



Universidad
Europea CANARIAS

Trabajo Fin de Máster

Biogás de aguas residuales en zonas rurales de Chile:
estudio del impacto ambiental y económico

Javiera Saba Martínez

Tutor: Rocío Carabaño Rodríguez

Escuela de Arquitectura.

3 de marzo de 2026

Índice

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Introducción	5
Antecedentes	8
Marco teórico.....	10
1. Biodigestión y producción de biogás.....	10
2. Biogás como fuente de energía renovable	19
3. Biogás como reemplazo de la leña.....	20
4. Gestión de residuos domésticos	22
Hipótesis	24
Objetivos.....	25
Metodología	26
Enfoque y tipo de investigación.....	26
Recolección de información.....	26
Análisis de impactos	27
Análisis y resultados	28
1. Caracterización de una vivienda rural.....	28
2. Territorio: macrozonas y su contexto climático.....	32
3. Casos de estudio.....	33
4. Disponibilidad de sustrato orgánico por macrozona.....	35
5. Potencial de producción de biogás por macrozona	38
6. Evaluación comparada de impactos ambientales, económicos y sociales	43
7. Comparación integral de escenarios	51
8. Interpretación de resultados	53
Conclusiones	56
Futuras líneas de trabajo	58
Referencias.....	59
Anexos	66
Anexo A: Disponibilidad de estiércol pecuario y su potencial de producción de biogás	66
Anexo B: Estimación de caudal de aguas residuales domésticas y su carga orgánica.....	72
Anexo C: Estimación de carga orgánica y potencial de biogás de RSO domiciliarios.....	76
Anexo D: Ajuste climático del potencial de biogás por macrozona	80
Anexo E. Cálculo de Retorno y Beneficio/Costo por macrozona y escenario.....	83

Resumen

El acceso limitado a sistemas de saneamiento y la alta dependencia de la leña como fuente energética continúan siendo desafíos estructurales en zonas rurales de Chile, generando impactos ambientales, sanitarios y sociales significativos. El presente Trabajo de Fin de Máster evalúa el impacto ambiental, económico y social de la instalación de biodigestores domiciliarios para la producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos orgánicos en viviendas rurales aisladas.

La investigación adopta un enfoque mixto, combinando análisis cuantitativo del potencial energético con evaluación cualitativa de impactos. Se definió como unidad funcional una vivienda rural tipo de tres habitantes, considerando tres macrozonas climáticas (norte, centro y sur). Se estimó la disponibilidad de residuos sólidos orgánicos, estiércol pecuario y aguas residuales domésticas, modelando escenarios favorable y conservador e incorporando ajustes climáticos.

Los resultados indican un potencial anual de producción de biogás entre 328 y 523 m³ por vivienda, equivalente a una fracción significativa de la demanda energética para cocina y calefacción. La implementación del biodigestor permitiría reducir entre 0,8 y 1,3 toneladas de CO₂ anuales asociadas a la sustitución de leña, además de disminuir emisiones de material particulado fino (MP2,5) y mejorar el tratamiento descentralizado de aguas residuales. El análisis económico muestra viabilidad en escenarios realistas, particularmente con apoyo parcial de financiamiento público.

Se concluye que los biodigestores domiciliarios constituyen una alternativa técnicamente viable y ambientalmente pertinente para fortalecer la autonomía energética y mejorar las condiciones sanitarias en contextos rurales aislados de Chile.

Palabras clave: biodigestores domiciliarios; biogás; saneamiento rural; residuos orgánicos; transición energética; zonas rurales de Chile.

Abstract

Limited access to sanitation systems and the high reliance on firewood as a primary energy source remain structural challenges in rural areas of Chile, generating significant environmental, health, and social impacts. This Master's Thesis evaluates the environmental, economic, and social impacts of installing household biodigesters to produce biogas from domestic wastewater and organic residues in isolated rural households.

The research adopts a mixed-methods approach, combining quantitative estimation of energy potential with qualitative assessment of environmental and social effects. A representative rural household of three inhabitants was defined as the functional unit, considering three climatic macrozones (north, central, and south). The availability of household organic waste, livestock manure, and domestic wastewater was estimated under favourable and conservative scenarios, incorporating climatic adjustment factors to reflect operational conditions.

Results indicate an annual biogas production potential ranging from 328 to 523 m³ per household, covering a significant share of cooking and heating energy demand. Implementation of household biodigesters could reduce between 0.8 and 1.3 tons of CO₂ emissions per year associated with firewood substitution, while also decreasing fine particulate matter (PM_{2.5}) emissions and improving decentralized wastewater treatment. From an economic perspective, the cost-benefit analysis suggests feasibility under realistic conditions, particularly with partial public financial support.

The study concludes that household biodigesters represent a technically viable and environmentally sound solution to enhance energy autonomy and improve sanitary conditions in isolated rural contexts in Chile.

Keywords: household biodigesters; biogas; rural sanitation; organic waste valorisation; energy transition; rural Chile.

Introducción

El calentamiento global presenta una amenaza importante y urgente para las sociedades actuales y futuras. Se estima que los efectos de la crisis climática afectan a la seguridad alimentaria, energética e hídrica, e impactan a la salud humana, las economías, la naturaleza y, desproporcionadamente, a las comunidades más vulnerables que menos aportan al cambio climático. La actividad humana es la mayor causa del calentamiento global, principalmente a través de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por el uso de combustibles fósiles y procesos industriales (IPCC, 2023). Muchos países dependen de los combustibles fósiles para suplir sus necesidades de energía, que es necesaria para todos los aspectos de desarrollo, por lo que es fundamental buscar formas de suministro energético que sean asequibles, eficientes, seguras y con un mínimo impacto ambiental (Walekhwa et al., 2009). Para lograr un desarrollo sostenible, especialmente en zonas rurales, es imprescindible garantizar un acceso a energías renovables limpias y asequibles y, es en este contexto actual, que el biogás derivado de la digestión anaeróbica de aguas residuales y material orgánico de residuos residenciales tiene un potencial único como suministro de energía limpio y seguro con un bajo impacto ambiental (Surendra et al, 2014).

El biogás consiste de metano (CH_4) en un 55-70 % y dióxido de carbono (CO_2) en un 30-45 %, además de trazas de otros gases, esto depende del material orgánico y del proceso de digestión. El biogás no solo genera energía que puede ser utilizada dentro de las casas familiares, sino que ayuda a disminuir el consumo de leña como biomasa y los niveles de contaminación asociados a la combustión, además de producir fertilizantes para los cultivos de las familias campesinas (Varnero Moreno, 2011).

Las comunidades rurales en Chile se dividen en comunidades concentradas con más de 150 habitantes y una densidad mayor a 15 viviendas por km de red pública de agua; comunidades semiconcentradas con una población mínima de 80 personas y una densidad de

8 viviendas por km de red pública de agua; y comunidades dispersas. Según el Ministerio de Obras Públicas (MOP), el Programa de Agua Potable Rural (APR) ha logrado una cobertura del 100 % en las comunidades concentradas y de un 57 % en las localidades rurales semiconcentradas, el 43 % restante, al igual que las comunidades dispersas, se abastece de manera irregular a través de pozos, caudales o camiones aljibes. Según el Instituto Nacional de Estadística de Chile (INE), en el censo de 2024, se pudo evidenciar que aproximadamente un 8 % (494.036 viviendas encuestadas) de todas las viviendas encuestadas no tiene acceso a la red pública de alcantarillado. De estas viviendas, un 4,1 % se abastece de agua desde pozos, cerca de un 2 % se abastece de camiones aljibes y un 1,8 % se abastece de ríos, esteros, canales, vertientes o fuentes no declaradas.

Las principales dificultades del acceso a agua potable y a la gestión de aguas residuales en zonas rurales provienen de la dispersión geográfica, las limitaciones económicas y poca inversión privada, la falta de infraestructura adecuada y el bajo incentivo para buscar soluciones sostenibles (Nevzorova & Kutcherov, 2019).

En cuanto al tratamiento de aguas servidas, a diciembre de 2024, existen 2445 Servicios Sanitarios Rurales (SSR) en Chile, pero solo 371 plantas cuentan con red de alcantarillado o tratamiento de aguas servidas (Dirección de Obras Hidráulicas, 2024). La mala gestión de residuos residenciales puede generar impactos negativos sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos, la salud humana y la calidad de vida de las mismas familias.

Estas aguas servidas pueden tener una segunda vida al convertirse en materia prima para producir energía en forma de gas metano y fertilizante, conocido como biol, para cultivos a través de la digestión anaeróbica, y así abordar el desafío de producción de energía y tratamiento de aguas residuales en zonas rurales.

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental y económico de reutilizar aguas residuales para la generación de biogás en viviendas familiares de zonas rurales aisladas de Chile. Para el análisis se va a revisar la información y bibliografía disponible y estimaciones teóricas que aporten a la gestión ambiental y energética en contextos rurales.

Antecedentes

Entre los años 2005 y 2010, se llevó a cabo en Bolivia el programa Componente Acceso a Servicios Energéticos¹ para aumentar la cantidad de personas que puedan acceder a energía a través de tecnologías modernas para satisfacer sus necesidades básicas a largo plazo, con lo que también se mejora la calidad de vida y se generan nuevas oportunidades económicas. Una de las tecnologías implementadas fueron los biodigestores, el programa se adaptó a las demandas de la gente, sus necesidades y capacidades para enfocarse en proyectos visibles y concretos. Generalmente las familias que habitan en zonas rurales se dedican a la agricultura a pequeña escala con una baja cantidad de ganado (dos o tres animales) y pueden utilizar el estiércol para producir combustible y fertilizante natural mejorado. Este programa incluyó apoyo financiero, asesoramiento técnico y operativo, además de gestión de conocimiento y fortalecimiento de redes privadas y gubernamentales.

Luego de tres meses de la implementación del plan piloto, se obtuvo una respuesta positiva de las familias y de la adaptación de los biodigestores a las condiciones climáticas de la zona. El programa fue extendido a más regiones, donde una de las herramientas más exitosas fue la organización de talleres de capacitación para la construcción de biodigestores familiares de bajo costo. Se estima que lograron capacitar a más de 1000 familias.

Este programa se diseñó considerando tres límites básicos: la disponibilidad de agua para la mezcla a introducir en el biodigestor; la cantidad de ganado en cada vivienda familiar y la apropiación de la tecnología por parte de la familia (Martí Herrero, 2008). Por lo que no solo los biodigestores fueron diseñados según las condiciones familiares, sino que también se

¹Programa de Desarrollo Agropecuario Sostenible - PROAGRO; Componente Acceso a Servicios Energéticos. Programa financiado por el Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), ejecutado por la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) y cofinanciado por el Gobierno del Reino de los Países Bajos.

adaptaron componentes dentro del hogar, como las cocinas para una combustión más eficiente.

De este proyecto se desprenden varias lecciones, la principal lección es que se deben tomar todas las medidas posibles para que las familias sientan un alto grado de apropiación de esta tecnología y así generar un mayor compromiso y adherencia desde la instalación de los biodigestores hasta que comience a producir biogás y fertilizante. Como son las mujeres las que se encargan de las labores domésticas, es necesario que sean ellas las que se hagan cargo de la tecnología para producir combustible; por otro lado, son los hombres los que normalmente se encargan de los cultivos y de la tierra, por lo tanto, la producción de fertilizante ecológico y natural despierta mayor interés en el hombre. Además, la participación de toda la familia en la instalación ayuda a su apropiación y entendimiento.

En relación a la divulgación, la forma más acertada es con demostraciones reales con biodigestores modelo para que los vecinos puedan ver el funcionamiento, manejo y los beneficios. También se concluye que se obtiene mayor beneficio al instalar estos modelos demostrativos en dos familias de una comunidad para generar apoyo mutuo en relación con el trabajo, las dudas y el conocimiento.

Marco teórico

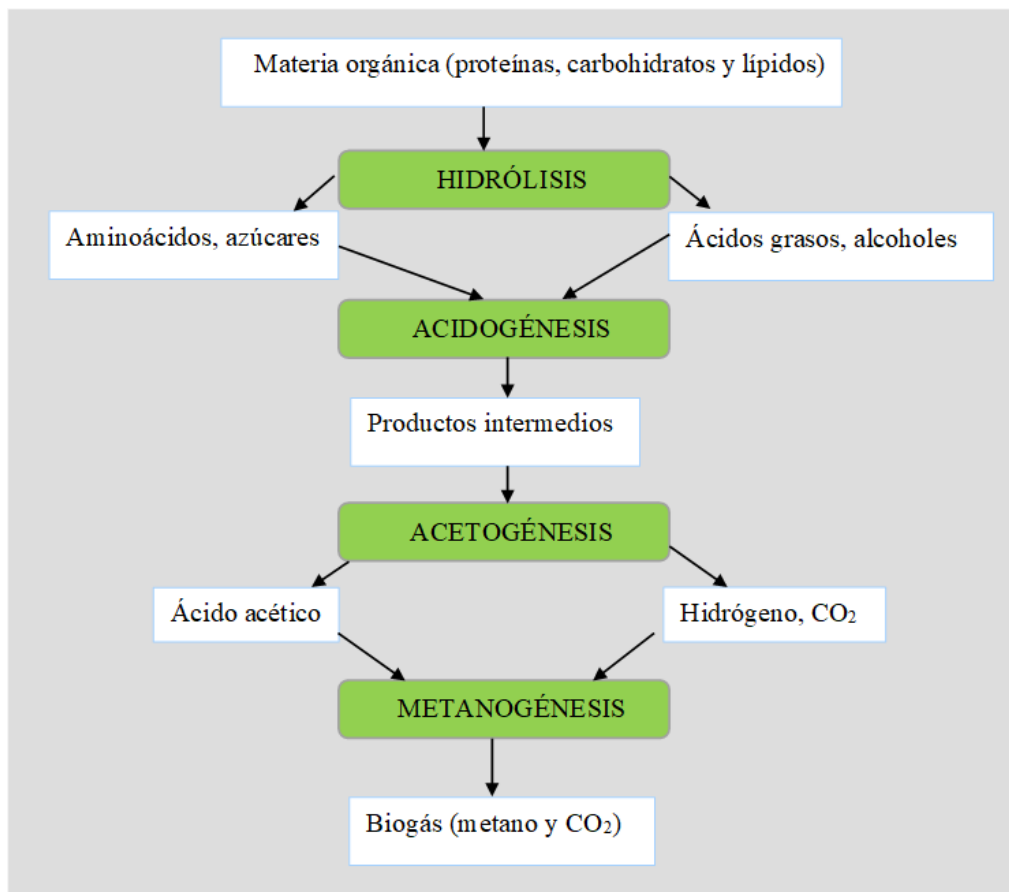
1. Biodigestión y producción de biogás

1.1. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica (DA) consiste en un proceso biológico donde microorganismos descomponen materia orgánica, como residuos alimentarios y agrícolas, en contenedores sellados sin la presencia de oxígeno. Este proceso se lleva a cabo en 4 etapas principales: hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica (Varnero Moreno, 2011). Como resultado, se obtiene biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y fertilizante rico en nutrientes, conocido como biol (Pinto & Quipuzco, 2015).

Figura 1

Digestión anaeróbica.



Nota. La figura representa un esquema representativo de la digestión anaeróbica. Tomada de Díaz et al., 2023; Varnero Moreno, 2011.

1.1.1. Hidrólisis

La primera etapa es la hidrólisis enzimática de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que ocurre gracias a la acción de enzimas extracelulares que hidrolizan moléculas de cadena larga para obtener compuestos solubles más sencillos (ácidos grasos, azúcares simples y aminoácidos). La velocidad del proceso depende de diversos factores, como el tipo de materia orgánica, la temperatura, la retención de agua y la naturaleza del sustrato, entre otros (Adekunle & Okolie, 2015; Varnero Moreno, 2011).

1.1.2. Etapa acidogénica o fermentativa

En la etapa acidogénica ocurre la fermentación de las moléculas orgánicas solubles, formando ácidos orgánicos de cadena corta y gases, como el dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2), y alcoholes que deben ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa. Las bacterias presentes en esta etapa además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Varnero Moreno, 2011).

1.1.3. Etapa acetogénica

En esta fase, los ácidos orgánicos producidos en la fase anterior son consumidos como sustrato. Los productos que no pueden ser convertidos a metano directamente por organismos metanogénicos son convertidos en productos más sencillos, ácidos grasos volátiles y alcoholes son oxidados y transformados por bacterias acetogénicas en sustratos como acetato e hidrógeno (Adekunle & Okolie, 2015; Varnero Moreno, 2011). Como resultado del metabolismo de las bacterias anaeróbicas, se producen ácidos volátiles sencillos que se van a utilizar como sustrato en la etapa siguiente.

1.1.4. Etapa metanogénica

Esta última etapa es la más importante en la producción de gas metano, los microorganismos metanogénicos forman metano y dióxido de carbono bajo condiciones anaeróbicas estrictas (Adekunle & Okolie, 2015) a partir de los productos resultantes de las

etapas anteriores. Esta etapa es la más lenta del proceso, los microorganismos metanogénicos son extremadamente sensibles a las condiciones del pH, la presencia de oxígeno y otros factores (Dinh Pham Vat et al., 2020), por lo que un aumento de la alimentación de sustrato, la temperatura o la posible entrada de oxígeno podrían causar el cese del proceso.

1.2. Biodigestores

Un biodigestor o digestor anaeróbico de desechos orgánicos está compuesto principalmente por un contenedor herméticamente cerrado (el reactor) donde se depositan las materias primas a digerir, un contenedor o reservorio de biogás, una válvula de seguridad, y los accesorios para la entrada de material orgánico a digerir, para salida del biogás y salida de digestato o material orgánico fertilizante (Arrieta, 2016; Varnero Moreno, 2011). Se pueden clasificar según su modo de alimentación como continuos, semicontinuos o discontinuos o régimen estacionario. En el modelo continuo, la alimentación se realiza de forma ininterrumpida, el material orgánico de carga es igual al efluente de descarga, y la producción de biogás es uniforme en el tiempo (Arrieta, 2016; Varnero Moreno, 2011). Corresponden a plantas de gran capacidad, generalmente para el tratamiento de aguas negras, y el biogás producido se aprovecha en aplicaciones industriales (Varnero Moreno, 2011). En los biodigestores semicontinuos, se realiza una primera carga con una gran cantidad de materia orgánica, luego se agregan cargas según el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el volumen total del digestor. Este modelo se usa en zonas rurales con biodigestores pequeños de uso doméstico (Arrieta, 2016). Los diseños más populares son el modelo chino, el modelo indio y el modelo tubular para uso doméstico, aunque han sufrido modificaciones para adaptarse a los distintos contextos geográficos y socioeconómicos. Los digestores discontinuos o régimen estacionario se cargan con materia orgánica en una sola carga o lote (“batch”), luego de la fermentación son vaciados completamente y se alimentan para dar inicio a un nuevo proceso de digestión.

Martí Herrero (2008) también agregó al modelo tubular un contenedor de biogás de plástico instalado cerca del hogar que se conecta a las cocinas a través de tuberías de PVC. La importancia de este reservorio es que al ser de plástico, se puede apretar para aumentar la presión cuando esta disminuye.

1.2.1. Biodigestores domésticos

1.2.1.1. Biodigestor de domo fijo

El modelo de domo fijo o modelo chino es uno de los modelos más comunes y de mayor uso en Asia y África para la producción de biogás (Jegade et al., 2019). Este modelo consiste en la instalación de un tanque de mezcla con una tubería de entrada, una cámara cilíndrica subterránea fija de ladrillo y una cámara de salida o expansión. El biodigestor se alimenta de manera semicontinua a través de la tubería de entrada hasta que el nivel del influente alcanza la base de la cámara de expansión. El biogás producido se acumula y almacena en la parte superior del digestor, sobre el sustrato. La diferencia de niveles entre la mezcla dentro del digestor y la cámara de expansión genera un aumento de presión del gas, el cual desplaza parte del sustrato hacia la cámara de salida o expansión. Durante el uso del biogás, la liberación de presión permite que el sustrato fluya nuevamente hacia el biodigestor, generando un régimen de mezcla interna que favorece el funcionamiento del sistema (Jegade et al., 2019; Rajendran et al., 2012).

El tamaño de estos biodigestores depende de la ubicación, el número de habitantes del hogar familiar y la cantidad de material orgánico disponible diariamente (Rajendran et al., 2012). Las ventajas de este modelo son su larga vida útil, alrededor de 20 años, confiabilidad y bajo mantenimiento (Arrieta, 2016; Tolessa, 2024), aunque requieren una gran inversión inicial y amplio conocimiento técnico para garantizar la estanqueidad del sistema, lo que puede ser una dificultad según el terreno. A pesar de estas limitaciones, el biodigestor de domo fijo ha sido promovido de manera extensiva por programas nacionales de biogás

apoyados por organizaciones no gubernamentales en países en desarrollo (Jegade et al., 2019; Tolessa, 2024).

1.2.1.2. Biodigestor de domo flotante

El biodigestor de domo o cúpula flotante, también conocido como modelo indio, cuenta con un digestor vertical bajo tierra fabricado con ladrillo y una cámara móvil de recolección de biogás, o gasómetro, de acero que se desplaza hacia arriba a medida que se acumula el gas, y desciende cuando se extrae el biogás. El movimiento del gasómetro logra una presión constante dentro del biodigestor, proporciona agitación parcial al sustrato, además de eliminar la espuma que se forma en los biodigestores (Varnero Moreno, 2011).

Se alimenta una vez al día por gravedad, con patrones de carga de afluente y descarga de efluente similares al biodigestor de domo fijo, el volumen de mezcla depende del tiempo de retención (Varnero Moreno, 2011). La principal desventaja de este modelo es el alto costo asociado a la fabricación de una cámara de acero y la necesidad de mantenimiento para evitar la corrosión del metal (Jegade et al., 2019).

1.2.1.3. Biodigestores tubulares

Los biodigestores tubulares reemplazan la cámara de concreto o de acero de los modelos chinos o indios por una manga cilíndrica de plástico flexible, fabricada generalmente de polietileno de doble capa o geomembrana de PVC, lo que reduce la inversión en materiales y mano de obra (Arrieta, 2016). Se instala de forma horizontal semienterrada o a la intemperie sobre una base de concreto o arena compactada (Jegade et al., 2019). Este tipo de biodigestor ha sido ampliamente utilizado como una solución de bajo costo en países de América Latina y África, destacándose por su facilidad y rapidez de instalación, por su operación sencilla, bajo costo de implementación, la posibilidad de operar en un amplio rango de temperaturas y la ausencia de requerimientos de agitación mecánica o calefacción activa para evitar la sedimentación del material dentro del reactor (Tavera-Ruiz et

al., 2023). Debido a la delgada cubierta del reactor, la radiación solar es absorbida de manera más eficiente que en los biodigestores de domo, lo que permite alcanzar temperaturas internas más elevadas; sin embargo, esta misma característica provoca altas pérdidas de calor durante la noche y en períodos invernales, afectando la estabilidad térmica del proceso (Jegade et al., 2019). Para evitar pérdidas de calor, se pueden utilizar medidas de calefacción pasivas, como la instalación de un invernadero para aprovechar la energía solar.

Este modelo se alimenta con un flujo semicontinuo con una mezcla de agua y material orgánico a través de un canal de admisión de afluente. La principal desventaja de este modelo es su limitada vida útil, que puede ser de 2 a 5 años, debido a los materiales del digestor más susceptible a daños por intervenciones externas que los domos de concreto. Además, la posibilidad de reparación va a depender del nivel de daño causado.

Tabla 1

Comparación de los biodigestores domésticos.

	Modelo domo fijo	Modelo domo flotante	Modelo Tubular
Materiales	Ladrillo y concreto	Ladrillo y gasómetro de acero	Plástico flexible
Ubicación	Subterráneo	Subterráneo	Semienterrado o a la intemperie
Alimentación	Semicontinua	Semicontinua, una vez al día	Semicontinua
Vida útil	Alta, hasta 20 años	Media, según mantenimiento de acero	Baja, de 2 a 5 años
Costo de inversión	Alto	Alto	Bajo
Tamaño (m3)	6-10	4-10	3-10
Ventajas	Duradero, bajo mantenimiento	Funcionamiento fácil, presión de gas constante	Bajo costo, diseño simple
Desventajas	Requiere alto conocimiento técnico para su instalación	Costo y mantenimiento de cámara de acero	Corta vida útil

Nota. La tabla representa una comparación entre los biodigestores domésticos mencionados en el presente estudio. Tomado de Jegede et al, 2019.

1.3. Parámetros de funcionamiento de biodigestores domésticos

1.3.1. Alimentación y dilución del sustrato

Los biodigestores domésticos suelen operar con esquemas de alimentación semicontinua, con cargas diarias o algunas veces por semana, dependiendo del diseño del biodigestor y de la disponibilidad de sustrato (Pinto & Quipuzco, 2015; Guillén & Rivas, 2012), empleando una mezcla de agua y material orgánico con baja concentración de sólidos totales. De forma general, el contenido de sólidos totales del influente se sitúa entre 5 y 10 %, lo que equivale a una fracción de agua cercana al 90–95 % (Rajendran et al., 2012). Este grado de dilución facilita el flujo del sustrato dentro del reactor y reduce la sedimentación de sólidos, especialmente en sistemas que no cuentan con mecanismos de agitación mecánica.

Aunque el aumento de la concentración de sólidos permite incrementar la carga orgánica aplicada, concentraciones cercanas o superiores al 19 % de sólidos totales afectan negativamente la producción de biogás, debido a la acumulación de sólidos y a la limitada capacidad de mezcla interna (Jegade et al., 2019). En digestores familiares que utilizan estiércol bovino, relaciones de dilución cercanas a 1:1 (estiércol:agua) han mostrado un funcionamiento estable cuando se combinan con tiempos de retención adecuados y cargas orgánicas moderadas, del orden de $\approx 1,2\text{--}1,6 \text{ g SV/L}\cdot\text{d}$ (Haryanto et al., 2018).

1.3.2. Carga orgánica y tiempo de retención hidráulica

El tamaño y volumen de los biodigestores domésticos están directamente relacionados con la carga orgánica aplicada y el tiempo de retención hidráulica (TRH). En condiciones mesófilas, la carga orgánica específica suele situarse entre 1 y 3 kg SV/m³·día, mientras que los TRH típicos varían entre 20 y 60 días en climas templados. Estudios experimentales han reportado TRH de 30 días (Pinto & Quipuzco, 2015) y de 40 días (Vanegas-Padilla et al., 2023), obteniendo un desempeño estable del proceso y una producción adecuada de metano.

En zonas frías o en digestores rurales de diseño simple, donde la temperatura de operación es más baja, el TRH puede extenderse hasta 90 o incluso 100 días para asegurar una degradación suficiente de la materia orgánica y evitar fallas del proceso (Rajendran et al., 2012; Guillén & Rivas, 2012). La reducción excesiva del TRH mediante el aumento de la carga orgánica puede provocar inestabilidad del sistema, acumulación de ácidos grasos volátiles y una disminución en la producción de metano, por lo que se recomienda un equilibrio entre carga aplicada y tiempo de retención (Haryanto et al., 2018; Jegede et al., 2019).

1.3.3. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más determinantes en el rendimiento de los biodigestores domésticos. En sistemas enterrados y sin calefacción activa es común la operación en el rango psicrófilo, entre 10 y 20 °C, donde la digestión anaeróbica es posible, aunque con velocidades de reacción y producción de biogás más bajas. Ferrer et al. (2015) reportaron temperaturas internas entre 10 y 23 °C mediante la integración de invernaderos en biodigestores ubicados en zonas de alta altitud, alcanzando tasas de producción cercanas a 0.2 m³ de biogás/m³·día.

El rango mesófilo, entre 30 y 37 °C, se considera óptimo para maximizar la producción de metano. Pinto & Quipuzco (2015) operaron biodigestores domésticos a una temperatura media de 31.8 °C, aproximadamente 6 °C por encima de la temperatura ambiente, identificando esta diferencia térmica como favorable para el rendimiento del sistema. Dado que la mayoría de los biodigestores domésticos no dispone de calefacción activa, se emplean estrategias pasivas como el aislamiento térmico, el uso de invernaderos y el aprovechamiento de la radiación solar para reducir las pérdidas de calor y amortiguar las variaciones térmicas diarias (Arrieta, 2016).

1.3.4. pH, relación carbono/nitrógeno y mezcla

Diversos estudios coinciden en que el rango óptimo de pH se sitúa entre 6,8 y 7,5 (Pinto & Quipuzco, 2015), aunque valores entre 6,0 y 8,0 pueden ser tolerables en biodigestores domésticos bien amortiguados (Díaz Yanevich et al., 2023). Vanegas-Padilla et al. (2023) evidenciaron una fuerte correlación positiva ($r = 0,96$) entre la producción de metano y el pH, destacando la importancia de corregir sustratos ácidos mediante agentes alcalinizantes, como soluciones de CaO.

Asimismo, la relación carbono/nitrógeno (C/N) del sustrato influye directamente en la estabilidad del proceso, siendo recomendable mantener valores entre 20 y 30 para evitar inhibiciones por exceso de nitrógeno o limitaciones de carbono (Rajendran et al., 2012). En cuanto a la mezcla, la mayoría de los biodigestores domésticos opera sin agitación mecánica; la mezcla suave o intermitente generada durante las etapas de alimentación y descarga suele ser suficiente cuando se trabaja con bajas cargas orgánicas y tiempos de retención prolongados, contribuyendo a un funcionamiento estable del sistema (Sarker et al., 2019; Rajendran et al., 2012).

Tabla 2

Rangos de funcionamiento para biodigestores domésticos.

Parámetro	Rango recomendado o valor típico	Observaciones	Referencias
Frecuencia de alimentación	Semicontinua o una vez al día	Favorece estabilidad del proceso	Pinto & Quipuzco, 2015; Guillén & Rivas, 2012
Temperatura	15-20 °C	Producción más lenta, digestores subterráneos	Ferrer et al., 2015
	30-37 °C	Temperatura óptima, máxima producción de metano	Pinto & Quipuzco, 2015
Sólidos totales (ST)	5-10 %	90-95 % de agua	Rajendran et al., 2012
Límite crítico de ST	≤ 19 %		Jegade et al., 2019
Carga orgánica	1-3 kg SV/m ³ ·día		Rajendran et al.,

Parámetro	Rango recomendado o valor típico	Observaciones	Referencias
			2012
TRH	20-60 días	Climas templados	Pinto & Quipuzco, 2015
	90-100 días	Climas fríos	Guillén & Rivas, 2012
pH	6,8-7,5	Óptimo	Pinto & Quipuzco, 2015

Nota. Rangos recomendados de funcionamiento para biodigestores domésticos, especialmente en contextos rurales con limitaciones tecnológicas y económicas.

2. Biogás como fuente de energía renovable

El biogás constituye una fuente de energía renovable que se puede usar para producir calor, electricidad y combustibles. Su aprovechamiento energético se basa en la valorización de residuos orgánicos. A escala doméstica y rural, el biogás se utiliza principalmente en cocina y calefacción, como sustituto de la leña, el carbón o el gas licuado (FAO 2011; IEA, 2020).

2.1. Emisiones y seguridad energética

El aprovechamiento del potencial total de residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica podría reducir entre 3,3 y 4,4 Gt de CO₂ equivalente por año, lo que representa alrededor del 10 al 13 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Kabeyi & Olanrewaju, 2022). Estas reducciones provienen tanto de la sustitución de combustibles fósiles como de la mitigación de emisiones de metano que se producirían por la descomposición no controlada de los residuos orgánicos.

En términos de seguridad energética, el biogás presenta ventajas significativas al basarse en recursos locales, reduciendo la dependencia de leña, combustibles importados y la exposición a la volatilidad de los mercados energéticos. Además, su producción descentralizada y continua mejora la resiliencia de los sistemas energéticos rurales y contribuye a disminuir la pobreza energética (Rajendran et al., 2012; Jegede et al., 2019).

2.2. Transición energética en contextos rurales

El biogás producido a partir de residuos domésticos puede sustituir combustibles tradicionales como la leña, el carbón o el gas licuado de petróleo. Ferrer et al. (2015) demostraron que biodigestores domésticos de 5 m³ pueden producir suficiente biogás para cubrir entre 3 y 4 horas diarias de cocción, contribuyendo a reducir la presión sobre los recursos forestales y mejorando la calidad del aire en los hogares rurales.

La flexibilidad del biogás permite su uso directo para calor, su conversión en electricidad mediante sistemas de cogeneración (CHP) con eficiencias superiores al 70 %, o su purificación a biometano para sustituir gas natural (Mohamed Farghali et al., 2022). Esta versatilidad lo convierte en una opción estratégica para avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles y resilientes, especialmente en comunidades rurales con acceso limitado a redes energéticas convencionales (Arrieta, 2016).

3. Biogás como reemplazo de la leña

Desde una perspectiva integral, los biodigestores domésticos han sido caracterizados como tecnologías ambientalmente adecuadas y económicamente viables. Díaz et al. (2023) destacan que estos sistemas no solo presentan ventajas económicas para hogares rurales familiares, sino que también ofrecen beneficios ambientales relevantes al integrar la gestión de residuos con la producción de energía renovable. A escala doméstica, los sistemas de biogás pueden reemplazar aproximadamente 1,5 toneladas anuales de leña, evitando emisiones cercanas a 2 toneladas de CO₂ por hogar y reduciendo la presión sobre los recursos forestales (Mohamed Farghali et al., 2022).

3.1. Consumo de leña en Chile

La biomasa forestal sigue siendo el principal combustible para calefacción y cocina en amplias zonas del país. Se estima que el consumo residencial alcanza el 27,4 % de la matriz primaria de energía, del cual un 28 % se usa para calefacción en el sector comercial-público-

residencial (CNE 2023). Según la Comisión Nacional Forestal (Conaf), el consumo anual de leña es cercano a los 19 millones de m³ estéreos, relativamente alto en relación con otros países de igual condición climática debido a la pobreza energética y a un arraigado uso cultural. En las regiones de la zona centro-sur y sur de Chile, entre un 60 a 90 % de hogares utiliza leña para calefaccionar (Huneus et al., 2020).

3.2. Contaminación por consumo de leña

La combustión de leña en hogares es la principal fuente de contaminación del aire por material particulado fino en Chile. Según datos del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), en 2022 las emisiones de MP 2,5 por combustión de leña alcanzaron 125.720 toneladas. Según estimaciones del MMA, alrededor de 10 millones de ciudadanos estuvieron expuestos en el año 2018 a concentraciones promedio diarias de MP2,5 superiores a lo establecido por la norma chilena actual (50 µg/m³) y aún más lejos del límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (de 25 µg/m³) (Huneus et al., 2020).

En ciudades de la zona sur del país, la combustión de leña causa el 80 a 95 % de las emisiones de MP2,5 durante el periodo de invierno, especialmente cuando se utilizan equipos de baja eficiencia y leña con alto contenido de humedad (CONAF, 2021). La región de La Araucanía es la que presenta la mayor cantidad de emisiones de MP2,5 asociadas al uso de leña durante el invierno, con 28 828 toneladas en 2022 (MMA, 2022).

3.3. Impacto de la leña sobre la salud humana

Según la OMS, en el año 2021, la contaminación del aire doméstico por quema de combustibles sólidos causó 2,9 millones de muertes a nivel mundial, de las cuales más de 309 000 correspondían a menores de 5 años. El material particulado fino ingresa profundamente al sistema respiratorio y está asociado a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras, afectando principalmente a mujeres, niños y adultos mayores, que pasan más tiempo en el hogar.

3.4. Impacto social

Se ha observado que implementar biodigestores en hogares que dependen de la leña tiene un impacto positivo en las mujeres y niños, quienes suelen ser los responsables de su recolección (Martí Herrero, 2008). Al disminuir la dependencia de la leña, las mujeres no necesitan dedicar tanto tiempo a recolectar leña y cocinar, por lo que tienen más tiempo para otras actividades que les permitan utilizar su tiempo libre para aumentar el ingreso económico familiar (Tolessa, 2024). Los niños pueden dedicar el tiempo de recolección a actividades escolares o de ocio. Asimismo, la adopción de esta tecnología fortalece capacidades locales, promueve la autonomía energética y contribuye al desarrollo rural sostenible (Díaz et al., 2023)

4. Gestión de residuos domésticos

4.1. Aguas residuales

Pinto & Quipuzco (2025) compararon el uso de aguas residuales domésticas combinadas con estiércol porcino, frente al uso de agua de pozo con estiércol porcino, y concluyeron que el uso de aguas residuales como sustrato es más efectivo que el uso de agua de pozo al alcanzar una mayor producción de metano (85,19 L/kg de sólidos volátiles frente a 69,8 L/kg de sólidos volátiles) y mejores rendimientos de biogás (436,2 L frente a 357,4 L de volumen total). Ferrer Martí et al. (2015) señalan que los biodigestores pueden conectarse directamente a las letrinas y lograr una integración directa con sistemas domésticos de aguas residuales.

4.2. Beneficios sanitarios

Uno de los beneficios ambientales y de salud pública más relevantes asociados al uso de biodigestores domésticos es la reducción de microorganismos patógenos. Pinto & Quipuzco (2015) documentaron una disminución aproximada del 90 % en los niveles de coliformes totales y fecales tras el proceso de digestión anaeróbica. Esta reducción contribuye

significativamente a mejorar las condiciones sanitarias en zonas rurales, disminuye los riesgos de contaminación del agua y de transmisión de enfermedades asociadas al manejo inadecuado de residuos orgánicos.

4.3. Valorización de residuos domésticos

Diversos estudios destacan el rol de los biodigestores como herramientas eficaces para la gestión de residuos orgánicos domésticos, agrícolas y pecuarios. En lugar de ser desechados de manera incontrolada, estos residuos pueden ser transformados en energía útil. Según Díaz et al. (2023), los biodigestores permiten que pequeñas unidades rurales conviertan residuos de origen animal, vegetal y agrícola, que comúnmente son descartados, en bioenergía, promoviendo un enfoque de valorización de residuos y economía circular.

Además del biogás, el proceso de digestión anaeróbica produce un efluente líquido rico en nutrientes, conocido como biol. Pinto & Quipuzco (2015) señalan que este subproducto contiene nitrógeno, fósforo y potasio, elementos esenciales para la fertilidad del suelo. Su uso como fertilizante orgánico permite reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, aportando beneficios ambientales adicionales y cerrando el ciclo de los nutrientes dentro de los sistemas productivos rurales.

Hipótesis

Instalar biodigestores en viviendas familiares de zonas rurales para producir biogás genera un impacto ambiental positivo ya que disminuye el uso de leña, ofrece un sistema de saneamiento de aguas, reduce los desechos orgánicos y se puede obtener fertilizante para cultivos.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es conocer y analizar los impactos ambientales y económicos de la producción de biogás a partir de reutilizar aguas residuales en zonas rurales de Chile para el autoabastecimiento energético de viviendas familiares.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar el potencial de producir biogás a partir de aguas residuales en viviendas familiares.
- Determinar los impactos ambientales y a la salud humana asociados a la implementación de biodigestores.
- Determinar la viabilidad económica de instalar biodigestores en viviendas o comunidades.
- Comparar la situación actual de las familias con los posibles impactos y beneficios sociales y económicos de introducir medidas sostenibles en las viviendas.

Metodología

Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación tiene un enfoque mixto, que combina métodos cualitativos y cuantitativos, lo que permite un enfoque de investigación más amplio e integral al analizar variables medibles (como la producción de biogás, los costos de instalación de biodigestores y la cantidad de desechos) y variables como el impacto ambiental, social y el impacto en la calidad de vida de las familias.

El estudio es de tipo descriptivo y analítico que busca detallar y caracterizar la situación actual de las viviendas rurales y evaluar los posibles efectos de instalar biodigestores en los hogares familiares. Tiene un alcance exploratorio-evaluativo debido a que la implementación de biodigestores de uso doméstico en zonas rurales de Chile aún es limitada y requiere un estudio para obtener una visión general e identificar sus características, además de interpretar y evaluar el impacto de la propuesta.

El área de estudio se centró en las zonas rurales de Chile, considerando viviendas familiares semiconectadas y dispersas que no cuentan con acceso a tratamiento de aguas residuales y que utilizan leña para calefacción y cocina. El estudio evalúa la instalación de biodigestores domiciliarios para el tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos.

Recolección de información

La investigación se basa principalmente en fuentes secundarias, se realizó el análisis de revisión bibliográfica que incluye artículos científicos, informes técnicos y documentos oficiales de organismos nacionales e internacionales relacionados con producción de biogás, biodigestores de uso industrial y doméstico y saneamiento rural.

Además, se realizó el análisis de estos datos secundarios y de estudios documentados para obtener estadísticas oficiales sobre consumo energético y sus costos, uso de leña y la contaminación asociada, la problemática social y las condiciones sanitarias en zonas rurales.

El análisis de estudios de casos documentados permitió estimar el potencial de producción de biogás y los impactos ambientales, económicos y sociales positivos y negativos relacionados con la instalación de biodigestores domésticos.

Análisis de impactos

Para realizar la evaluación de los impactos ambientales, se llevó a cabo una comparación entre la situación actual de las viviendas rurales y el escenario de implementación de biodigestores domésticos. Para esta comparación, se midieron variables como el uso de leña, la contaminación asociada con la quema de biomasa, el tratamiento de aguas residuales, la disminución de residuos orgánicos y su valorización como fertilizante. La evaluación cualitativa de los impactos ambientales, complementada con el análisis de ciclo de vida (ACV) de biodigestores domésticos de pequeña escala, permiten una evaluación detallada de la generación de biogás y el tratamiento de residuos.

Para el análisis económico, se llevó a cabo un análisis costo beneficio donde se evaluaron los costos de inversión, operación y mantenimiento en comparación con los beneficios económicos de sustituir el uso de leña para calefacción y cocina y el uso de fertilizantes biol producto de la digestión anaeróbica.

El análisis social también incluyó el impacto en la salud de las familias, este análisis se enfocó en los posibles efectos sobre la calidad de vida, considerando aspectos como los cambios en las condiciones sanitarias, los impactos en la salud humana por dejar de usar leña, la autonomía energética, la concienciación sobre energías renovables y el cambio climático y los posibles beneficios de involucrar a la comunidad en actividades que les entreguen herramientas para mejorar la calidad de vida.

Análisis y resultados

1. Caracterización de una vivienda rural

1.1. Definición de la unidad funcional

Para el presente estudio, se definió como unidad funcional a una vivienda rural promedio en Chile, ubicada en zonas semiconectadas o dispersas sin acceso a red de alcantarillado ni tratamiento de aguas sanitarias.

Se consideró un tamaño promedio de 3 personas por vivienda, con base en los datos recientes entregados por el Censo 2024 (Instituto Nacional de Estadística, 2024).

Esta caracterización se basa en datos provenientes de estadísticas oficiales, literatura científica y estudios sobre condiciones de habitabilidad rural, con el fin de construir un escenario representativo que permita evaluar el potencial de producción de biogás y sus impactos ambientales, económicos y sociales.

Se asume además que la vivienda rural tipo presenta características comunes en distintas zonas del territorio nacional, tales como el uso de leña para cocina y calefacción, la falta de tratamiento avanzado de aguas sanitarias y la presencia de actividades domésticas vinculadas a la producción agropecuaria de pequeña escala, incluyendo la crianza de aves y ganado.

1.2. Condiciones energéticas actuales

En términos energéticos, la vivienda rural tipo presenta un sistema de abastecimiento mixto, caracterizado por el uso de leña como principal fuente para cocina y calefacción, complementado con acceso a electricidad domiciliaria y al uso de gas licuado en cilindros para actividades específicas del hogar.

El consumo de leña constituye la base del abastecimiento térmico doméstico, especialmente en contextos rurales donde su disponibilidad es mayor y su uso está culturalmente arraigado, lo que implica impactos relevantes en términos ambientales,

sanitarios y económicos. Por su parte, la utilización de gas en cilindros es una práctica extendida en Chile; sin embargo, su disponibilidad depende de la presencia y frecuencia de distribuidores en zonas rurales, por lo que el recambio suele realizarse una vez que el cilindro en uso se agota, generando periodos variables de dependencia de la leña como principal fuente energética.

1.3. Gestión de aguas residuales

En zonas rurales semiconectadas o dispersas sin acceso a redes de alcantarillado, las aguas residuales generadas en las viviendas se gestionan principalmente mediante soluciones individuales o sistemas locales de tratamiento. Entre las alternativas más comunes se encuentran el pozo negro, las letrinas, en distintas variantes, y las casetas sanitarias con fosa séptica y sistema de drenaje o pozo absorbente, las cuales presentan distintos niveles de eficiencia y condiciones sanitarias (SUBDERE, 2018).

Para efectos del presente estudio, se asume que la vivienda rural tipo dispone de una fosa séptica básica como sistema de tratamiento primario de aguas residuales, solución que no asegura una depuración avanzada ni la valorización de la materia orgánica contenida en los efluentes.

1.4. Generación de residuos valorizables

1.4.1. Residuos sólidos orgánicos domiciliarios

En Chile, la información sobre la cantidad de residuos orgánicos generados en viviendas de sectores rurales es limitada debido a la dispersión territorial y a la dificultad de acceso a datos sistemáticos; sin embargo, es posible establecer aproximaciones a partir de estadísticas nacionales y literatura técnica.

De acuerdo con información del Ministerio del Medio Ambiente, en Chile se generan anualmente más de 7,9 millones de toneladas de residuos sólidos domiciliarios, de los cuales aproximadamente un 58 % corresponde a residuos sólidos orgánicos (RSO). Considerando

que en el censo de 2024 se reportaron un total de 6 596 527 de hogares a nivel nacional, es posible estimar un orden de magnitud de generación cercano a los 695 kg de residuos orgánicos por vivienda al año, equivalente a aproximadamente 13–14 kg semanales por hogar ($\approx 1,9$ kg diarios). Para una vivienda tipo de tres habitantes, esto representa cerca de 0,6 kg de residuos orgánicos por persona al día.

Si bien estos valores corresponden a promedios nacionales que integran realidades urbanas y rurales, permiten establecer una base metodológica válida para estimaciones teóricas en ausencia de datos específicos del sector rural.

Tabla 3

Estimación de residuos sólidos orgánicos domiciliarios por vivienda

Indicador	Estimación
RSO domiciliarios (kg/día)	$\approx 1,91$ kg
RSO domiciliarios (kg/semana)	$\approx 13,41$ kg
RSO domiciliarios (kg/año)	≈ 697 kg

Nota. Elaboración propia basada en la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2020-2040 del Ministerio del Medio Ambiente.

La generación de residuos domiciliarios presenta variaciones regionales asociadas a factores demográficos, socioeconómicos y territoriales; no obstante, en el presente estudio se adopta un valor promedio nacional con el fin de construir un escenario base comparable entre macrozonas. Dado que el análisis se desarrolla a escala de unidad funcional y no a partir de volúmenes regionales, esta aproximación no compromete la coherencia del modelo, aunque constituye una simplificación que debe considerarse en la interpretación de los resultados.

1.4.2. Disponibilidad de estiércol pecuario por macrozona

Adicionalmente, en el contexto rural es habitual la presencia aves de corral y ganado orientado al autoconsumo. En estos sistemas, el estiércol animal representa una fuente relevante de materia orgánica susceptible de ser valorizada energéticamente.

Para estimar su disponibilidad se utilizaron factores técnicos de generación diaria de estiércol. Considerando la distribución territorial del ganado en Chile, se definieron tres escenarios representativos por macrozona:

- Zona Norte: predominio de caprinos y ovinos.
- Zona Centro: sistema mixto con bovino de pequeña escala, porcinos y aves.
- Zona Sur: mayor presencia de bovinos y ovinos.

A partir de estos criterios se definieron configuraciones representativas de vivienda rural con actividad pecuaria familiar, permitiendo estimar la masa diaria de estiércol disponible como sustrato potencial para la digestión anaeróbica.

Las estimaciones se realizaron mediante las siguientes expresiones:

- Estiércol diario (kg/día) = Número de animales $\times$ factor de generación (kg/animal·día)

Tabla 4

Resultados estimados por macrozona

Macrozona	Estiércol (kg/día)
Norte (5 caprinos + 5 ovinos + 10 aves)	19,3
Centro (1 bovino + 2 porcinos + 10 aves)	16,3
Sur (2 bovinos + 5 ovinos + 10 aves)	29,3

Nota. Estimaciones de estiércol disponible. Elaboración propia con base en Varnero Moreno, 2011 e INE, 2019.

Los resultados expuestos en la tabla anterior demuestran diferencias significativas entre las tres macrozonas, principalmente asociadas con el tipo y la cantidad de cabezas de animales considerados en cada escenario.

Es importante señalar que estas estimaciones corresponden a escenarios representativos y no a promedios estadísticos nacionales. La disponibilidad real de estiércol puede variar según el sistema de manejo (estabulación o pastoreo), las prácticas de recolección y las condiciones climáticas locales. No obstante, los valores obtenidos permiten

establecer órdenes de magnitud consistentes para evaluar el potencial energético de biodigestores domésticos en distintos contextos territoriales.

2. Territorio: macrozonas y su contexto climático

Debido a su extensión latitudinal y diversidad geográfica, Chile presenta una marcada variabilidad climática, con diferencias significativas en temperatura media anual, régimen de precipitaciones y condiciones ambientales generales. Estas variables resultan relevantes para el análisis de biodigestores domésticos, dado que influyen en el desempeño operativo del sistema y en la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica.

Para efectos del presente estudio, se agruparon las regiones administrativas del país en tres macrozonas climáticas: norte, centro y sur, de acuerdo con la clasificación de la Dirección Meteorológica de Chile. Esta división permite representar de manera sintética las principales diferencias térmicas y ambientales del territorio nacional.

Tabla 5

Macrozona climática y condiciones térmicas promedio

Macrozona	Regiones incluidas	Temperatura media anual aprox.	Precipitaciones media anual aprox.	Características
Norte	Arica y Parinacota a Coquimbo	15-22 °C	< 250 mm/año	Clima árido y semiárido, alta radiación solar, baja disponibilidad hídrica
Centro	Valparaíso a Biobío	12-16 °C	300-900 mm/año	Clima templado mediterráneo, estaciones marcadas
Sur	La Araucanía a Magallanes	6-12 °C	1000-3000 mm/año	Clima templado frío y lluvioso, con alta humedad

Nota. Elaboración propia con base en la Dirección Meteorológica de Chile.

Esta clasificación territorial constituye la base para el análisis comparativo posterior, permitiendo integrar las diferencias climáticas con la disponibilidad de sustrato orgánico y las condiciones energéticas de la vivienda rural tipo.

3. Casos de estudio

Con el fin de evaluar el potencial de producción de biogás en viviendas rurales semiconectadas o dispersas sin acceso a red de alcantarillado, se definieron tres escenarios territoriales de análisis correspondientes a las macrozonas norte, centro y sur de Chile.

Dado que el estudio corresponde a una evaluación teórica basada en información secundaria, los escenarios deben entenderse como representaciones metodológicas de viviendas rurales con actividad doméstica y agropecuaria de pequeña escala, y no como promedios estadísticos nacionales.

La unidad funcional se mantiene constante en los tres casos: una vivienda rural tipo compuesta por tres habitantes, sin acceso a red de alcantarillado, con uso predominante de leña para cocina y calefacción, acceso a electricidad domiciliaria y utilización complementaria de gas en cilindros. Asimismo, se asume la presencia de una solución sanitaria basada en fosa séptica básica y la generación de residuos orgánicos domésticos y pecuarios.

Para cada uno de los escenarios se consideraron cuatro grupos de variables:

- La variable climática, que considera temperatura y precipitación media anual y las implicancias térmicas de estas condiciones para la digestión anaeróbica.
- La variable de producción, que considera la presencia de ganado para el autoconsumo, los tipos de ganado predominantes en cada macrozona y la disponibilidad estimada de estiércol.
- La variable doméstica, donde se incluye la generación de residuos sólidos orgánicos y aguas residuales domésticas.
- La variable energética y sanitaria, que considera el uso de leña para cocina y calefacción, el acceso a electricidad y gas licuado y el uso de una fosa séptica como tratamiento primario de aguas residuales.

3.1. Escenario macrozona norte

Representa viviendas rurales ubicadas en zonas áridas y semiáridas del país. Se considera un sistema productivo familiar con predominio de caprinos y ovinos, acompañado de aves de corral. La disponibilidad de agua puede constituir una limitante operativa, aunque la incorporación de aguas residuales domésticas permite complementar la fracción líquida del sustrato.

3.2. Escenario macrozona centro

Las viviendas rurales ubicadas en la zona cuentan con un clima templado mediterráneo. Se considera un sistema productivo doméstico mixto, con presencia de bovinos de pequeña escala, porcinos y aves. La disponibilidad de sustrato orgánico es intermedia y relativamente estable durante el año.

3.3. Escenario macrozona sur

Este escenario representa viviendas rurales localizadas en zonas de clima templado frío y lluvioso, con temperaturas medias anuales más bajas. Se considera una mayor presencia de bovinos y ovinos en sistemas de autoconsumo, lo que incrementa la disponibilidad de estiércol como fracción predominante del sustrato orgánico.

Tabla 6

Síntesis de escenarios de análisis por macrozona

Variable	Norte	Centro	Sur
Sistema energético	Leña + electricidad + gas cilindro	Leña + electricidad + gas cilindro	Leña + electricidad + gas cilindro
Sistema sanitario	Fosa séptica básica	Fosa séptica básica	Fosa séptica básica
RSO domiciliarios	≈1,9 kg/día	≈1,9 kg/día	≈1,9 kg/día
Aguas residuales	Generación doméstica (3 hab)	Generación doméstica (3 hab)	Generación doméstica (3 hab)
Ganado	Caprino + ovino +	Bovino + porcino +	Bovino + ovino +

predominante	aves	aves	aves
Oportunidad principal	Estabilidad térmica	Equilibrio sistema	Alta carga orgánica
Limitante principal	Disponibilidad de agua	Estacionalidad	Temperatura baja

Nota. Elaboración propia

La construcción de estos escenarios permite integrar los principales factores de rendimiento que influyen en la viabilidad de los biodigestores domésticos en viviendas rurales. En las secciones siguientes se cuantificará la disponibilidad total de sustrato orgánico por macrozona, considerando residuos sólidos, estiércol y aguas residuales, y se estimará el potencial de producción de biogás bajo las condiciones definidas.

4. Disponibilidad de sustrato orgánico por macrozona

La estimación del potencial de producción de biogás en viviendas rurales requiere determinar la cantidad total de materia orgánica disponible para digestión anaeróbica en cada escenario territorial. Para ello, se consideran tres fuentes principales de sustrato: residuos sólidos orgánicos domiciliarios, estiércol pecuario y aguas residuales domésticas.

La integración de estas tres corrientes permite caracterizar la carga orgánica potencialmente valorizable en biodigestores domésticos, considerando tanto la fracción sólida como líquida del sistema.

4.1. Residuos sólidos orgánicos domiciliarios

La estimación de residuos sólidos orgánicos (RSO) domiciliarios disponibles se realizó a partir de datos nacionales de residuos municipales reportados por el Ministerio del Medio Ambiente, considerando la fracción orgánica promedio y la cantidad total de viviendas registradas en el Censo 2024 del Instituto Nacional de Estadísticas.

Se estimó la siguiente generación promedio de residuos sólidos orgánicos:

- 1,91 kg de RSO por vivienda por día

- 13,41 kg por semana
- 697 kg por año

Este valor se adopta como la línea base para los tres escenarios, donde se asumen condiciones domésticas similares en una vivienda familiar rural tipo.

4.2. Estiércol pecuario por macrozona

La cantidad de estiércol pecuario disponible se estimó con base en las representaciones de sistemas de autoconsumo rural por macrozona, donde se consideraron especies predominantes y factores de generación diaria reportados en literatura técnica nacional sobre biodigestores domésticos (Varnero Moreno, 2011)

Estos valores corresponden a masa fresca potencialmente disponible para digestión anaeróbica:

Tabla 7

Estimación de estiércol disponible por macrozona

Macrozona	Cabezas de ganado	Estiércol (kg/día)
Norte	5 caprinos + 5 ovinos + 10 aves	19,3
Centro	1 bovino + 2 porcinos + 10 aves	16,3
Sur	2 bovinos + 5 ovinos + 10 aves	29,3

Nota. Elaboración propia con base en Varnero Moreno, 2011 e INE, 2019.

El detalle de los factores de generación utilizados y los cálculos asociados se presentan en el Anexo A.

4.3. Carga orgánica de aguas residuales domésticas

La generación de aguas residuales se estimó considerando el consumo per cápita de agua y un coeficiente de retorno doméstico, de acuerdo con parámetros utilizados en informes y estudios de saneamiento en Chile (SISS; Ministerio de Vivienda y Urbanismo).

Para una vivienda tipo de tres habitantes se estimó:

- 365,52 L de aguas residuales por día
- 0,12 kg de DBO por día

La carga orgánica se expresa como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), indicador ampliamente utilizado en la evaluación de potencial de digestión anaeróbica y producción de metano (IPCC, 2019).

El procedimiento de estimación, supuestos y conversiones se detallan en el Anexo B.

4.4. Integración de sustratos por macrozona

A continuación, se resume la disponibilidad total de sustrato orgánico por vivienda rural de 3 habitantes, donde se consideran residuos sólidos, estiércol pecuario y aguas residuales domésticas.

Tabla 8

Disponibilidad total de sustrato orgánico por macrozona

Macrozona	RSO (kg/día)	Estiércol (kg/día)	Aguas residuales (L/día)	DBO (kg/día)
Norte	1,91	19,3	365,52	0,12
Centro	1,91	16,3	365,52	0,12
Sur	1,91	29,3	365,52	0,12

Nota. Elaboración propia. La estimación del caudal y la carga de DBO se detalla en el Anexo B.

Con estos resultados, se puede inferir que la macrozona sur presenta la mayor disponibilidad de materia orgánica fresca, relacionada principalmente con una mayor presencia de ganado bovino y ovino. Las macrozonas norte y centro presentan menores valores de estiércol, aunque comparten niveles similares de residuos domiciliarios y aguas residuales.

Si bien la masa fresca de estiércol constituye la principal fracción del sustrato, la incorporación de aguas residuales domésticas resulta relevante desde el punto de vista microbiológico y operativo, ya que aporta materia orgánica disuelta, mejora la relación sólido-líquido del sistema y favorece la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica.

Esta caracterización de la disponibilidad total de sustrato constituye la base para el cálculo del potencial de producción de biogás en cada macrozona, el cual se desarrolla en la sección siguiente.

5. Potencial de producción de biogás por macrozona

5.1. Enfoque metodológico y escenarios considerados

Para calcular el potencial de producción de biogás se integraron los sustratos orgánicos disponibles en un hogar familiar rural de tres habitantes: (i) residuos sólidos orgánicos domiciliarios (RSO), (ii) estiércol pecuario recolectable y (iii) aguas residuales domésticas. Los cálculos realizados para obtener la disponibilidad de estiércol según especie y macrozona se describen en el Anexo A; los cálculos que se siguieron para obtener el caudal y la carga orgánica (DBO) de aguas residuales se describen en el Anexo B; mientras que las estimaciones para obtener el potencial de biogás de los RSO domiciliarios se describen en el Anexo C.

Se definieron dos escenarios de análisis con el fin de incorporar variabilidad en los tipos de residuos orgánicos: escenario favorable, con rendimientos inferiores según la literatura disponible bajo condiciones adecuadas; y un escenario conservador, que considera rendimientos reductor para reflejar las posibles variaciones.

Posteriormente, este potencial teórico fue ajustado a las condiciones climáticas (temperatura y precipitación) por macrozona debido al impacto en el desempeño del biodigestor.

5.2. Potencial de producción de biogás

5.2.1. Aporte de biogás del estiércol pecuario

Los valores de producción de biogás por tipo de estiércol de animal obtenidos son (véase Anexo A, Tabla A.5.):

- Norte: 1,019 m³/día
- Centro: 0,814 m³/día
- Sur: 1,319 m³/día

5.2.2. Aporte de biogás desde aguas residuales domésticas

El aporte de biogás a partir de aguas residuales es el siguiente (véase Anexo B):

$$VAR \approx 0,17 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.2.3. Aporte de biogás desde residuos sólidos orgánicos domiciliarios

Se estimó que el aporte de biogás de RSO domiciliarios en un escenario favorable es el siguiente (véase Anexo C, Tabla C.1):

$$V_{RSO, fav} = 0,301 \text{ m}^3/\text{día}$$

En un escenario conservador, este valor es el siguiente:

$$V_{RSO, cons} = 0,215 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.2.4. Potencial teórico total por macrozona

La integración de los tres sustratos permite estimar el potencial diario total de producción de biogás para cada macrozona, sin considerar aún el ajuste climático. El cálculo para estimar el potencial teórico total por macrozona es el siguiente:

$$V_{teo} = V_{est} + V_{RSO} + VAR$$

Macrozona norte

Escenario favorable: $1,019 + 0,301 + 0,17 = 1,490 \text{ m}^3/\text{día}$

Escenario conservador: $1,019 + 0,215 + 0,17 = 1,404 \text{ m}^3/\text{día}$

Macrozona centro

Escenario favorable: $0,814 + 0,301 + 0,17 = 1,285 \text{ m}^3/\text{día}$

Escenario conservador: $0,814 + 0,215 + 0,17 = 1,199 \text{ m}^3/\text{día}$

Macrozona sur

Escenario favorable: $1,319 + 0,301 + 0,17 = 1,790 \text{ m}^3/\text{día}$

Escenario conservador: $0,814 + 0,215 + 0,17 = 1,199 \text{ m}^3/\text{día}$

Los resultados indican que la macrozona sur representa un mayor potencial teórico de producción de biogás, asociado principalmente a una mayor disponibilidad de estiércol

bovino. La macrozona norte muestra valores intermedios y la macrozona centro presenta el menor potencial bruto debido a una menor carga orgánica pecuaria en el escenario modelado.

De todas formas, es el estiércol el que representa la principal contribución al volumen total de biogás, seguido por RSO domiciliario, y las aguas residuales representan un aporte constante pero menor.

5.3. Ajuste climático por macrozona

Considerando que la digestión anaeróbica es sensible a la temperatura (Varnero Moreno, 2011), se aplicó un factor de ajuste climático diferenciado por macrozona (véase Anexo D). Este ajuste permite estimar una producción más representativa de condiciones reales, especialmente en zonas con temperaturas medias anuales inferiores al rango óptimo mesofílico.

Tras aplicar los factores de corrección climática definidos en el modelo, se obtiene el potencial de volumen de biogás representativo que podría producirse bajo condiciones reales de operación en cada macrozona:

Tabla 9

Potencial ajustado de biogás por macrozona

Macrozona	Escenario	Biogás ajustado (m ³ /día)	Biogás ajustado (m ³ /año)
Norte	Favorable	1,416	516,7
Norte	Conservador	1,193	435,6
Centro	Favorable	1,156	422,1
Centro	Conservador	0,899	328,2
Sur	Favorable	1,432	522,7
Sur	Conservador	1,022	373,2

Estos resultados muestran que el ajuste climático reduce en mayor medida el potencial de la macrozona sur, donde las temperaturas medias anuales son más bajas, lo que disminuye el desempeño esperado en el escenario conservador, mientras que la macrozona norte presenta una menor penalización debido a condiciones térmicas más favorables para la digestión anaeróbica.

5.4. Energía equivalente del biogás producido

Con el fin de interpretar el potencial energético del biogás producido en términos de uso doméstico, se realizó la conversión del volumen anual de biogás ($V_{biogás}$) a energía calórica mediante el poder calorífico inferior (PCI). Dado que el biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono, su contenido energético depende de la fracción de metano; para efectos del presente estudio se adopta una composición típica de 60% CH₄, coherente con biodigestión de residuos orgánicos domésticos.

La energía disponible se estimó con el siguiente cálculo:

$$E = V_{biogás} \cdot PCI_{biogás}$$

Donde E es la energía térmica disponible (MJ/año), $V_{biogás}$ es el volumen de biogás producido (m³/año) y $PCI_{biogás}$ es el poder calorífico inferior del biogás (MJ/m³)

Para biogás con aproximadamente 60 % de metano se adopta un valor representativo en base a la literatura aceptada de:

$$PCI_{biogás} = 22 \text{ MJ/m}^3$$

La energía anual también puede expresarse en kWh, donde 1 kWh = 3,6 MJ, mediante la conversión:

$$E_{kWh} = \frac{E}{3,6}$$

5.4.1. Uso doméstico en cocina y calefacción

En el modelo del presente estudio se asume que el biogás producido en biodigestor es conducido mediante una cañería hacia la vivienda y es utilizado como combustible para cocina y calefacción. Por tanto, la energía estimada corresponde a energía térmica disponible para estos usos. En aplicaciones reales, la energía aprovechada dependerá de la eficiencia de

los equipos. Para evitar sobreestimar beneficios, se puede analizar la energía bruta del biogás y la energía útil aplicando una eficiencia promedio.

Ejemplo de cálculo en un escenario favorable

A modo de ejemplo, se presenta la conversión energética de los valores anuales ajustados de volumen de biogás del escenario favorable por macrozona, donde:

- Macrozona norte: 516,7 m³/año
- Macrozona centro: 422,1 m³/año
- Macrozona sur: 522,7 m³/año

Los siguientes resultados permiten expresar el potencial de producción de biogás como energía térmica anual disponible en un escenario favorable para su uso en cocina y calefacción, con esto se facilita su interpretación como sustituto de combustibles tradicionales.

Macrozona norte:

$$E = 516,7 \cdot 22 = 11\,367,4 \text{ MJ/año}$$

$$E_{kWh} = \frac{11\,367,4}{3,6} = 3157,6 \text{ kWh/año}$$

Macrozona centro:

$$E = 422,1 \cdot 22 = 9286,2 \text{ MJ/año}$$

$$E_{kWh} = \frac{9286,2}{3,6} = 2579,5 \text{ kWh/año}$$

Macrozona sur:

$$E = 522,7 \cdot 22 = 11\,499,4 \text{ MJ/año}$$

$$E_{kWh} = \frac{11\,499,4}{3,6} = 3194,3 \text{ kWh/año}$$

6. Evaluación comparada de impactos ambientales, económicos y sociales

6.1. Marco comparativo de escenarios

El presente análisis compara dos escenarios para una vivienda rural tipo en Chile:

- Escenario actual: uso predominante de leña para calefacción y cocina, junto con soluciones sanitarias individuales convencionales (fosa séptica, pozo negro u otras alternativas descentralizadas).
- Escenario con biodigestor domiciliario: valorización de residuos orgánicos (estiércol, RSO y fracción orgánica de aguas residuales) con producción de biogás para cocina y calefacción, y generación de digestato como biol.

Los resultados energéticos utilizados corresponden al potencial ajustado por macrozona estimado en el Capítulo 5.

6.2. Impacto ambiental

6.2.1. Consumo de leña

Con los volúmenes ajustados de biogás y un contenido energético medio de 6,11 kWh/m³, el biodigestor aportaría aproximadamente entre 2006 y 3194 kWh/año según macrozona y escenario para cocina y calefacción. Esta sustitución representa una reducción directa en la demanda de biomasa forestal, especialmente relevante en la zona centro-sur donde la leña constituye el principal combustible residencial.

6.2.2. Reducción de CO₂ de combustión

Aplicando el factor del IPCC para madera (112.000 kg CO₂/TJ) sobre la energía desplazada, el orden de magnitud de CO₂ evitado es ~0,81 a ~1,29 tCO₂/año según macrozona y escenario (IPCC, 2006). Esta estimación corresponde a emisiones de combustión residencial (cocción y calefacción) de biomasa. En inventarios climáticos, el CO₂ biogénico suele tratarse de forma distinta y el beneficio climático neto depende de sostenibilidad de extracción, carbono del bosque y sustituciones reales (IPCC, 2006).

Adicionalmente, la captura y combustión del metano generado en el biodigestor implica una reducción potencial de emisiones de CH₄ que, expresadas como CO₂ equivalente (GWP100 AR6), podrían alcanzar valores del orden de 3,7–5,9 tCO₂e/año, dependiendo del escenario y del supuesto de metano efectivamente evitado (IPCC, 2023). Este resultado debe interpretarse con cautela, dado que depende del manejo contrafactual de estiércoles y efluentes en ausencia del biodigestor.

6.2.3. Reducción de MP2,5

La combustión residencial de leña es la principal fuente de MP2,5 en varias regiones del sur de Chile. Aplicando factores de emisión por unidad de energía reportados por el Ministerio de Energía, el material particulado evitado por vivienda se sitúa aproximadamente en:

- 3,5–5,6 kg MP2,5/año (escenario de menor emisión por uso de leña seca en calefactor eficiente).
- 19,5–31,1 kg MP2,5/año (escenario de alta emisión por uso de leña húmeda en chimenea).

Este resultado es particularmente relevante en términos de exposición intradomiciliaria, ya que la sustitución por biogás elimina el humo visible y reduce la generación de partículas en el punto de uso.

6.2.4. Valorización de residuos

Se estima que el biodigestor podría procesar las siguientes cantidades de residuo al año aproximadamente:

- ~ 697 kg de RSO domiciliarios
- ~ 6 a 11 toneladas de estiércol animal según macrozona
- ~ 133 m³ de aguas residuales domésticas

Estas magnitudes permiten dimensionar el rol del biodigestor como sistema integrado de tratamiento y valorización a escala doméstica.

6.2.5. Tratamiento de aguas residuales

En el contexto rural chileno, el saneamiento continúa siendo un desafío estructural, especialmente en comunidades dispersas donde la cobertura de alcantarillado y tratamiento centralizado es limitada y los costos de conexión resultan elevados. En este escenario, soluciones descentralizadas como los biodigestores domiciliarios adquieren relevancia al integrar tratamiento primario de aguas residuales con generación energética a escala doméstica.

Desde el punto de vista sanitario, la digestión anaeróbica permite reducir significativamente la carga orgánica y los niveles de microorganismos indicadores presentes en las aguas residuales, con disminuciones reportadas cercanas al 90 % en condiciones domésticas controladas. No obstante, el efluente resultante requiere manejo adecuado cuando se destina a uso agrícola, considerando que la eliminación de patógenos depende de variables como temperatura y tiempo de retención. En conjunto, el biodigestor puede contribuir a mejorar las condiciones sanitarias en viviendas rurales sin infraestructura formal, siempre que su operación y gestión del digestato se realicen bajo criterios de seguridad.

6.3. Impacto social y sanitario

6.3.1. Salud respiratoria

Sustituir la leña por biogás tiene un claro impacto en la salud respiratoria al reducir la exposición a contaminantes de humo en espacios habitados (particularmente PM_{2,5}), lo que está asociado a una disminución en el riesgo de padecer enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras (OMS, 2025).

6.3.2. Autonomía energética

En comunidades dispersas, contar con autonomía energética es contar con una seguridad de suministro (ya que se evita depender de la recolección de la leña, el precio de los combustibles o, incluso, la disponibilidad de estos mismos) para cubrir usos críticos (cocina y calefacción) especialmente en comunidades dispersas.

6.3.3. Rol de mujeres y niños

La combustión de leña en el hogar genera una exposición diferenciada a contaminantes, afectando especialmente a mujeres y niños debido a su mayor permanencia en espacios interiores y a la asignación tradicional de tareas domésticas vinculadas a la cocina y al cuidado. Diversos estudios señalan que la pobreza energética presenta un componente de género, ya que las mujeres experimentan mayor exposición a condiciones térmicas inadecuadas y a contaminación intradomiciliaria (CR2, 2020; OMS, 2025).

En este contexto, reducir la dependencia de la leña no solo implica un beneficio energético, sino también una mejora en salud pública, equidad y bienestar doméstico, al disminuir la exposición a contaminantes y liberar tiempo destinado a la recolección de combustible.

6.3.4. Saneamiento y dignidad sanitaria

En viviendas rurales con soluciones sanitarias precarias o de baja eficiencia, el biodigestor domiciliario puede constituir una alternativa tecnológica complementaria que articula tratamiento y valorización de residuos orgánicos. Según el diseño adoptado, el sistema permite reducir olores y presencia de vectores, estabilizar parte de la carga orgánica mediante digestión anaeróbica y generar simultáneamente energía y fertilizante rico en nutrientes. En el contexto de brechas persistentes en cobertura y operación de saneamiento rural, estas soluciones descentralizadas pueden aportar especialmente en territorios donde la expansión de redes o sistemas convencionales no resulta viable en el corto plazo. Desde esta

perspectiva, el biodigestor se inscribe en una lógica de gestión integrada de residuos y saneamiento adaptada a la dispersión territorial.

No obstante, el impacto social y sanitario efectivo de esta tecnología depende de su apropiación y uso adecuado por parte de las familias. La literatura regional sobre biodigestión en América Latina advierte que la adopción exitosa requiere capacitación, mantenimiento periódico y adaptación cultural, particularmente en contextos donde el uso de leña constituye una práctica arraigada y multifuncional en el sur de Chile (Martí Herrero, 2008). En consecuencia, el beneficio social real no se deriva únicamente del desempeño técnico del sistema, sino también de un acompañamiento institucional adecuado, estándares de seguridad y un diseño centrado en el usuario que considere prácticas locales y condiciones climáticas.

6.4. Impacto económico

6.4.1. Ingreso mensual rural

Para dimensionar la asequibilidad, el ingreso monetario promedio mensual de hogares en zona rural se reporta en torno a los \$1.073.624 CLP (pesos de noviembre 2024, encuesta CASEN). Este valor sirve como referencia para expresar la inversión como meses de ingreso.

6.4.2. Costos de instalación y operativos

El costo de un biodigestor domiciliario varía según la tecnología y capacidad. En el mercado nacional, existen soluciones privadas orientadas al uso doméstico con precios de \$2.2-\$3.2 millones CLP con instalación básica incluida; dentro del rango global de tecnologías domésticas modulares, un biodigestor familiar puede USD 600–3.000 (≈\$550.000–2.4 millones CLP) dependiendo del tamaño y del clima.

Los costos de operación (inspección, limpieza, revisión de piezas, etc.) pueden variar entre los \$20.000 - \$40.000 CLP anuales.

En macrozonas de clima frío, la instalación del biodigestor puede requerir medidas de adaptación térmica pasiva con el fin de mantener un desempeño estable durante los meses de

bajas temperaturas. Entre las soluciones recomendadas se encuentra la incorporación de una cubierta tipo invernadero con estructura liviana (madera o metal) y plástico UV, cuyo costo estimado oscila entre \$150.000 y \$350.000 CLP. Asimismo, puede incorporarse aislamiento térmico adicional mediante materiales como poliestireno expandido, paneles aislantes o soluciones equivalentes, con un costo referencial de \$50.000 a \$150.000 CLP, dependiendo del volumen del reactor y del espesor requerido.

En zonas de alta pluviosidad, se recomienda además implementar infraestructura básica de resguardo para el acopio de estiércol y residuos orgánicos, mediante techumbre y piso firme que eviten dilución del sustrato por lluvia. Esta adaptación puede implicar una inversión adicional del orden de \$200.000 a \$400.000 CLP, según materiales y escala. Estas especificaciones constituyen costos complementarios potenciales que deben considerarse en contextos climáticos exigentes.

6.4.3. Leña: potencial de ahorro

Para estimar el ahorro económico asociado al uso del biodigestor, se comparó la energía anual generada en forma de biogás con el costo de leña seca adquirida en comercio formal. Se adopta como referencia un precio de \$7.590 CLP por saco de 25 kg de leña seca, valor correspondiente a venta en tienda formal y que no considera comercialización informal.

En términos energéticos, la leña seca presenta un poder calorífico inferior aproximado de 4,0 kWh/kg, por lo que un saco de 25 kg contiene cerca de 100 kWh de energía térmica bruta. Por su parte, el biogás producido en el sistema modelado posee un poder calorífico inferior de 22 MJ/m³, equivalente a 6,11 kWh/m³, valor adoptado consistentemente en el Capítulo 5.

Con base en los volúmenes anuales ajustados por macrozona (escenarios favorable y conservador), el biodigestor permitiría generar entre aproximadamente 2006 y 3194 kWh/año por vivienda. Esta producción equivale a la sustitución de aproximadamente 20 a 32 sacos de

leña por año, lo que representa un ahorro anual estimado entre \$152.000 y \$242.000 CLP por vivienda. En términos mensuales, ello corresponde a un rango aproximado de \$12.700 a \$20.200 CLP.

Estos resultados deben interpretarse como una estimación basada en equivalencia energética bruta entre combustibles. En la práctica, el ahorro real puede variar según la eficiencia de los artefactos utilizados (estufas o cocinas a leña), la calidad y humedad del combustible, y los patrones de consumo estacional. No obstante, el análisis permite establecer un orden de magnitud consistente del beneficio económico asociado a la sustitución parcial de leña por biogás en usos de cocina y calefacción.

Desde una perspectiva territorial, este ahorro representa una fracción del consumo anual total en macrozonas de alta demanda térmica (sur y austral), donde el uso de leña puede superar ampliamente los valores promedio nacionales. Sin embargo, incluso como sustitución parcial, el biodigestor contribuye a reducir el gasto energético doméstico y la exposición a la volatilidad de precios del mercado formal.

6.4.4. Fertilizante: potencial de ahorro y comercialización

El digestato como resultado de la digestión anaeróbica es un fertilizante, conocido como biol, rico en nutrientes según los sustratos utilizados. Su valorización, además, depende del tamaño y el sistema de cultivo, por lo que para efectos de un escenario doméstico, se prefiere modelar el beneficio de ahorro dentro de un rango conservador, por ejemplo, con un ahorro de \$0 a \$50.000 CLP/año equivalente en fertilizantes o abonos (para uso en huerto familiar o pequeños cultivos).

En cuanto a su potencial de comercialización, esta depende de diferentes factores, como transporte, volatilidad de la demanda, riesgos sanitarios, exigencias de calidad e higienización. La venta formal de este fertilizante también requiere un manejo seguro en cuanto a almacenamiento. (Lukehurst & Bywater, 2015)

6.4.5. Retorno y beneficio/costo

Para el análisis económico se evaluaron dos esquemas de inversión: (i) un caso privado (CAPEX mercado), representado por un biodigestor comercial doméstico disponible en Chile (~\$2.180.000 CLP), y (ii) un caso con aporte público o autoconstrucción (CAPEX bajo), con un costo referencial de \$550.000 CLP.

Bajo ambos casos, el periodo de recuperación simple (Payback, PB) se calculó como $PB = CAPEX / (Ahorro\ anual - O\&M)$.

El indicador Beneficio/Costo (B/C) se calculó comparando el valor presente de los ahorros por sustitución de leña con el valor presente de los costos (CAPEX + O&M), aplicando una tasa de descuento real de 5,5 % y un horizonte de 5 años, coherente con la vida útil estimada de un biodigestor tubular. El detalle metodológico se presenta en el Anexo E.

Los beneficios monetizados consideran exclusivamente el ahorro directo por sustitución de leña adquirida en comercio formal (saco 25 kg a \$7.590 CLP), mientras que los costos recurrentes corresponden a un O&M estimado en \$20.000/año.

Bajo el esquema con CAPEX bajo (\$550.000), el retorno simple se sitúa entre 2,5 y 4,2 años según macrozona y escenario, y el B/C a 5 años es mayor a 1 en casi todos los casos ($\approx 1,02-1,63$), indicando viabilidad económica bajo esquemas de subsidio o reducción de inversión inicial.

En contraste, bajo CAPEX mercado (\$2.180.000), el retorno simple oscila entre 9,8 y 16,5 años y el B/C a 5 años es inferior a 1, lo que evidencia que, considerando únicamente el ahorro en leña, la inversión privada no resulta atractiva sin apoyo externo.

Este resultado sugiere que parte relevante del beneficio del biodigestor corresponde a externalidades positivas (salud, reducción de MP2,5 y de GEI) que no se reflejan completamente en el flujo económico privado.

Tabla 10

Retorno y Beneficio/Costo a 10 años con una tasa de 5,5 % por macrozona y escenario

Macrozona – Escenario	Ahorro leña (CLP/año)	CAPEX bajo		CAPEX mercado	
		Retorno (años)	Beneficio/costo	Retorno (años)	Beneficio/costo
Norte – favorable	239 663	2,5	1,61	9,9	0,45
Norte - conservador	202 046	3,0	1,36	12,0	0,38
Centro – favorable	195 784	3,1	1,32	12,4	0,37
Centro – conservador	152 230	4,2	1,02	16,5	0,29
Sur – favorable	242 446	2,5	1,63	9,8	0,46
Sur - conservador	173 103	3,6	1,16	14,2	0,33

7. Comparación integral de escenarios

La comparación integral de los escenarios norte, centro y sur permite evaluar el desempeño relativo del biodigestor doméstico considerando dimensiones energéticas, ambientales y económicas de manera conjunta.

7.1. Desempeño energético

En términos de potencial bruto, la macrozona sur presenta la mayor disponibilidad de sustrato orgánico, principalmente por una mayor carga pecuaria. Sin embargo, al aplicar el ajuste climático, las diferencias entre macrozonas se reducen. La macrozona norte muestra un desempeño relativamente más estable debido a condiciones térmicas más favorables, mientras que la zona centro presenta un comportamiento intermedio.

En consecuencia, el rendimiento final no depende exclusivamente de la cantidad de sustrato disponible, sino de la interacción entre disponibilidad orgánica y condiciones ambientales.

7.2. Desempeño ambiental

En las tres macrozonas, la implementación del biodigestor permite reducir el consumo de leña y, por tanto, las emisiones asociadas a su combustión. Si bien los volúmenes energéticos varían entre escenarios, los órdenes de magnitud de reducción de CO₂ y material particulado son comparables.

El beneficio ambiental resulta particularmente relevante en contextos donde la leña constituye el principal combustible residencial, contribuyendo tanto a la mitigación de emisiones como a la mejora de la calidad del aire intradomiciliario. Asimismo, la valorización de residuos orgánicos y aguas residuales fortalece la gestión local de desechos bajo un enfoque de tratamiento descentralizado.

7.3. Desempeño económico

Bajo el esquema de CAPEX bajo (\$550.000 CLP) y considerando un horizonte de 5 años, la mayoría de los escenarios presentan periodos de recuperación compatibles con la vida útil estimada del biodigestor tubular y valores de B/C cercanos o superiores a la unidad, lo que sugiere viabilidad económica bajo esquemas de subsidio o reducción del costo inicial.

En contraste, bajo el CAPEX de mercado (\$2.180.000 CLP), ningún escenario alcanza viabilidad financiera en el horizonte considerado, evidenciando que el principal determinante de rentabilidad es el costo de inversión inicial más que la localización territorial.

7.4. Limitaciones y consideraciones para la implementación

7.4.1. Fugas y desempeño climático.

Un riesgo relevante en sistemas pequeños es la pérdida de metano por fugas (con efecto climático y pérdida de energía útil). Informes técnicos internacionales documentan que, en digestores pequeños con sellos/válvulas deficientes o liberaciones intencionales, las pérdidas pueden ser significativas, afectando el balance ambiental real y la disponibilidad energética para el hogar. Por ello, el desempeño del escenario con biodigestor depende de la estanqueidad, la mantención y la calidad de conexiones. Asimismo, el clima (temperatura)

condiciona la cinética de la digestión anaeróbica y puede requerir adaptaciones pasivas (aislamiento/cubiertas) en macrozonas frías para evitar caídas estacionales de producción, lo que influye tanto en resultados energéticos como en costos.

7.4.2. Salud, seguridad y operación:

La sustitución parcial de leña ofrece co-beneficios sanitarios por reducción de exposición a humo, pero no elimina la necesidad de prácticas seguras: el biogás puede contener impurezas (p. ej., H_2S), y su manejo requiere ventilación adecuada, control de fugas, válvulas en buen estado y capacitación para uso doméstico seguro. En paralelo, el digestato, aunque más estabilizado, exige manejo responsable (almacenamiento y aplicación controlada) para evitar riesgos sanitarios según el uso final.

7.4.3. Costos y ganancias sociales.

En el plano económico, los resultados son sensibles al CAPEX (mercado vs. modalidades con apoyo público/autoconstrucción) y al precio efectivo de leña (formal vs. informal o recolección). En términos sociales, aun cuando el biodigestor no cubra toda la calefacción, puede generar beneficios relevantes asociados a reducción de trabajo doméstico en aprovisionamiento de combustible, mejoras en confort y autonomía energética, y valorización de residuos (energía + biol) con potencial aporte a prácticas de economía circular a escala doméstica.

8. Interpretación de resultados

La comparación integral de escenarios evidencia que el biodigestor domiciliario presenta un potencial energético anual del orden de 2,0 a 3,2 MWh por vivienda, dependiendo de la macrozona y del escenario productivo considerado. Este nivel de producción permite sustituir aproximadamente entre 1,1 y 2,1 m³ estéreo de leña por año, lo que representa una reducción parcial pero significativa del consumo residencial destinado a cocina y apoyo térmico.

Desde una perspectiva territorial, los resultados muestran matices relevantes. La macrozona sur presenta el mayor potencial bruto de producción debido a la mayor disponibilidad de estiércol pecuario; sin embargo, su desempeño efectivo es más sensible a las condiciones térmicas, lo que puede requerir medidas de adaptación pasiva para mantener estabilidad operativa durante el invierno. En la macrozona norte, si bien la disponibilidad de sustrato puede ser menor, las condiciones climáticas más estables favorecen la operación del biodigestor, reduciendo la penalización estacional. La macrozona centro presenta un comportamiento intermedio tanto en disponibilidad de materia orgánica como en desempeño climático.

En términos ambientales, la sustitución parcial de leña se traduce en reducciones anuales aproximadas de 0,8 a 1,3 toneladas de CO₂ asociadas a combustión residencial, así como disminuciones de material particulado fino (MP2,5) cuyo rango depende del tipo de artefacto y condiciones de uso. Estos beneficios adquieren especial relevancia en macrozonas centro-sur y sur, donde la combustión residencial de leña constituye una fuente predominante de contaminación atmosférica y exposición intradomiciliaria.

Desde el punto de vista económico, el análisis demuestra que la viabilidad privada depende fuertemente del costo de inversión. Bajo esquemas de implementación con aporte público o reducción del CAPEX, el biodigestor presenta periodos de recuperación razonables y relaciones beneficio/costo favorables. En cambio, con costos comerciales de mercado y considerando únicamente el ahorro directo por leña, la viabilidad privada se vuelve más restrictiva, reforzando la pertinencia de instrumentos de apoyo público cuando se internalizan los beneficios sanitarios y ambientales.

Finalmente, el análisis evidencia que el biodigestor no debe interpretarse exclusivamente como una tecnología energética, sino como una solución integrada de gestión de residuos orgánicos y saneamiento rural. Su implementación puede contribuir

simultáneamente a la valorización de estiércoles y residuos domiciliarios, a la reducción de emisiones locales y globales, y al fortalecimiento de la autonomía energética en territorios dispersos. No obstante, su desempeño efectivo depende de factores operativos (control de fugas, mantenimiento), climáticos (temperatura) y socioculturales (aceptación y prácticas de uso), por lo que su adopción requiere acompañamiento técnico y diseño adaptado al contexto territorial.

Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Máster tuvo como objetivo general analizar los impactos ambientales, sociales y económicos asociados a la reutilización de aguas residuales domésticas para la producción de biogás en viviendas rurales aisladas de Chile, evaluando su potencial como estrategia de autoabastecimiento energético y mejora sanitaria.

Los resultados obtenidos permiten confirmar la hipótesis planteada, en tanto la instalación de biodigestores domiciliarios genera un impacto ambiental positivo al reducir el consumo de leña, disminuir emisiones contaminantes, valorizar residuos orgánicos y contribuir al tratamiento descentralizado de aguas residuales.

En relación con el primer objetivo específico (evaluar el potencial de producción de biogás), se determinó que una vivienda rural tipo de tres habitantes podría generar entre 328 y 523 m³ de biogás anuales, dependiendo de la macrozona y del escenario considerado. Tras el ajuste climático, se observa que la macrozona sur presenta el mayor potencial teórico debido a la mayor disponibilidad de estiércol bovino, mientras que la macrozona norte mantiene condiciones térmicas más favorables para la estabilidad del proceso. En todos los casos, el volumen producido resulta energéticamente significativo para cubrir una fracción relevante de las necesidades de cocina y calefacción.

Respecto al segundo objetivo, determinar los impactos ambientales y en salud, se estimó una reducción potencial de entre 0,8 y 1,3 toneladas de CO₂ anuales por vivienda asociadas a la sustitución de leña, además de una disminución relevante en emisiones de material particulado fino (MP2,5), especialmente en contextos donde se utiliza leña húmeda en equipos ineficientes. Desde el punto de vista sanitario, la digestión anaeróbica permite reducir significativamente la carga orgánica y microorganismos presentes en aguas residuales, contribuyendo a mejorar condiciones de saneamiento rural.

En relación con la viabilidad económica, los resultados indican que, bajo supuestos de sustitución parcial de leña y valorización del biol como fertilizante, el biodigestor puede representar ahorros anuales consistentes que permiten recuperar la inversión en horizontes de mediano plazo, especialmente en escenarios con apoyo parcial de financiamiento público o economías de escala comunitarias. Si bien la rentabilidad depende de factores como costos iniciales, mantenimiento y apropiación tecnológica, el análisis costo-beneficio muestra resultados favorables en escenarios realistas.

Finalmente, al comparar la situación actual con el escenario de implementación, se observa que el biodigestor domiciliario no solo constituye una alternativa energética, sino un sistema integrado de gestión de residuos y saneamiento. Los beneficios ambientales, sociales y económicos se potencian en territorios con alta dependencia de biomasa y limitada infraestructura sanitaria, posicionándolo como una herramienta pertinente para avanzar hacia modelos de desarrollo rural más sostenibles y resilientes.

No obstante, su implementación requiere considerar limitaciones técnicas asociadas a temperatura, disponibilidad hídrica, mantenimiento y capacitación de usuarios, elementos fundamentales para asegurar la estabilidad del sistema y la apropiación comunitaria.

En conclusión, los biodigestores domiciliarios representan una solución técnicamente viable y ambientalmente pertinente para viviendas rurales aisladas en Chile, con potencial para contribuir simultáneamente a la reducción de emisiones, mejora sanitaria y fortalecimiento de la autonomía energética local.

Futuras líneas de trabajo

Si bien el presente estudio permite estimar el potencial ambiental, energético y económico de los biodigestores domiciliarios en viviendas rurales aisladas de Chile, los resultados obtenidos se basan en modelaciones teóricas sustentadas en información secundaria y supuestos técnicos. En este sentido, una primera línea de investigación futura consiste en la validación empírica del modelo mediante estudios piloto en terreno que permitan contrastar los volúmenes estimados de producción de biogás con mediciones reales bajo condiciones operativas específicas de cada macrozona.

Asimismo, resulta relevante profundizar en el análisis técnico-operativo de los biodigestores domésticos en climas fríos del sur de Chile, evaluando estrategias de aislamiento térmico, uso de invernaderos o soluciones pasivas de calefacción que optimicen la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica durante períodos invernales prolongados.

Otra línea de investigación pertinente corresponde al estudio de la aceptación social y apropiación tecnológica por parte de las comunidades rurales. La sostenibilidad de estos sistemas no depende exclusivamente de su viabilidad técnica y económica, sino también de factores culturales, organizacionales y de capacitación, por lo que estudios participativos podrían aportar información clave para su implementación efectiva.

Desde una perspectiva ambiental más amplia, futuros trabajos podrían incorporar análisis de ciclo de vida (ACV) específicos para biodigestores domésticos en contexto chileno, considerando materiales de construcción, transporte, mantenimiento y disposición final, con el fin de cuantificar su impacto neto a largo plazo.

Finalmente, se recomienda explorar modelos de implementación comunitaria o cooperativa que permitan reducir costos iniciales, facilitar asistencia técnica y promover esquemas de financiamiento público-privado orientados al fortalecimiento de la transición energética rural en Chile.

Referencias

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6, 205-212.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Arrieta, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. (*Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica*). Piura, Perú: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica.
- Banks, C., Heaven, S., Zhang, Y., & Baier, U. (2018). Food waste digestion: Anaerobic Digestion of Food Waste for a Circular Economy. (J. (. Murphy, Ed.) *IEA Bioenergy Task 37*(13).
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). Recuperado el 16 de Diciembre de 2025, de Región de la Araucanía: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9>
- Center for Climate and Resilience Research. (25 de Marzo de 2020). «La pobreza energética tiene rostro de mujer» por Generadoras de Chile. Obtenido de <https://www.cr2.cl/la-pobreza-energetica-tiene-rostro-de-mujer-por-generadoras-de-chile/>
- Climate and Clean Air Coalition. (7 de Marzo de 2022). *Biogas, a Climate and Clean Air Solution with Many Benefits*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2025, de <https://www.ccacoalition.org/news/biogas-climate-and-clean-air-solution-many-benefits>
- Comisión Nacional de energía. (2023). *Balance Nacional de Energía*. Gobierno de Chile.

TFM. Biogás de aguas residuales en zonas rurales de Chile.
Máster en Gestión Ambiental y Energética de las Organizaciones

Corporación Nacional Forestal; Ministerio de Agricultura. (2025). *Antecedentes del sector de biomasa forestal para fines energéticos*. Gobierno de Chile.

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.

Díaz, C. E., Brachna, D. O., Hryczyński, E., López, W. G., & Sánchez, C. N. (2023). Biodigestores para unidades familiares periurbanas y rurales. *South Florida Journal of Development*, 4(5), 1861-1868. doi:10.46932/sfjdv4n5-002

Dirección de Obras Hidráulicas. (2024). *Diagnóstico Nacional de Saneamiento Rural*. Ministerio de Obras Públicas. Recuperado el 17 de Diciembre de 2025

Dirección Meteorológica de Chile. (2026). *Dirección Meteorológica de Chile*. Obtenido de <https://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>

Ferrer, I., Uggetti, E., Poggio, D., & Velo, E. (2015). *PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS EN BIODIGESTORES DE BAJO COSTE*. Barcelona: Grup de Recerca en Cooperació i Desenvolupament Humà.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Biogas technology in rural areas*. FAO.

Fundación Amulén. (2019). *Pobres de Agua. Radiografía del agua rural de Chile: Visualización de un problema oculto*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2025, de https://www.fundacionamulen.cl/wp-content/uploads/2020/07/Informe_Amulen.pdf

Gobierno de Chile. (Diciembre de 2015). *Política de Uso de la Leña y sus derivados*. Santiago. Recuperado el 12 de Diciembre de 2025

Guillén, R., & Rivas, O. (2012). Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 73-79.

Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojourni, S. A., Parchami, M., Parchami, M., Taherzadeh, M. J. (2022). Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen

- or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*, 13, 6521 - 6557.
doi:10.1080/21655979.2022.2035986
- Haryanto, A., Triyono, S., & Wicaksono, N. H. (2018). Effect of Hydraulic Retention Time on Biogas Production from Cow Dung in A Semi Continuous Anaerobic Digester. *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2), 93-100.
- Huneus, N. U. (2020). *Resumen para tomadores de decisiones. El aire que respiramos: pasado, presente y futuro – Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, (ANID/FONDAP/15110009). Obtenido de www.cr2.cl/contaminacion
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). *Censo de Población y Viviendas Chile*.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2019). *Encuesta de ganado bovino 2019*. INE.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). *Informe Anual Medioambiental 2024. Dimensión Agua. Región de La Araucanía*. INE.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>
- International Energy Agency. (2020). *Outlook for biogas and biomethane*. IEA.
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza: [Equipo principal de redacción, H. Lee y J. Romero (eds.)]. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- IPCC. (2023). Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental*

Panel on Climate Change. 35-115. Ginebra, Suiza: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jegede, A. O., Zeeman, G., & Bruning, H. (2019). A review of mixing, design and loading conditions in household anaerobic digesters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(22), 2117-2153. doi:10.1080/10643389.2019.1607441

Kabeyi, M. J., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas Production and Applications in the SustainableEnergy Transition. *Journal of Energy*, 2022(1). doi:https://doi.org/10.1155/2022/8750221.

Lukehurst, C., & Bywater, A. (2015). Exploring the viability of small scale anaerobic digesters in livestock farming. (D. BAxter, & C. Banks, Edits.) *IEA Bioenergy*.

Marquet, P. (2022). *Las tres brechas del desarrollo sostenible y el cierre de la brecha ambiental en Chile: oportunidades para una recuperación pospandemia más sostenible y con bajas emisiones de carbono en América Latina y el Caribe*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación. Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano*. Bolivia: GTZ-Energía.

Mignogna, D., Ceci, P., Cafaro, C., Corazzi, G., & Avino, P. (2023). Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Energy Sources: A Review. *Applied Sciences*, 13(10219). doi:https://doi.org/10.3390/app131810219

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2024 de Junio de 19). *Última actualización de la Tasa Social de Descuento genera mejores condiciones de promoción de la inversión pública en Chile*.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (s.f.). *Encuesta CASEN 2024*. Santiago. Obtenido de <https://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/encuesta-casen-2024>

TFM. Biogás de aguas residuales en zonas rurales de Chile.
Máster en Gestión Ambiental y Energética de las Organizaciones

Ministerio de Energía. (2020). *Estrategía de transición energética residencial*. Gobierno de Chile.

Ministerio de Energía, CDT. (2015). *Medición de consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*. Gobierno de Chile. Obtenido de <https://biblioteca.digital.gob.cl/handle/20.500.13082/586>

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2025). *Cobertura de Agua Potable Rural*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2025, de <https://ssr.mop.gob.cl/historia-parte-2/>

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Estrategia nacional de residuos orgánicos 2020-2040*. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2022). *Informe Consolidado de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)*. Gobierno de Chile. Obtenido de <https://retc.mma.gob.cl/>

Mohamed Farghali, Osman, A. I., Umetsu, K., & Rooney, D. W. (2022). Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review. *Environmnetal Chemistry Letters*, 20, 2853–2927 (2022). doi:<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01468-z>

Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023, Edición especial*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2025

Nevzorova, T., & Kutcherov, V. (Noviembre de 2019). Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review. *Energy Strategy Reviews*, 26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100414>

Organización Mundial de la Salud. (16 de Diciembre de 2025). *Contaminación del aire doméstico*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>

- Pinto, L., & Quipuzco, L. (2015). Aprovechamiento de aguas residuales domésticas para producción de biogás y biol mediante digestores de carga diaria. *Anales Científicos*, 76(1), 87-93. doi:<http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i1.768>
- Ponce, E. (2016). Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad. *Idesia (Arica)*, 34(5), 75-79. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000011>
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. J. (2012). Household Biogas Digesters—A Review. *Energies*, 5, 2911-2942. doi:10.3390/en5082911
- Sarker, S., Lamb, J. J., Hjelme, D. R., & Lien, K. M. (2019). A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants. *Applied Sciences*, 9(9).
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2018). *Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural*. SUBDERE, Unidad de Saneamiento Sanitario.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (s.f.). *Informe de Gestión del Sector Sanitario 2024*. Gobierno de Chile. Recuperado el 2026, de https://www.siss.gob.cl/589/articles-23506_recurso_1.pdf
- Surendra, K., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (Marzo de 2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>
- Tavera-Ruiz, C., Martí-Herrero, J., Mendieta, O., Jaimes-Estévez, J., Gauthier-Maradei, P., f, U. A., Castro, L. (2023). Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113097>

- Tolessa, A. (2024). Current Status and Future Prospects of Small-Scale Household Biodigesters in Sub-Saharan Africa. *Journal of Energy*. doi:<https://doi.org/10.1155/2024/5596028>.
- Van, D. P., Fujiwara, T., Tho, B. L., Toan, P. P., & Minh, G. H. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*, 25(1), 1-17. doi:<https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Walekhwa, P. N., Mugisha, J., & Drake, L. (2009). Biogas energy from family-sized digesters in Uganda: Critical factors and policy implications. *Energy Policy*, 37(7), 2754-2762. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.018>.

Anexos

Anexo A: Disponibilidad de estiércol pecuario y su potencial de producción de biogás

Disponibilidad de estiércol pecuario

Este anexo presenta los factores de generación de estiércol recolectable en un hogar familiar rural por tipo de especie y el procedimiento de cálculo utilizado para estimar la disponibilidad diaria, semanal y anual de estiércol en los escenarios por macrozona definidos en el estudio. Los factores se basan en el *Manual de Biogás* (Varnero Moreno, 2011), donde la disponibilidad corresponde a la cantidad de estiércol que es posible recolectar del total producido.

Según lo estipulado en el *Manual de Biogás*, los factores de disponibilidad de estiércol recolectable por animal se presentan en la Tabla A.1.

Tabla A.1

Factores de disponibilidad de estiércol recolectable por especie

Especie (peso de referencia)	Estiércol disponible (kg/día por animal)
Bovino (500 kg)	10,00
Porcino (50 kg)	2,25
Aves de corral (2 kg)	0,18
Ovino (32 kg)	1,50
Caprino (50 kg)	2,00

Nota. Estos valores representan estiércol recolectable en condiciones típicas.

La disponibilidad total diaria de estiércol se calculó con la siguiente fórmula:

$$E_{\text{día}} = \sum_i (N_i \cdot f_i)$$

Donde $E_{día}$: estiércol disponible total (kg/día), N_i corresponde a la cantidad de animales de la especie i (unidades) y f_i corresponde al factor de disponibilidad de estiércol de la especie i (kg/ animal día).

La disponibilidad semanal y anual se estimó como:

$$E_{semana} = E_{día} \cdot 7 \qquad E_{año} = E_{día} \cdot 365$$

Escenarios pecuarios por macrozona

Para representar viviendas rurales con actividad pecuaria de pequeña escala para autoconsumo familiar, se definieron escenarios representativos con las siguientes cantidades de cabezas de ganado por vivienda familiar:

Tabla A.2

Cantidades de animales de ganado en una vivienda tipo por macrozona

Macrozona	Cantidades de cabezas de ganado por vivienda
Norte	5 caprinos + 5 ovinos + 10 aves
Centro	1 bovino + 2 porcinos + 10 aves
Sur	2 bovinos + 5 ovinos + 10 aves

Cálculo de estiércol disponible por macrozona

Macrozona norte

$$E_{día} = (5 \cdot 2,00) + (5 \cdot 1,50) + (10 \cdot 0,018)$$

$$E_{día} = 10,00 + 7,50 + 1,80 = 19,30 \text{ kg/día}$$

$$E_{semana} = 19,30 \cdot 7 = 135,10 \text{ kg/semana} \qquad E_{año} = 19,30 \cdot 365 = 7044,50 \text{ kg/año}$$

Macrozona centro

$$E_{día} = (1 \cdot 10,00) + (2 \cdot 2,25) + (10 \cdot 0,018)$$

$$E_{día} = 10,00 + 4,50 + 1,80 = 16,30 \text{ kg/día}$$

$$E_{semana} = 16,30 \cdot 7 = 114,10 \text{ kg/semana} \qquad E_{año} = 16,30 \cdot 365 = 5949,50 \text{ kg/año}$$

Macrozona sur

$$E_{\text{día}} = (2 \cdot 10,00) + (5 \cdot 1,25) + (10 \cdot 0,018)$$

$$E_{\text{día}} = 10,00 + 7,50 + 1,80 = 29,30 \text{ kg/día}$$

$$E_{\text{semana}} = 29,30 \cdot 7 = 205,10 \text{ kg/semana} \quad E_{\text{año}} = 29,30 \cdot 365 = 10\,694,50 \text{ kg/año}$$

Tabla A.3

Disponibilidad total de estiércol recolectable por macrozona en una vivienda tipo

Macrozona	Estiércol (kg/día)	Estiércol (kg/semana)	Estiércol (kg/año)
Norte	19,30	135,10	7044,50
Centro	16,30	114,10	5949,50
Sur	29,30	205,10	10 694,50

Potencial de producción de biogás por especie de animal

Para el estiércol recolectable se utilizaron factores de producción de biogás por kilogramo de estiércol húmedo (m³/kg húmedo) diferenciados por especie, reportados en el *Manual de Biogás*:

Tabla A.4

Producción de biogás por tipo de residuo de animal

Estiércol	m ³ /kg húmedo	m ³ /día/año
Bovino	0,04	0,400
Porcino	0,06	0,135
Aves	0,08	0,014
Ovino	0,05	0,075
Caprino	0,05	0,100

Fuente: Varnero Moreno 2011, FAO.

Para calcular el aporte teórico de biogás diario desde el estiércol por especie se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_{\text{est}} = \sum_i (E_i \cdot y_i)$$

Donde V_{est} corresponde al volumen potencial de biogás a partir de estiércol ($\text{m}^3/\text{día}$)

E_i corresponde a la masa diaria de estiércol disponible de la especie i ($\text{kg}/\text{día}$) e y_i al rendimiento específico de biogás (m^3/kg) por tipo de residuo húmedo de animal.

Cálculo por macrozona

Macrozona norte

Disponibilidad de estiércol

- Caprino: $5 \times 2,00 = 10,00 \text{ kg}/\text{día}$
- Ovino: $5 \times 1,50 = 7,50 \text{ kg}/\text{día}$
- Aves: $10 \times 0,18 = 1,80 \text{ kg}/\text{día}$

Producción de biogás por especie:

- Caprino: $10,00 \times 0,05 = 0,500 \text{ m}^3/\text{día}$
- Ovino: $7,50 \times 0,05 = 0,375 \text{ m}^3/\text{día}$
- Aves: $1,80 \times 0,08 = 0,144 \text{ m}^3/\text{día}$

Total macrozona norte:

$$V_{\text{est}} = 0,500 + 0,375 + 0,144 = 1,019 \text{ m}^3/\text{día}$$

Macrozona Centro

Disponibilidad de estiércol

- Bovino: $1 \times 10,00 = 10,00 \text{ kg}/\text{día}$
- Porcino: $2 \times 2,25 = 4,50 \text{ kg}/\text{día}$
- Aves: $10 \times 0,18 = 1,80 \text{ kg}/\text{día}$

Producción de biogás por especie:

- Bovino: $10,00 \times 0,04 = 0,400 \text{ m}^3/\text{día}$
- Porcino: $4,50 \times 0,06 = 0,270 \text{ m}^3/\text{día}$

- Aves: $1,80 \times 0,08 = 0,144 \text{ m}^3/\text{día}$

Total macrozona norte:

$$V_{est} = 0,400 + 0,270 + 0,144 = 0,814 \text{ m}^3/\text{día}$$

Macrozona Sur

Disponibilidad de estiércol

- Bovino: $2 \times 10,00 = 20,00 \text{ kg/día}$
- Ovino: $5 \times 1,50 = 7,50 \text{ kg/día}$
- Aves: $10 \times 0,18 = 1,80 \text{ kg/día}$

Producción de biogás por especie:

- Bovino: $20,00 \times 0,04 = 0,800 \text{ m}^3/\text{día}$
- Ovino: $7,50 \times 0,05 = 0,375 \text{ m}^3/\text{día}$
- Aves: $1,80 \times 0,08 = 0,144 \text{ m}^3/\text{día}$

Total macrozona norte:

$$V_{est} = 0,800 + 0,375 + 0,144 = 1,319 \text{ m}^3/\text{día}$$

Tabla A.5

Producción potencial total de biogás a partir de estiércol animal por macrozona

Macrozona	Biogás (m ³ /día)	Biogás (m ³ /semana)	Biogás (m ³ /año)
Norte	1,019	7,133	371,935
Centro	0,814	5,698	297,110
Sur	1,319	9,233	481,432

Consideraciones y limitaciones

Las cantidades de estiércol estipuladas en el *Manual del Biogás* corresponden a estiércol recolectable, por lo que su aplicación es coherente con un enfoque doméstico donde dependerá de la capacidad de una familia para usarlo en un biodigestor.

La disponibilidad real puede variar según el manejo de cada familia (animales de libre pastoreo o estabulación), acceso a infraestructura de acopio y estacionalidad.

La cantidad estipulada de cabezas de ganado por macrozona en una vivienda tipo representa un escenario típico de cada zona para fines comparativos; no se interpreta como promedio estadístico nacional.

Anexo B: Estimación de caudal de aguas residuales domésticas y su carga orgánica

En este anexo se presenta el cálculo utilizado para estimar el caudal de aguas residuales domésticas y su carga orgánica asociada en una vivienda rural de tres habitantes, expresada como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Estos valores se emplean como insumo para el análisis de potencial de digestión anaeróbica y la producción de biogás.

Supuestos generales

Se consideran los siguientes parámetros:

- Población de una vivienda: 3 personas
- Consumo per cápita de agua: 152,3 L/hab día²
- Coeficiente de retorno de aguas residuales: 0,8
- Generación de DBO per cápita: 40 q/hab día³
- Potencial máximo de metano: 0,6 kg CH₄/kg DBO⁴
- Densidad del metano: 0,716 kg/m³
- Fracción de metano en biogás: 60 %⁵

Estimación del caudal de aguas residuales

Se utilizó la siguiente fórmula para esta estimación:

$$Q_{AR} = P \cdot q \cdot k$$

Donde Q_{AR} corresponde al caudal diario de aguas residuales (L/día), P a la cantidad de habitantes en una vivienda, q corresponde a la dotación de agua potable per cápita (L/hab día), k corresponde al coeficiente de retorno.

² Informe de Gestión del Sector Sanitario, 2024. SISS.

³ Valor basado en literatura técnica de saneamiento doméstico (rango típico de 35-60 g DBO/hab día)

⁴ Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000. IPCC.

$$Q_{AR} = 3 \cdot 152,3 \cdot 0,8$$

$$Q_{AR} = 365,52 \text{ L/día}$$

Estimación de la carga orgánica (DBO)

Para estimar la carga orgánica (DBO) en una vivienda familiar con 3 habitantes, se utilizó la siguiente fórmula:

$$L_{DBO} = P \cdot l_{DBO}$$

Dónde L_{DBO} corresponde a la carga diaria de DBO (kg/día) y l_{DBO} a la generación per cápita de DBO (kg/hab día).

$$L_{DBO} = 3 \cdot 0,04$$

$$L_{DBO} = 0,12 \text{ kg/día}$$

Concentración equivalente de DBO

Para calcular la concentración equivalente aproximada de demanda bioquímica de oxígeno en las aguas residuales de una vivienda familiar se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_{DBO} = \frac{L_{DBO}}{Q_{AR}}$$

$$C_{DBO} = \frac{120000}{365,52}$$

$$C_{DBO} \approx 328 \text{ mg/L}$$

Potencial teórico de producción de metano

Para calcular el potencial de producción de metano en una vivienda familiar de tres habitantes, se utilizó el siguiente cálculo:

$$CH_4 = L_{DBO} \cdot B_0$$

Donde B_0 corresponde al potencial máximo de producción de metano por unidad de DBO degradada (kg CH₄/kg DBO).

⁵ Con base en *Manual de Biogás*, Varnero Monero, 2011.
Escuela de Arquitectura. Universidad Europea de Canarias.

$$CH_4 = 0,12 \cdot 0,6$$

$$CH_4 = 0,072 \text{ kg/día}$$

Conversión a volumen de metano

$$V_{CH_4} = \frac{CH_4}{0,716}$$

Donde V_{CH_4} corresponde al volumen de metano, CH_4 corresponde al potencial teórico de producción de metano en una vivienda familiar de tres habitantes.

$$V_{CH_4} = \frac{0,072}{0,716}$$

$$V_{CH_4} \approx 0,10 \text{ m}^3/\text{día}$$

Estimación del volumen total de biogás

$$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{0,6}$$

$$V_{biogás} = \frac{0,10}{0,6}$$

$$V_{biogás} \approx 0,17 \text{ m}^3/\text{día}$$

Consideraciones y limitaciones

La generación per cápita de DBO puede variar según hábitos de consumo, cantidad de habitantes por vivienda familiar y niveles socioeconómicos.

La estimación del caudal de aguas residuales se realizó con base en la dotación de agua potable reportada por la SISS para 2024 y se adoptó un coeficiente de retorno de 0,8, valor comúnmente utilizado en estudios de diseño sanitario para estimar la fracción del consumo de agua que se convierte en aguas residuales domésticas.

La densidad del metano de $0,716 \text{ kg/m}^3$ corresponde a condiciones normales de temperatura y presión utilizadas habitualmente en literatura técnica. Por lo que la conversión a volumen depende de las condiciones de temperatura y de presión de cada zona.

El potencial de metano estimado corresponde a un valor teórico máximo; la producción real dependerá de temperatura, tiempo de retención hidráulica y eficiencia del biodigestor.

Anexo C: Estimación de carga orgánica y potencial de biogás de RSO domiciliarios

El Anexo C presenta el potencial de biogás de los residuos sólidos orgánicos de una vivienda rural familiar de tres habitantes, se considera un escenario favorable y uno conservador. También se considera que el principal componente de los RSO domiciliarios corresponde a residuos sólidos de alimentos.

Para cantidades de RSO diarios de una vivienda familiar, se adoptan los datos expresados en la Tabla 3:

- RSO domiciliarios: 1,91 kg/día

Carga orgánica

La composición de los RSO domiciliarios presenta variabilidad en la literatura disponible debido a los diferentes hábitos de consumo, la estacionalidad, la disponibilidad de alimentos y el grado de separación en origen, entre otros. Sin embargo, diversos estudios coinciden en que los residuos orgánicos que provienen de alimentos presentan un alto contenido de humedad, superior al 60 % con una fracción de sólidos totales (TS) entre 25-40 % de la masa fresca. La cantidad de sólidos volátiles (VS) puede representar entre un 70 y 85 % de los sólidos totales (Rajendran et al., 2012). Para efectos del presente estudio, se adopta una composición representativa de 70 % de humedad y 30 % de sólidos totales, con una relación de VS/Ts de 0,75, valores que permiten estimar de manera prudente la fracción biodegradable disponible para la digestión anaeróbica, sin sobreestimar el potencial de producción de biogás.

Supuestos adoptados

- $TS = 0,30 \cdot M_{RSO}$
- $VS = 0,75 \cdot TS$

Cálculo

- $TS = 0,30 \cdot 1,91 = 0,573 \text{ kg TS/día}$

- $VS = 0,75 \cdot 0,573 = 0.430 \text{ kg VS/día}$

Rendimiento y potencial de producción de biogás desde RSO

Escenario favorable

Diversos estudios sobre digestión anaeróbica de RSO domiciliarios reportan rendimientos específicos de metano en el rango aproximado de 0,42 a 0,47 m³ CH₄ por kilogramo de sólidos volátiles (VS), bajo condiciones controladas de ensayo de potencial bioquímico de metano (BMP) y con residuos separados en origen (Rajendran et al., 2012; Banks et al., 2018). Considerando estos antecedentes, en el presente estudio se adopta como valor representativo para el escenario favorable un rendimiento de 0,42 m³ CH₄/kg VS, correspondiente al límite inferior del rango reportado, con el fin de evitar sobreestimaciones.

Asimismo, se considera una fracción promedio de metano en el biogás del 60 %, valor comúnmente reportado para sistemas de digestión anaeróbica de residuos orgánicos domésticos (Rajendran et al., 2012).

Escenario conservador

Para el escenario conservador, y con el propósito de reflejar posibles variaciones en composición, presencia de fracciones menos biodegradables, operación no óptima o mezcla de residuos, se adopta un rendimiento reducido de 0,30 m³ CH₄/kg VS, valor coherente con rangos inferiores reportados en literatura para residuos orgánicos mixtos y condiciones menos favorables de operación (Rajendran et al., 2012).

Esta diferenciación entre escenarios permite incorporar incertidumbre metodológica en el modelo y evitar la sobreestimación del potencial energético, manteniendo coherencia con un enfoque de evaluación ambiental-energética de carácter teórico.

Cálculo del potencial de metano y biogás por día

El volumen diario de metano generado a partir de residuos sólidos orgánicos domiciliarios se estimó con el siguiente cálculo:

$$V_{CH_4} = VS \cdot y_{CH_4}$$

Donde V_{CH_4} corresponde al volumen de metano producido ($m^3/día$), VS representa la masa diaria de sólidos volátiles ($kg/día$) e y_{CH_4} el rendimiento específico de metano ($m^3 CH_4/kg VS$).

Luego, el volumen total de biogás se determinó considerando una fracción promedio de metano en el biogás de 60 %.

$$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{0,6}$$

Escenario favorable

Considerando un total de sólidos volátiles de 0,430 $kg/día$ y un rendimiento de 0,42 $m^3 CH_4/kg VS$, se obtiene:

$$V_{CH_4, fav} = 0,430 \cdot 0,42 = 0,181 m^3/día$$

$$V_{biogás, fav} = \frac{0,181}{0,60} = 0,301 m^3/día$$

Escenario conservador

Considerando un total de sólidos volátiles de 0,430 $kg/día$ y un rendimiento de 0,30 $m^3 CH_4/kg VS$, se obtiene:

$$V_{CH_4, fav} = 0,430 \cdot 0,30 = 0,129 m^3/día$$

$$V_{biogás, fav} = \frac{0,129}{0,60} = 0,215 m^3/día$$

Con el objetivo de expresar el rendimiento según la masa fresca de RSO domiciliarios ($M_{RSO} = 1,91 kg/día$), se calculó el rendimiento específico por kilogramo de residuo fresco mediante la siguiente fórmula:

$$y_{RSO} = \frac{V_{biogás}}{M_{RSO}}$$

Cálculo para el escenario favorable:

$$y_{RSO,fav} = \frac{0,301}{1,91} = 0,158 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Valor que se aproxima a 0,15 m³/kg de materia fresca.

Cálculo para el escenario conservador:

$$y_{RSO,cons} = \frac{0,215}{1,91} = 0,113 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Valor equivalente a 0,11 m³/kg de materia fresca aproximadamente.

Con estos resultados, se puede expresar el potencial energético de los RSO domiciliarios comparable con otros sustratos en el presente estudio.

Tabla C.1

Carga orgánica y potencial de biogás de RSO domiciliarios

Indicador	Unidad de medida	Valor
RSO	kg/día	1,91
Sólidos totales	kg/día	0,573
Sólidos volátiles	kg/día	0,430
Volumen de biogás esc. favorable	m ³ /día	0,301
Volumen de biogás esc. conservador	m ³ /día	0,215
Rendimiento esc. favorable	m ³ /kg fresco	0,158
Rendimiento esc. Conservador	m ³ /kg fresco	0,113

Nota. Elaboración propia a partir de supuestos de composición de RSO y rendimientos de metano por kg VS.

Anexo D: Ajuste climático del potencial de biogás por macrozona

El presente Anexo explica el procedimiento utilizado para ajustar el potencial teórico de producción de biogás al incorporar el efecto de las condiciones climáticas por macrozona. Esto se realizó para aproximar el potencial de producción a un escenario más representativo en viviendas rurales, especialmente debido a la sensibilidad del proceso a la temperatura.

Factores climáticos

Diversos estudios sobre digestión anaeróbica indican que el rendimiento de producción de biogás disminuye significativamente cuando el proceso opera en condiciones psicrófilas (10–20 °C), en comparación con el rango mesofílico óptimo (30–35 °C). Se ha reportado que la reducción en la producción puede oscilar entre aproximadamente un 20 % y un 60 %, dependiendo del tipo de sustrato, tiempo de retención hidráulica y condiciones de operación (Rajendran et al., 2012). En función de este rango reportado en la literatura, y considerando las diferencias climáticas entre macrozonas del territorio chileno, en el presente estudio se adoptaron factores simplificados de ajuste climático con el fin de representar de manera prudente la posible disminución del desempeño del biodigestor bajo condiciones reales de operación para incorporar de forma coherente la sensibilidad térmica del sistema dentro de un enfoque de evaluación ambiental-energética.

Estos factores se aplican como un multiplicador sobre el volumen teórico de biogás:

- Si $f_{clima} = 0,95$, se asume que se obtiene 95 % del potencial teórico aprox.
- Si $f_{clima} = 0,60$, se asume que se obtiene 60 % del potencial teórico aprox.

Escenarios considerados y factores aplicados

Se consideraron dos escenarios operacionales

- Escenario favorable: donde se asume una operación adaptada al contexto (como por ejemplo, con una instalación protegida y medidas pasivas simples) que reduce la pérdida de desempeño en climas fríos.

- Escenario conservador: donde se asume una ausencia de medidas de adaptación térmica relevantes y, por lo tanto, hay una mayor pérdida de rendimiento.

Tabla D.1

Factores climáticos adoptados por macrozona

Macrozona	Factor favorable	Factor conservador
Norte	0,95	0,85
Centro	0,90	0,75
Sur	0,80	0,60

Ecuación de ajuste y procedimiento de cálculo

El ajuste climático se aplicó mediante la siguiente fórmula:

$$V_{aj} = V_{teo} \cdot f_{clima}$$

Donde V_{aj} corresponde al volumen de biogás ajustado por clima ($m^3/día$), V_{teo} al volumen de biogás teórico ($m^3/día$) (obtenido desde Anexos A-C) y f_{clima} corresponde al factor climático según macrozona y escenario.

Resultados del ajuste climático

Los valores teóricos utilizados como base corresponden a la integración de sustratos, con un volumen de biogás de $0,17 m^3/día$ y los rendimientos de RSO definidos en el Anexo C.

Tabla D.2

Potencial de biogás ajustado por clima ($m^3/día$ y $m^3/año$)

Macrozona	Escenario	V_{teo} ($m^3/día$)	f_{clima}	V_{aj} ($m^3/día$)	V_{aj} ($m^3/año$)
Norte	Favorable	1,490	0,95	1,416	516,7
Norte	Conservador	1,404	0,85	1,193	435,6
Centro	Favorable	1,285	0,90	1,156	422,1
Centro	Conservador	1,199	0,75	0,899	328,2

Sur	Favorable	1,790	0,80	1,432	522,7
Sur	Conservador	1,704	0,60	1,022	373,2

Nota. Elaboración propia. Los valores teóricos se obtienen de la integración de los sustratos según Anexos A-C. Los factores climáticos representan un ajuste simplificado del desempeño esperado por macrozona y escenario.

Anexo E. Cálculo de Retorno y Beneficio/Costo por macrozona y escenario

Supuestos y parámetros

Para estimar la viabilidad económica de la implementación de biodigestores domésticos se consideraron los siguientes supuestos:

- Horizonte de evaluación: 5 años
- Tasa de descuento real: 5,5 %
- Costo de operación y mantenimiento (O&M): \$20.000 CLP/año
- CAPEX bajo (autoconstrucción/subsidio): \$550.000 CLP
- CAPEX mercado (biodigestor comercial): \$2.180.000 CLP
- Beneficio económico anual: ahorro por sustitución de leña adquirida formalmente (saco 25 kg a \$7.590 CLP)

La tasa de descuento utilizada es consistente con la Tasa Social de Descuento aplicada en evaluaciones económicas en Chile.

Factor de valor presente (FVP)

Para actualizar los flujos anuales de ahorro a valor presente se utilizó el factor de valor presente de una anualidad:

$$FVP(r, n) = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r}$$

Donde r corresponde a la tasa de descuento (0,055) y n corresponde al periodo de 10 años.

$$FVP = \frac{0,414}{0,055} \approx 4,24$$

Este factor permite convertir un flujo anual constante en su valor equivalente actual.

Periodo de recuperación simple

El periodo de recuperación simple (PB) se calculó considerando el flujo neto anual:

$$PB = \frac{CAPEX}{Ahorro\ anual - O\&M}$$

Este indicador expresa el número de años necesarios para recuperar la inversión inicial mediante los ahorros generados por sustitución de leña.

Indicador de Beneficio/Costo (B/C)

El indicador B/C compara el valor presente de los beneficios con el valor presente de los costos:

$$VP(\text{Beneficios}) = \text{Ahorro anual} \cdot FVP$$

$$VP(\text{Costos}) = CAPEX + (O\&M \cdot FVP)$$

$$B/C = \frac{VP(\text{Beneficios})}{VP(\text{Costos})}$$

Resultados por macrozona y escenario

Tabla E.1

Periodo de recuperación y Beneficio/Costo (10 años, 5,5 %)

Macrozona – Escenario	Ahorro (CLP/año)	PB (550.000)	B/C (550.000)	PB (2.180.000)	B/C (2.180.000)
Norte – favorable	239.663	2,5	1,61	9,9	0,45
Norte – conservador	202.046	3,0	1,36	12,0	0,38
Centro – favorable	195.784	3,1	1,32	12,4	0,37
Centro – conservador	152.230	4,2	1,02	16,5	0,29
Sur – favorable	242.446	2,5	1,63	9,8	0,46
Sur – conservador	173.103	3,6	,116	14,2	0,33