seguir estudiando la medición de Electro conductividad como indicador de nutrientes disponibles en cierta concentración, para llegar a las concentraciones adecuadas a diferentes cultivos según lo requiera.

Se propone encontrar un método local para medir la concentración estimada de nutrientes presentes en el fertilizante bio basado, dado que el análisis realizado tiene alta dependencia de horas en equipos y personal en laboratorio.

Se propone mejorar el sistema de uso y distribución de biometano, pues el sistema de purificación y de almacenaje de biometano están bien, sin embargo, no tiene presión suficiente para salir del contenedor. Para ello se utilizó un peso en la bolsa, pero se sugiere un método que empuje de manera uniforme y controlado, para generar una presión precisa de salida para una cocinilla u otro sistema.

Se propone realizar un estudio de aplicación de biol en el suelo agrícola para medir las propiedades regenerativas del fertilizante bio basado. Una segunda etapa puede ser un estudio de beneficios asociados a los cultivos en esa tierra.

Se propone realizar el análisis completo biológico, incluyendo otros patógenos además de los coliformes fecales, medir el espectro completo de composición nutricional y de metales pesados.

Se plantea poder medir la producción y calidad del biogás, dado que, según la revisión bibliográfica, éste medio aporta bastante información respecto del proceso mismo, por lo tanto es un buen indicador de parámetro operacional.

Se propone realizar una prueba en otro lugar para tener más experiencias del sistema de micro biodigestión sensorizado. Como así también ponerlo a prueba en diferentes climas y condiciones ambientales.

Se propone reformar la infraestructura de soporte de sistema de monitoreo, por ejemplo la caja estanca y la distribución interna de las placas electrónicas puede mejorar y optimizar espacio y usabilidad. Además, de mejorar la misma pantalla de visualización, para obtener visualmente mejor la información de operación en tiempo real.

Se propone testear el sistema de códigos de colores y alerta, dado que de este depende la interpretación y facilidad de visualización ante cambios de comportamiento del proceso.

## Bibliografía

- Aguilar, F. X., & Botero, R. (2006a). *Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo* (Vol. 2, Issue 1).
- Aguilar, F. X., & Botero, R. (2006b). *Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo* (Vol. 2, Issue 1).
- Ait Ahmed, W., Aggour, M., & Naciri, M. (2017). Biogas Control: Methane Production Monitoring Using Arduino. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol 11(No 2).
- Alcayaga, S., Glaría, J., & Guerrero, L. (1999). Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandido. *Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile*.
- B. K. Ahring. (2003). Biomethanation. *Ahring*.
- Balmant, W., Oliveira, B. H., Mitchell, D. A., Vargas, J. V. C., & Ordonez, J. C. (2014). Optimal operating conditions for maximum biogas production in anaerobic bioreactors. *Applied Thermal Engineering*, 62(1), 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.033>
- Banks, C. J., Chesshire, M., Heaven, S., & Arnold, R. (2011). Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource Technology*, 102(2), 612–620. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.005>
- Bernard O, Hadj-Sadok Z, Dochain D, Genovesi A, & Steyer J (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnol Bioeng*, 75(4), 424-438. <https://doi.org/10.1002/bit.10036>.
- Bi, S., Qiao, W., Xiong, L., Ricci, M., Adani, F., & Dong, R. (2019). Effects of organic loading rate on anaerobic digestion of chicken manure under mesophilic and thermophilic conditions. *Renewable Energy*, 139, 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.083>
- Blesgen, A., & Hass, V. C. (2010). Operator training simulator for anaerobic digestion processes. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 43(6 PART 1), 353–358. <https://doi.org/10.3182/20100707-3-BE-2012.0024>
- Bond, T., & Templeton, M. R. (2011). History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development*, 15(4). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>
- Borja, R., Alba, J., Martín, A., & Mancha, A. (1998). Influencia de la velocidad de carga orgánica sobre el proceso de digestión anaerobia de aguas de lavado de aceitunas de almazara en reactores de lecho fluidizado. In *Fase* (Vol. 49). <http://grasasyaceites.revistas.csic.es>
- Campaña, H., Airasca, A., Uribe Echevarría, M., Monserrat, V., & Benedetti, P. (2015). *Enzimas como indicadores bioquímicos de evolución de procesos de digestión anaeróbica*.
- Campos, E., Agua, S., & Flotats, X. (2004). *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*. <https://www.researchgate.net/publication/304771327>

- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos Económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>
- Chamy, R., & Vivanco, E. (2007). Potencial Biogas Chile. *Escuela de Ingeniería Bioquímica, PUCV*.
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 99, Issue 10, pp. 4044–4064). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Davila-Vazquez, G., & Razo-Flores, E. (2007). *Producción biológica de hidrógeno por vía fermentativa: Fundamentos y perspectivas Bioelectrochemical systems View project Evaluation of the induction of stem cells towards differentiation to pancreatic cells using different extracts as stimulation factors. View project*. <https://www.researchgate.net/publication/259781183>
- de Lleida, U. (n.d.). *OPTIMIZACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE PURINES DE CERDO MEDIANTE CODIGESTIÓN CON RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA*.
- de Souza Leite, L., Tango, M. D., Zanetoni Filho, J. A., Hoffmann, M. T., & Daniel, L. A. (2021). Implications of COD analysis use in the peracetic acid-based wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 84(5), 1270–1279. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.300>
- del Carmen VELÁZQUEZ-LÓPEZ, M., Ordoñez, N. A., Fitz, E., Espinosà, T., González, M., & Velázquez, N. (2017). *Determinación de concentración de metano con sensores semiconductores*.
- de-Lucas, A. I., Taranco, C., & Rodriguez-Garcia, E. (2012). Biomasa, combustibles y sostenibilidad. In *ITAGRA: Vol. Vol. 1*. ITAGRA.
- Gerardi, M. H. (2003). *WASTEWATER MICROBIOLOGY SERIES Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process Michael H. Gerardi Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process*. [www.copyright.com](http://www.copyright.com).
- González, I., & Calderón, A. J. (2018). Measurement System Based on Arduino for Biogas Sensing: Development Considerations and Laboratory Scale Approach. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, Vol 11(No 1 & 2). [http://www.ariajournals.org/systems\\_and\\_measurements/2018](http://www.ariajournals.org/systems_and_measurements/2018),
- Hedrick, D. B., Guckert, J. B., & White, D. C. (1991). The effects of oxygen and chloroform on microbial activities in a high-solids, high-productivity anaerobic biomass reactor. *Biomass and Bioenergy*, 1(4), 207–212. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(91\)90004-V](https://doi.org/10.1016/0961-9534(91)90004-V)
- Hill, A., Tait, S., Baillie, C., Viridis, B., & McCabe, B. (2020). Microbial electrochemical sensors for volatile fatty acid measurement in high strength wastewaters: A review. In *Biosensors and Bioelectronics* (Vol. 165). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112409>
- Hoffmann, A. (2016). Guía de Educación Ambiental y Residuos. In *Departamento de Educación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente* (1era ed.).
- INN. (2015). *Norma Digestato NCh3375:2015*.
- Jain, S. (2020). *World Biogas Association (Germany)*. <https://tinyurl.com/y6rrkma9>

- Jekayinfa, S. O. (2014). *Design, Construction and Testing of a Plug Flow Digester for Converting Agricultural Residues to Biogas Safety and Machinery Use in Agricultural Production View project Energy*. <http://www.apexjournal.org>
- Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Amalevičiūtė-Volungė, K., Volungevičius, J., & Šlepetys, J. (2021). The effect of digestate fertilisation on grass biogas yield and soil properties in field-biomass-biogas-field renewable energy production approach in Lithuania. *Biomass and Bioenergy*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106211>
- Lim, E. Y., Tian, H., Chen, Y., Ni, K., Zhang, J., & Tong, Y. W. (2020). Methanogenic pathway and microbial succession during start-up and stabilization of thermophilic food waste anaerobic digestion with biochar. *Bioresource Technology*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123751>
- López Ruiz, A. (2016). *Análisis de la dinámica del nitrógeno en un sistema continuo acoplado contactor de membrana hidrofóbica / Reactor Anaerobio*.
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2015). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar, Vol. 1*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Martí Herrero, J., Pino Donoso, M. A., & Viquez Arias, J. A. (2017). Guía de biogas sector lechero Chile. *Ministerio Energía*.
- Mauky, E., Weinrich, S., Jacobi, H.-F., Nägele, H.-J., Liebetrau, J., & Nelles, M. (2017). Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale – Process stability and flexibility potentials. *Anaerobe*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.03.010>
- Decreto 119 - Reglamento de seguridad de las plantas de biogás e instaladores de gas., Pub. L. No. 119, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2017).
- Decreto 148: Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos., Pub. L. No. 148, 148 Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2003).
- Ministerio de Energía de Chile (2016). Guía didáctica para en el registro de plantas de biogás en Chile. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/621>
- Ministerio de Energía de Chile (2017). Biogás en el Sector Lechero en Chile. Retirado de: <https://biogaslechero.minenergia.cl/wp-content/uploads/2018/06/Guia-Biogas-sector-lechero-2018.pdf>
- Montañez Hernandez, L. E., García Lozano, M., Peña Garcia, Y., Oropeza Navarro, R., & Balagurusamy, N. (2017). Microbiology and Biochemistry of Anaerobic Treatment. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Biological Treatment of Industrial Effluents*, 231–259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63665-2.00009-6>
- Nagao, N., Tajima, N., Kawai, M., Niwa, C., Kurosawa, N., Matsuyama, T., Yusoff, F. M., & Toda, T. (2012). Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 118, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.045>

- Orrego Trujillo, A., Alberto León Torres, C., & Arturo Gil Ramírez, L. (2019). Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Potassium concentrations of biol and biosol obtained from cattle manure in a polyvinyl chloride geomembrane biodigester Jeisson Cabos Sánchez & Cecilia Betzabet Bardales Vásquez. *Arnaldoa*, 26(3), 1165–1176. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26321>
- Parra-Orobio, B. A., Donoso-Bravo, A., & Torres-Lozada, P. (2021). Pre-dimensioning of Small-Scale Anaerobic Reactors of Food Waste Through Biochemical Methane Potential Assays and Kinetic Models. *Bioenergy Research*. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10291-3>
- Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21(5–6). <https://doi.org/10.1080/10643389109388424>
- Poggio, D., Ferrer, I., Batet, L., & Velo, E. (2009). Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos. *Livestock Research for Rural Development*, Vol. 21(9).
- Reyes Aguilera, E. A. (2018). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 24. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, Rossy. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología En Marcha*, Vol. 23(N°1), 39–46.
- Rivera-Salvador, V., Aranda-Barradas, J. S., Espinosa-Solares, T., Robles-Martínez, F., & Toledo, J. U. (2015). THE ANAEROBIC DIGESTION MODEL IWA-ADM1: A REVIEW OF ITS EVOLUTION. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 109–117. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2010.01.001>
- Romero-Güiza, M. S., Vila, J., Mata-Alvarez, J., Chimenos, J. M., & Astals, S. (2016). The role of additives on anaerobic digestion: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 58, pp. 1486–1499). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>
- Ruchen, C. (1981). The development of biogas utilisation in China. *Biomass*, 1(1), 39–46. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(81\)90013-5](https://doi.org/10.1016/0144-4565(81)90013-5)
- Schnürer, A., & Jarvis, A. (2018). *Microbiology of the biogas process* (Swedish University of Agricultural Sciences, Ed.; SUAS). Swedish University of Agricultural Sciences. <https://www.researchgate.net/publication/327388476>
- Tello Espinoza, P., Campani, D., Sarafian, D. R., & AIDIS. (2018). Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. In *AIDIS: Vol. Vol. 1* (AIDIS).
- Toruño Sotelo, L. A., Lira Ruiz, E. I., Casco Dávila, D. M., & Reyes Aguilera, E. A. (2017). *Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos*.
- Ülgüdür, N., Ergüder, T. H., Uludağ-Demirer, S., & Demirer, G. N. (2019). High-rate anaerobic treatment of digestate using fixed film reactors. *Environmental Pollution*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.115>
- Universidad de Murcia. (1988). *La digestión anaerobia* (EDITUM).

- van Haandel, A., Kato, M. T., Cavalcanti, P. F. F., & Florencio, L. (2006). Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 5, Issue 1, pp. 21–38). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-4888-y>
- Varnero, M. T. (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 Agricultura. Global Environment Facility.
- Veeken, A., Kalyuzhnyi, S., Scharff, H., & Hamelers, B. (2000). Effect of pH and VFA on Hydrolysis of Organic Solid Waste. *Journal of Environmental Engineering*, 126(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:12\(1076\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:12(1076))
- Vongvichiankul, C., Deebao, J., & Khongnakorn, W. (2017). Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester. *Energy Procedia*, 138, 877–882. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.113>
- Wang, K., Yin, J., Shen, D., & Li, N. (2014). Anaerobic digestion of food waste for volatile fatty acids (VFAs) production with different types of inoculum: Effect of pH. *Bioresource Technology*, 161, 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.088>
- Wang, Q., Feng, K., & Li, H. (2020). Nano iron materials enhance food waste fermentation. *Bioresource Technology*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123804>
- Ward, A., & Rao Ravella, S. (2008). *Software sensor monitoring and fuzzy control of biogas production*. <https://www.researchgate.net/publication/283652957>
- WBA. (2018). *Global Bioenergy Statistics*. [www.worldbioenergy.org](http://www.worldbioenergy.org)
- Wu, Y., Kovalovszki, A., Pan, J., Lin, C., Liu, H., Duan, N., & Angelidaki, I. (2019). Early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of corn stalk: A combined experimental and simulation approach. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1442-7>
- Zhang, P., Cristhian, C.-O., & Zhang, J. (2022). Additive strategies for enhanced anaerobic digestion for bioenergy and biochemicals. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 131–158). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90633-3.00014-6>
- Zhou, J., You, X., Niu, B., Yang, X., Gong, L., Zhou, Y., Wang, J., & Zhang, H. (2020). Enhancement of methanogenic activity in anaerobic digestion of high solids sludge by nano zero-valent iron. *Science of The Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135532>