

SEDE EDUCATIVA UNIVERSITARIA ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR



Trabajo Final Integrador Curso de Capacitación en ESCM

TITULO: Implementación de un biodigestor para la gestión de residuos y la generación de biogás en el Faro Segunda Barranca, Buenos Aires.

AUTOR: CISHBA Griselda Magali Barreto.

TUTOR: CFCDNA Augusto José María Amaya.

2025

RESUMEN

El presente Trabajo Final Integrador aborda la viabilidad teórica de implementar un sistema de biodigestión anaeróbica en el Faro Segunda Barranca, ubicado en una zona aislada de la costa bonaerense. Debido a su aislamiento geográfico, el faro enfrenta dificultades significativas en la gestión de residuos orgánicos y una alta dependencia del gas envasado como fuente principal de energía. Esta problemática genera impactos ambientales negativos y limita la autonomía operativa del personal residente. Por ello, la investigación se propone evaluar en qué medida un biodigestor puede constituir una solución sostenible, energética y ambientalmente eficiente.

Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque cuantitativo y documental, basado en literatura científica, manuales técnicos y modelos de ingeniería aplicados al cálculo de parámetros operativos como el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), la relación C/N y el volumen del reactor necesario para procesar los residuos generados por tres personas durante períodos de 15 a 20 días. Asimismo, se analizaron experiencias internacionales y nacionales que respaldan la eficacia de la digestión anaeróbica en contextos rurales y aislados.

Los resultados indican que el volumen de residuos orgánicos generado de 20 a 27 kg por ciclo, es adecuado para alimentar un biodigestor tubular de pequeña escala, cuya capacidad recomendada se ubica entre 200 y 300 litros. El potencial energético estimado entre 6 y 13 m³ de biogás por ciclo permitiría cubrir necesidades de cocción y calefacción ligera, reduciendo significativamente la dependencia del gas envasado. Desde el punto de vista ambiental, la captura del metano evita su liberación directa a la atmósfera, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Además, el digestato producido constituye un biofertilizante útil para mejorar los suelos del predio.

Las conclusiones demuestran que la implementación del sistema es técnica y ambientalmente viable, además de brindar beneficios sociales al mejorar la calidad de vida del personal. Si bien la propuesta es teórica, la evidencia respalda que un biodigestor en el faro constituye una solución sostenible, replicable y alineada con los principios de economía circular.

Palabras clave: biodigestión anaeróbica, biogás, residuos orgánicos, faro, sostenibilidad.

INDICE

RESUMEN.....	2
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1 Introducción al problema	9
1.2 Antecedentes generales	10
1.2.1 Problemática global de los residuos orgánicos	10
1.2.2 Experiencias internacionales en biodigestores	11
1.2.3 Experiencias nacionales o regionales	11
1.3 Fundamentación teórica	12
1.3.1 Digestión anaeróbica: conceptos básicos	12
1.3.2 Parámetros clave para el diseño	12
1.4 Marco institucional y geográfico	13
1.4.1 Ubicación y características físicas	13
1.4.2 Condiciones climáticas relevantes	14
1.4.3 Condiciones logísticas y operativas	14
1.4.4 Diagnóstico ambiental	14
1.5 Planteamiento del problema	14

CAPÍTULO 2. PROPUESTA TÉCNICA DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN

2.1 Diagnóstico inicial.....	15
2.1.1 Descripción del faro.....	15
2.1.2 Condiciones climáticas, logísticas y energéticas.....	15
2.1.3 Problemática de gestión de residuos.....	16
2.2 Estimación de generación de residuos.....	16
2.2.1 Identificación de sustratos.....	16
2.2.2 Volumen estimado.....	16
2.2.3 Potencial energético.....	17
2.3 Selección del tipo de biodigestor.....	17
2.4 Dimensionamiento del sistema	18
2.4.1 Relación Carbono/Nitrógeno.....	18
2.4.2 Tiempo de Retención Hidráulica.....	18
2.4.3 Volumen del reactor	18
2.4.4 Sistema de almacenamiento de biogás	20
2.4.5 Descarga del digestato	20
2.5 Operación y mantenimiento	20
2.5.1 Carga y recarga	20

2.5.2 Manejo del biogás	20
2.5.3 Minimización de fugas	20
2.5.4 Seguridad	20
2.6 Análisis de factibilidad	20
2.6.1 Factibilidad técnica	20
2.6.2 Factibilidad económica	21
2.6.3 Factibilidad ambiental	21
2.6.4 Comparación con la situación actual	21
CONCLUSIONES	22
BIBLIOGRAFÍA	26
Anexo A. Ubicación Geográfica del Faro Segunda Barranca	28
Anexo Figura A1. Vista satelital del Faro Segunda Barranca	28
Anexo B. Condiciones climáticas del área	29
Figura B1. Rosa de los vientos anual para Bahía Blanca (1981–1990)	29
Anexo C. Beneficios estimados del biogás	30

INDICE TABLAS

Tabla 1. Parámetros climáticos promedio anuales.....	14
Tabla 2. Estimación diaria de residuos orgánicos generados por el personal.....	17
Tabla 3. Parámetros recomendados para el funcionamiento del sistema.....	19
Tabla 4. Comparación entre la situación actual y la propuesta con biodigestor.....	21

INDICE DE FIGURAS

Figura1. Esquema general del biodigestor tubular, gasómetro y conexiones básicas.	18
--	-----------

LISTADO DE ABREVIATURAS

- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- CH₄: Metano
- CO₂: Dióxido de carbono
- DA: Digestión Anaeróbica
- TRH: Tiempo de Retención Hidráulica
- C/N: Relación Carbono/Nitrógeno
- L/día: Litros por día
- Kg: Kilogramo
- m³: Metro cúbico
- N: Nitrógeno
- P: Fósforo
- K: Potasio
- H₂S: Sulfuro de Hidrógeno
- ONU: Organización de las Naciones Unidas
- OCDE: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
- IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Introducción

La problemática global de la contaminación del suelo, el aire y el agua, esta preocupación se enmarca en los compromisos internacionales para la mitigación del cambio climático, como el Protocolo de Kioto, cuya entrada en vigor en 2005, la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Este desafío se agrava en zonas aisladas o no interconectadas, como es el Faro Segunda Barranca¹, donde persiste la dependencia de fuentes energéticas, como el gas envasado, como la leña, mientras que la gestión inadecuada de los residuos orgánicos genera una contaminación al medio ambiente.

Por lo tanto, uno de los problemas es la gestión de los residuos orgánicos y la dependencia de fuentes de energía no sostenibles, como el gas envasado. La lejanía del faro impide el acceso a servicios básicos de recolección de basura y de gas natural por red, lo que genera la acumulación de desechos y una dependencia constante de un suministro externo costoso y logísticamente complejo.

Acusa de esta dificultad que se presentan nos lleva a buscar soluciones, como la implementación de biodigestores, es decir la digestión anaeróbica, un proceso que se alza como la solución integral para los desafíos energéticos y ambientales de zonas aisladas como el Faro Segunda Barranca. Esta tecnología no es una invención compleja, sino la recreación controlada de un proceso biológico natural que ocurre, por ejemplo, en los sedimentos lacustres o pantanos.

Tal como lo describen Tobon Abello et al. (2020), el proceso involucra a microorganismos especializados que trabajan incansablemente en un ambiente sin oxígeno para descomponer la materia orgánica, esta capacidad transformadora es la principal ventaja del biodigestor, ya que convierte un residuo potencialmente contaminante en una doble fuente de energía ya que podemos conseguir, biogás la mezcla de gases rica en metano, que se puede utilizar directamente como combustible, ofreciendo una fuente de energía limpia para el faro y a su vez biofertilizante un

¹ El Faro Segunda Barranca ubicado en la latitud 40°46'34.65"S y longitud 62°16'27.5"O, en el tramo de la costa entre Punta Rasa y la barranca que le da nombre , una estructura hierro que se eleva a 34 metros de altura, rodeada de un entramado hexagonal de patas que le confieren gran estabilidad, de forma icónica robusta y funcional, capaz de soportar las duras condiciones del entorno costero, fue diseñada en 1911, por el ingeniero César Caccia e inaugura el 10 de junio de 1914, consolidando así un papel vital en la seguridad marítima.

producto sólido o líquido que, en lugar de generar contaminación, actúa como un material orgánico que mejora la calidad del suelo para hacer plantaciones de vegetación. De esta manera, la digestión anaeróbica no solo gestiona los desechos, sino que cierra el ciclo de la materia al recuperar energía y nutrientes, impulsando un desarrollo sostenible en la comunidad.

Si bien la tecnología de biodigestor ofrece una solución probada y desarrollada de manera sostenible, su implementación en el Faro Segunda Barranca debe asegurar su eficiencia y un impacto ambiental positivo, la cual conlleva un desafío, no solo para la producción de gas, sino la de minimizar la captura de metano.

El contexto ambiental global subraya la urgencia de esta eficiencia: investigaciones como las de Scheutz y Fredenslund (2019) advierten que las pérdidas fugitivas de metano durante la digestión anaeróbica y el almacenamiento son un problema ambiental significativo. Dado que el metano es un potente gas de efecto invernadero, su fuga puede reducir los beneficios ambientales de la producción de biogás, constituyendo el mayor impacto negativo en la huella de carbono del proceso. Por lo tanto, la implementación del biodigestor en el faro debe estar alineada con los más altos estándares ambientales, garantizando la máxima captura de CH₄² y cumpliendo con la promesa de una fuente de energía verdaderamente limpia.

Además, para el contexto específico del Faro Segunda Barranca, la experiencia práctica es clave. El trabajo de Peñuela y Fernández Cárdenas (2022), que cuantificó la conversión de desechos orgánicos comunes, como cáscaras de papa y plátano; en un biogás refuerza la pertinencia de un enfoque similar, sugiriendo que la biomasa orgánica local es una fuente de energía considerable para la zona aisladas, lo cual evidencia que la materia prima generada en el lugar puede ser aprovechada, superando el reto logístico y económico de depender de combustibles externos.

Así mismo, proporciona un modelo que podría replicarse en los faros que se encuentran en lugares remotas o aisladas que enfrentan desafíos similares, demostrando que es posible lograr la autosuficiencia energética y una mejor gestión ambiental, en este sentido el Faro Segunda Barranca se presenta como un caso de estudio ideal para evaluar la eficacia de un biodigestor.

² El CH₄ es la fórmula química del metano:

El metano es el hidrocarburo alcano más simple Y Su molécula está compuesta por: Un átomo de Carbono (C) y cuatro átomos de Hidrógeno (H₄).

A nivel global, la aplicación de la digestión anaeróbica está bien establecida en países con tecnología avanzada en este campo. Desde China e India hasta naciones europeas como Alemania, Francia y Suiza, los biodigestores se utilizan para tratar residuos agrícolas, industriales y municipales. Esta diversidad de aplicaciones demuestra la adaptabilidad de la tecnología para diferentes tipos de biomasa y escalas de operación, lo que hace de la implementación de un biodigestor sería una opción viable y probada para las condiciones específicas del faro (Zuluaga Sánchez et al., 2013).

Respecto a la metodología, la investigación adoptara un enfoque cuantitativo documental y un diseño no experimental de viabilidad teórica. Dadas las restricciones del tiempo y no poder concurrir al lugar, el estudio se fundamenta exclusivamente en la revisión bibliográfica especializada y el modelado de ingeniería. La fase de diagnóstico se lleva a cabo mediante la estimación de la generación de residuos y la selección de sustratos basada en estudios análogos. El análisis de factibilidad y el dimensionamiento del sistema se basan en cálculos de ingeniería (balances de masa, TRH,C/N³) y en la evaluación de los beneficios según datos secundarios y estándares de diseño.

Se formula la siguiente interrogante de investigación, que servirá como eje central de este estudio: ¿En qué medida y de qué modo la implementación de biodigestores en el faro Segunda Barranca contribuye al desarrollo sostenible y mejora la calidad de vida del personal?

Para dar respuesta a esta interrogante, el Objetivo General de la presente investigación es proponer un sistema de biodigestión anaeróbica para el Faro Segunda Barranca, mediante la valorización energética y ambiental de los residuos orgánicos.

Para alcanzar el objetivo general, la investigación se centrará en tres objetivos específicos fundamentales mediante el análisis documental y el modelado de ingeniería.

En primer lugar, se buscará Estimar el volumen y tipo de residuos orgánicos generados por un grupo de tres personas durante un periodo de 15 a 20 días en el Faro Segunda Barranca, utilizando literatura análoga para identificar los sustratos con mayor potencial de biodigestión. En segundo lugar, establecer los criterios de diseño y dimensionamiento del biodigestor, calculando la

³ TRH: es el tiempo promedio que el sustrato (la mezcla de residuos y agua) permanece dentro del reactor del biodigestor. C/N: es la proporción de carbono (C) con respecto al nitrógeno (N) presente en el sustrato.

capacidad de reactor y los parámetros operativos óptimos, incluyendo el tipo de biodigestor, la relación C/N y el TRH, para un funcionamiento intermitente de 15 a 20 días.

En tercer lugar, evaluar los beneficios sociales y ambientales a largo plazo del modelo propuesto, comparando su impacto en la gestión de residuos y la autonomía energética frente a las soluciones de combustibles no renovables utilizadas en zonas rurales y aisladas.

El desarrollo de esta investigación se estructura en dos capítulos fundamentales que responden al objetivo de proponer un sistema modular de biodigestión para la zona aislada. En el primer capítulo, se abordará el marco de diseño teórico, donde se establecerá la fundamentación conceptual de la digestión anaeróbica⁴, se revisarán los antecedentes y se detallará la metodología cuantitativa documental utilizada para la estimación de residuos y el cálculo de parámetros. El segundo capítulo se centrará en la propuesta y viabilidad de un modelo, incluyendo el dimensionamiento específico del biodigestor para tres personas y el período intermitente de 15 a 20 días, y para finalizar se evaluará los beneficios sociales y ambientales a largo plazo que justifican la implementación del sistema en el Faro Segunda Barranca.

En síntesis, la implementación de un sistema de biodigestión anaeróbica en el Faro Segunda Barranca no es meramente una alternativa energética, sino una solución integral y sostenible que aborda simultáneamente los desafíos ambientales y logísticos de esta zona aislada. Al transformar la problemática de los residuos orgánicos en una doble fuente de valor biogás/energía y biofertilizante/nutrientes, el proyecto se alinea directamente con los compromisos globales de reducción de CH₄ y promueve un modelo de economía circular. La viabilidad teórica de este sistema, respaldada por la experiencia global y la disponibilidad de biomasa local, posiciona al Faro Segunda Barranca como un caso de estudio crucial para la autosuficiencia energética y la gestión ambiental eficiente en zonas remotas. Por lo tanto, la presente investigación se propone a proponer y dimensionar un modelo de biodigestor que, garantizando la máxima captura de CH₄ y optimizando el aprovechamiento de los recursos, demuestre en qué medida esta tecnología contribuye al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida del personal del faro

⁴ La digestión anaeróbica: Es un proceso biológico natural en el que distintos tipos de microorganismos como la bacteria, descomponen la materia orgánica como son los residuos de alimentos, estiércol, lodos de depuradora, etc.; en un ambiente totalmente sin oxígeno anaeróbico.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. Introducción al problema

La gestión de los residuos orgánicos y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero son desafíos centrales en la agenda ambiental global. Actualmente, el incremento sostenido de los residuos sólidos especialmente los de origen orgánico ha intensificado la contaminación del suelo, del aire y del agua, generando impactos que se manifiestan tanto a nivel local como planetario. Este problema se vincula directamente con el cambio climático, dado que la descomposición no controlada de los residuos orgánicos en vertederos o espacios abiertos libera metano (CH_4), un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono. En consecuencia, la búsqueda de soluciones que permitan tratar estos residuos de forma sostenible se vuelve una necesidad urgente.

La situación se complejiza cuando se analizan zonas aisladas o rurales no interconectadas, donde los servicios de recolección de residuos, abastecimiento energético y tratamiento de desechos son prácticamente inexistentes. En estos espacios remotos, la dependencia de combustibles fósiles como el gas envasado, así como la disposición informal de los residuos orgánicos, profundiza los problemas ambientales y logísticos. El manejo inadecuado de los desechos se convierte en una fuente constante de contaminación, mientras que el suministro energético depende de traslados costosos, intermitentes y ambientalmente impactantes.

En este contexto, el Faro Segunda Barranca el cual se encuentra sometido a condiciones de aislamiento permanente lo que le da una importancia estratégica como un caso de estudio. La ubicación del Faro Segunda Barranca y su entorno geográfico se detallan en el **Anexo A**, lo convierte en un ejemplo representativo de las necesidades energéticas y ambientales de zonas remotas habitadas por pequeños grupos de personas, donde la autosuficiencia y la reducción del impacto ecológico son fundamentales. La precariedad en el manejo de los residuos orgánicos y la dependencia del gas envasado evidencian la urgencia de adoptar soluciones sostenibles y adaptadas a las particularidades del territorio.

La implementación de tecnologías limpias, como los sistemas de biodigestión anaeróbica, surge como una alternativa capaz de transformar residuos en recursos útiles, reduciendo simultáneamente la contaminación y la dependencia energética externa. De este modo, la

búsqueda de soluciones sostenibles en el Faro Segunda Barranca no solo responde a una necesidad local, sino que se enmarca dentro de una tendencia global orientada hacia la mitigación del cambio climático, la economía circular y el aprovechamiento eficiente de los recursos biológicos disponibles.

1.2. Antecedentes generales

1.2.1. Problemática global de la gestión de residuos orgánicos

El aumento de los residuos orgánicos es uno de los retos ambientales más significativos del siglo XXI. A nivel global, estos residuos representan entre el 40 % y el 60 % de la fracción total de los desechos sólidos urbanos, y su manejo ineficiente genera múltiples impactos negativos. La descomposición aeróbica o anaeróbica no controlada provoca lixiviados que contaminan el suelo y las napas, así como olores molestos y proliferación de vectores biológicos.

El impacto más crítico, sin embargo, proviene de la emisión de gases de efecto invernadero. El metano (CH_4), producido durante la degradación anaeróbica del material orgánico, tiene un potencial de calentamiento global 28 a 34 veces mayor que el CO_2 en un período de 100 años. Este gas contribuye aproximadamente al 20 % del calentamiento global antropogénico, y una porción significativa proviene de vertederos y prácticas inadecuadas de disposición final. Este escenario ha impulsado la creación de políticas, tecnologías y estrategias destinadas a reducir la emisión de CH_4 y transformar los residuos orgánicos en recursos energéticos o agrícolas.

En relación con el cambio climático, la gestión deficiente de los residuos orgánicos está directamente vinculada con el incremento de la temperatura global, debido a la liberación de metano sin control. Por ello, los sistemas de digestión anaeróbica cobran relevancia al capturar y utilizar este gas como combustible, minimizando su impacto climático y contribuyendo a las metas globales de reducción de emisiones.

1.2.2. Experiencias internacionales en uso de biodigestores

La digestión anaeróbica es una tecnología ampliamente implementada en distintos países del mundo debido a su efectividad y versatilidad. En China y la India, los biodigestores domésticos y comunitarios se utilizan desde hace décadas para la gestión de residuos agrícolas y domiciliarios, proporcionando biogás para cocinar y calentar agua en millones de hogares rurales. En Europa,

países como Alemania, Suiza y Francia han adoptado esta tecnología a escala industrial, integrándola al tratamiento de residuos municipales, estiércol ganadero y subproductos agroindustriales.

En zonas rurales y aisladas, los biodigestores se han convertido en una solución clave para mejorar la autosuficiencia energética, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover prácticas agrícolas sostenibles. Su flexibilidad para adaptarse a distintos climas, tipos de sustratos y escalas de operación ha permitido su expansión global y validación como herramienta efectiva para el tratamiento de residuos orgánicos.

1.2.3. Experiencias nacionales o regionales similares

En Argentina, si bien la implementación de biodigestores domiciliarios ha sido menos extendida que en otros países, existen proyectos relevantes en zonas rurales y educativas que demuestran su efectividad. En provincias como Misiones, Salta, Córdoba y Buenos Aires se han desarrollado iniciativas destinadas a escuelas rurales, pequeños productores y establecimientos agropecuarios, donde los biodigestores contribuyen a la reducción de residuos y a la provisión de energía para cocción o calefacción. Estas experiencias evidencian que la tecnología es aplicable en contextos argentinos y puede ser adaptada a entornos aislados como en los faros aislados.

1.3. Fundamentación teórica

1.3.1. Digestión anaeróbica: conceptos básicos

La digestión anaeróbica es un proceso biológico mediante el cual microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este proceso ocurre en cuatro etapas principales:

- a) **Hidrólisis:** descomposición de moléculas complejas (proteínas, carbohidratos, lípidos) en compuestos más simples.
- b) **Acidogénesis:** conversión de los compuestos hidrolizados en ácidos grasos volátiles.
- c) **Acetogénesis:** transformación de los ácidos grasos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.
- d) **Metanogénesis:** los microorganismos metanogénicos producen metano y CO₂ a partir del acetato y del hidrógeno.

Producción de biogás: El biogás es una mezcla gaseosa constituida principalmente por: un 50/70 % de metano (CH_4), un 30/50 % de dióxido de carbono (CO_2), trazas de sulfuro de hidrógeno y vapor de agua. Este gas puede emplearse para cocinar, calefaccionar, generar electricidad o reemplazar parcialmente el gas envasado en zonas aisladas.

Digestato o biofertilizante: El residuo sólido o líquido resultante del proceso del digestato, posee un alto valor agronómico, ya que conserva los nutrientes esenciales (N, P, K) y mejora la estructura del suelo. En espacios remotos, este subproducto permite revitalizar suelos empobrecidos o facilitar la implantación de especies vegetales.

1.3.2. Parámetros clave del diseño de biodigestores

El diseño y operación de un biodigestor requieren considerar diversos parámetros técnicos fundamentales:

- **Relación C/N:** indica el equilibrio entre carbono y nitrógeno del sustrato. Valores cercanos a 25/30:1 favorecen la digestión eficiente y reducen inhibiciones biológicas.
- **Volumen del reactor y TRH (Tiempo de Retención Hidráulica):** determinan la cantidad de sustrato que puede procesarse y el tiempo necesario para su degradación.
- **Temperatura:** influye directamente en la actividad microbiana. La digestión puede ser mesofílica (30–40 °C) o termofílica (50–55 °C).
- **pH:** debe mantenerse entre 6.5 y 7.5 para asegurar la metanogénesis.
- **Pérdidas de metano:** su minimización es clave tanto por eficiencia energética como por impacto ambiental, ya que las fugas reducen la calidad del biogás y aumentan la huella de carbono del sistema.

1.4. Marco institucional y geográfico del Faro Segunda Barranca

1.4.1. Ubicación y características físicas

El Faro Segunda Barranca, es un faro habitado de la Armada Argentina que se encuentra situada en las coordenadas 40°46'34.65"S, 62°16'27.5"O entre la denominada Segunda Barranca y Punta Rasa, a aproximadamente 50 km en línea recta de la ciudad de Carmen de Patagones y a 20 km al sur de la bahía San Blas. Se halla en el Partido de Patagones, al sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

El faro fue librado al servicio el 10 de junio de 1914. La torre consta de un tubo central y sus patas de menor diámetro, dispuestas en forma hexagonal, con garita en la parte superior, pintada a franjas horizontales blancas y negras, su altura es de 34 metros.

1.4.2. Condiciones climáticas relevantes

El área presenta temperaturas variables, vientos constantes y alta salinidad ambiental. Estas condiciones influyen en la durabilidad de los materiales, el acceso a suministros y la operatividad de tecnologías externas. No obstante, también generan un entorno adecuado para procesos de digestión mesofílica. Los parámetros climáticos correspondientes a la región del Faro Segunda Barranca se presentan en la tabla 1, donde se detalla la temperatura media anual, el régimen de vientos y la humedad relativa.

Tabla 1.

Parámetros climáticos promedio anuales para la región del Faro Segunda Barranca

Parámetro climático	Valor promedio anual	Observaciones
Temperatura media anual	14–15 °C	Clima templado-frío costero
Humedad relativa	70–85 %	Alta por cercanía al mar
Precipitación anual	450–500 mm	Distribución irregular
Velocidad del viento	20–35 km/h	Predominante del sur y sudeste
Dirección predominante	S–SE	Asociada a régimen marítimo

Nota. Datos elaborados por la autora en base a información del Servicio Meteorológico Nacional (2022).

En esta tabla se destacan los principales parámetros climáticos anuales del área del Faro Segunda Barranca y estos datos muestran un clima templado-frío, con temperaturas medias entre 14 y 15 °C, altos niveles de humedad relativa (70–85 %) y precipitaciones moderadas que rondan los 450–500 mm al año.

1.4.3. Condiciones logísticas y operativas

El faro se encuentra alejado de centros urbanos, lo que dificulta el ingreso regular de insumos y energía. La provisión de gas envasado requiere traslados periódicos, costosos y dependientes del clima. Asimismo, la ausencia de un sistema formal de recolección de residuos obliga a los ocupantes a acumularlos, quemarlos o enterrar parte de ellos.

1.4.4. Diagnóstico ambiental de los residuos actuales

El tipo de residuos generados son principalmente restos de alimentos, cáscaras, residuos vegetales, restos de poda y pequeñas fracciones biodegradables. Lo que lleva a la acumulación constante de los residuos a causa de la presencia permanente de tres personas las cuales custodian el faro. Y al no contar con la recolección se genera problemas como, contaminación del entorno, emisiones derivadas de la descomposición de residuos, dependencia del gas envasado y dificultad logística para retirar o procesar residuos.

1.5. Planteamiento del problema

La gestión ineficiente de los residuos orgánicos y la dependencia del gas envasado representan un desafío ambiental, energético y logístico para el Faro Segunda Barranca. La falta de infraestructura para el tratamiento de los desechos y el alto costo de abastecimiento externo fomentan prácticas inadecuadas que impactan negativamente en el ambiente y en la calidad de vida del personal.

CAPÍTULO 2: PROPUESTA TÉCNICA DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN

2.1. Diagnóstico inicial

2.1.1. Descripción del Faro Segunda Barranca

El Faro Segunda Barranca se encuentra ubicado sobre la costa bonaerense, en un sector caracterizado por su difícil acceso, baja densidad poblacional y ausencia de infraestructura de servicios básicos. Su función principal es brindar apoyo a la navegación marítima, lo que requiere la presencia permanente de personal encargado de garantizar el funcionamiento óptimo del sistema lumínico y las instalaciones asociadas.

El emplazamiento del faro incluye construcciones básicas destinadas a la habitabilidad, como dormitorios, cocina, áreas de almacenamiento y espacios de trabajo. La dinámica de funcionamiento implica períodos prolongados de aislamiento para las tres personas que residen dentro del predio, lo cual condiciona tanto la gestión de residuos como el acceso a suministros energéticos.

2.1.2. Condiciones climáticas, logísticas y energéticas

El clima de la región presenta temperaturas moderadas, con variaciones estacionales que oscilan en rangos aptos para la digestión anaeróbica mesofílica. Los vientos costeros son persistentes y la humedad salina puede afectar equipamientos metálicos, por lo que cualquier instalación propuesta debe considerar materiales resistentes a la corrosión.

Desde el punto de vista logístico, el faro es accesible únicamente mediante vehículos todoterreno o embarcaciones, dependiendo de las condiciones marítimas. Esta dificultad incrementa los tiempos y costos de abastecimiento. En lo que respecta al suministro energético, el faro depende casi exclusivamente del gas envasado para actividades básicas como cocinar y calefaccionar, generando una vulnerabilidad energética y económica significativa.

2.1.3. Problemática actual de gestión de residuos

El principal residuo generado en el faro es de tipo orgánico: restos de comida, cáscaras, vegetales, residuos de cocina y pequeñas fracciones biodegradables asociadas al uso cotidiano. Debido a la ausencia de un sistema de recolección formal, los residuos se acumulan o se eliminan mediante

prácticas como el enterramiento superficial o la quema. Estas actividades representan riesgos ambientales, incluyendo:

- Emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente metano).
- Posible atracción de fauna.
- Contaminación del suelo y cercanía al entorno marino.
- Incremento de malos olores y proliferación de microorganismos.

Estos factores hacen evidente la necesidad de un sistema que permita transformar los residuos orgánicos en un recurso útil, reduciendo su impacto ambiental y aliviando la dependencia energética del faro.

2.2. Estimación de generación de residuos

2.2.1. Identificación de sustratos orgánicos disponibles

Los residuos orgánicos generados por las tres personas residentes corresponden principalmente a: Restos vegetales (cáscaras de papa, zanahoria, frutas), residuos de alimentos cocidos, restos farináceos (pan, masa), pequeñas cantidades de restos animales (huesos menores, grasas vegetales), residuos derivados de limpieza de vegetación o mantenimiento (cuando se produzcan podas menores). Este perfil de sustratos presenta buena biodegradabilidad y un potencial energético considerable, especialmente en residuos ricos en carbohidratos y azúcares.

2.2.2. Volumen estimado para tres personas (15–20 días)

La literatura indica que una persona genera entre **0,3 y 0,5 kg/día** de residuos orgánicos. Considerando un valor intermedio de 0,45 kg/día:

- Tres personas → 1,35 kg/día
- Para 15 días → 20,25 kg. Para 20 días → 27 kg.

En términos volumétricos, tomando densidades promedio, esto equivale a **22–30 litros** de residuo orgánico por período, lo cual representa una carga adecuada para biodigestores de escala pequeña o doméstica. La estimación diaria de residuos orgánicos generados por el personal se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Estimación diaria de residuos orgánicos generados por el personal residente.

Tipo de residuo	Kg/persona/día	Total para 3 personas (kg/día)
<i>Restos vegetales crudos</i>	0.25	0.75
<i>Restos cocidos</i>	0.15	0.45
<i>Frutas y cáscaras</i>	0.10	0.30
<i>Otros biodegradables</i>	0.05	0.15
Total diario	0.55	1.65

Nota. *Elaboración propia basada en valores promedio de generación orgánica domiciliaria (Tobón Abello et al., 2020; Peñuela & Fernández Cárdenas, 2022).*

La tabla representa una estimación diaria de los residuos orgánicos generados por el personal del Faro Segunda Barranca. En resume los principales tipos de desechos biodegradables producidos como restos vegetales crudos, cocidos, frutas, cáscaras y otros residuos orgánicos y calcula su generación tanto por persona como para un grupo de tres residentes. La información permite dimensionar la producción diaria total y sirve como base para evaluar prácticas de gestión ambiental en instalaciones aisladas.

2.2.3. Potencial energético de los residuos

Los residuos orgánicos mixtos generan en promedio 0,3 a 0,5 m³ de biogás por kg de sustrato fresco. Utilizando un valor conservador:

- 20 kg → 6 a 10 m³ de biogás
- 27 kg → 8 a 13 m³ de biogás

La energía producida permitiría cubrir necesidades de cocina y parte de calefacción, reduciendo significativamente el uso de gas envasado.

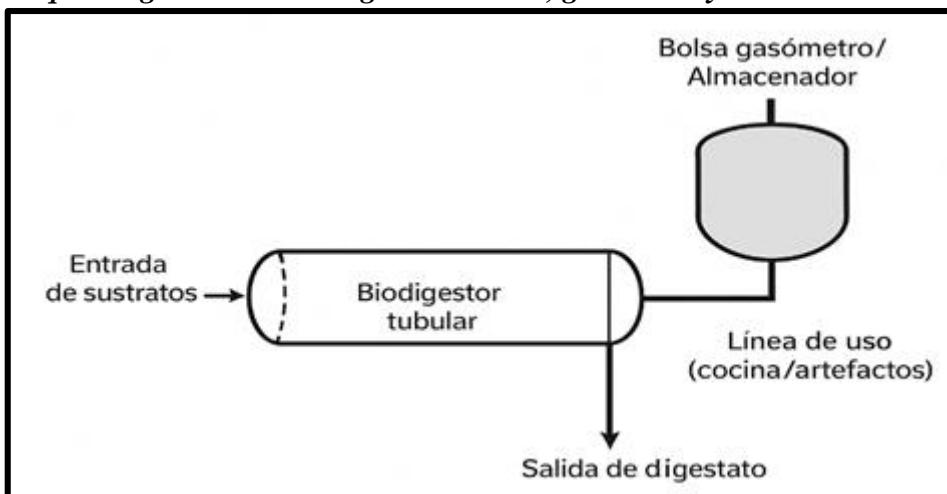
2.3. Selección del tipo de biodigestor

Considerando el contexto del faro, se identifica como opción óptima para un biodigestor tipo tubular de polietileno (estilo “bolsa” o digestor plástico) debido a que este tiene bajo costo, fácil transporte e instalación, mantenimiento sencillo, operación por carga semicontinua, materiales resistentes y disponibles en el mercado. El digestor tipo batch también podría ser adecuado, pero

su operación por ciclos completos y limpieza más compleja lo vuelve menos conveniente. El modelo seleccionado corresponde a un biodigestor tubular de flujo continuo, cuya disposición general se presenta en la siguiente figura.

Figura 1.

Esquema general del biodigestor tubular, gasómetro y conexiones básicas.



Nota. *Elaboración propia.*

El esquema muestra de manera sencilla la estructura general de un biodigestor tubular, incluyendo el reactor principal, el gasómetro donde se acumula el biogás producido y las conexiones básicas para la entrada de residuos y la salida de gas y efluentes. Representa el funcionamiento esencial del sistema, ilustrando cómo los desechos orgánicos se transforman en biogás y en subproductos aprovechables.

2.4. Dimensionamiento del sistema

2.4.1. Cálculo de relación C/N: El residuo orgánico domiciliario suele presentar una relación C/N entre 15:1 y 20:1. Para alcanzar una relación óptima de **25–30:1**, se recomienda mezclarlo con; restos vegetales fibrosos, paja o pequeñas cantidades de material lignocelulósico. La cual mejora la producción de metano y evita la acidificación del sistema.

2.4.2. Cálculo del TRH: El Tiempo de Retención Hidráulica para residuos alimentarios en zonas mesofílicas oscila entre 20 y 30 días. Se adopta un TRH de 25 días, adecuado para la región y el volumen de producción.

2.4.3. Cálculo del volumen del reactor:

Volumen de entrada por día (residuos + agua para dilución 1:1):

- 1,35 kg/día + ~1,35 L/día de agua → 2,7 L/día (promedio).
- Volumen mínimo del reactor:
- TRH (25 días) × 2,7 L/día = 67,5 litros

Teniendo en cuenta esos resultados, se recomienda un biodigestor de entre 200 y 300

litros. De esta forma garantizamos, espacio libre para acumulación de gas, variabilidad de residuos y estabilidad en la carga. Los parámetros utilizados para calcular el TRH, la relación C/N y el volumen necesario del reactor se resumen en la siguiente tabla, donde se presentan los valores técnicos de operación del biodigesto.

Tabla 3.

Parámetros recomendados para el funcionamiento del sistema.

Parámetro técnico	Valor recomendado	Importancia operativa
Relación C/N	25:1 – 30:1	Estabilidad microbiana
Temperatura de operación	20–35 °C (mesofílica)	Mantiene actividad biológica
pH del reactor	6.5 – 7.5	Evita inhibición bacteriana
TRH (tiempo de retención)	25 días	Define volumen del biodigestor
Sólidos totales	7–10 %	Permite fluidez del sustrato
Dilución sustrato/agua	1:1	Evita sedimentación
Producción esperada de biogás	0.3–0.5 m ³ /kg de residuo	Estimación típica en biodigestores pequeños
Metano estimado	55–65 %	Indica poder energético

Nota. Datos elaborados por la autora basados en Deublein & Steinhauser (2011), Zuluaga-Sánchez et al. (2013) y Tobón Abello et al. (2020).

En esta tabla explico los parámetros técnicos esenciales para el correcto funcionamiento de un biodigestor, indicando los valores recomendados y la importancia operativa de cada uno. Incluye variables como la relación C/N, temperatura, pH, tiempo de retención, sólidos totales y producción estimada de biogás, todos necesarios para asegurar la estabilidad del proceso y el rendimiento energético del sistema.

2.4.4. Diseño del sistema de almacenamiento de biogás

El gas producido se almacenará en bolsa gasómetro superior integrada, o bien en bolsas independiente de PVC y se instalará una válvula antirretorno y mangueras reforzadas. Esta debe tener una capacidad sugerida de **1 a 1,5 m³** de almacenamiento útil.

2.4.5. Diseño del sistema de descarga del digestato

El digestato se extrae por salida inferior a baja presión, pudiendo ser utilizada para el mejoramiento del suelo en el predio, creación de pequeñas áreas verdes o vegetación, recuperación de suelos erosionados por viento salino.

2.5. Operación y mantenimiento

2.5.1. Carga y recarga del biodigestor

- La carga debe realizarse diariamente o en intervalos regulares.
- Dilución recomendada: 1:1 en agua.
- Evitar ingreso de grasas excesivas, huesos y materiales no biodegradables.

2.5.2. Manejo del biogás

- El biogás puede ser conducido hacia una hornalla adaptada.
- El uso debe ser regulado mediante una válvula de paso.
- Se recomienda un mechero de baja presión.

2.5.3. Recomendaciones para minimizar fugas de metano

- Revisar uniones de mangueras cada 15 días.
- Verificar presión de la bolsa gasómetro.
- Utilizar abrazaderas y válvulas de buena calidad.
- Colocar el sistema bajo sombra para evitar sobrepresión por calor.

2.5.4. Seguridad y protocolos

- Mantener el digestor lejos del fuego directo.
- Revisar periódicamente posibles acumulaciones de H₂S.
- Evitar perforaciones accidentales y proteger con cerca simple.

2.6. Análisis de factibilidad

2.6.1. Factibilidad técnica

La tecnología de biodigestión anaeróbica está ampliamente probada a nivel internacional. Las condiciones climáticas del faro permiten operación mesofílica sin necesidad de calefacción extra. El volumen de residuos generado es adecuado para biodigestores pequeños y el personal puede operar el sistema sin capacitación compleja. Lo cual aporta beneficios energéticos derivados de la

producción de biogás, expresados en equivalencias de kilovatios y horas de uso, se presentan en la tabla E1 del Anexo A, evidenciando el aporte potencial del sistema a la autonomía operativa del faro.

2.6.2. Factibilidad económica

Que se puede destacar: que un biodigestor tubular es económico comparado con tratamientos alternativos, reduce significativamente la compra de gas envasado y minimiza los costos logísticos asociados al transporte de residuos.

2.6.3. Factibilidad ambiental

Este Sistema reduce emisiones de CH₄ no capturado, evita contaminación de suelo y fauna, aprovechamiento de los nutrientes del digestato y disminuye la huella ecológica del faro.

2.6.4. Comparación con la situación actual.

La comparación entre la situación actual del faro y la propuesta de implementación del biodigestor se presenta en la siguiente tabla, donde se analizan los aspectos operativos, ambientales y económicos más relevantes.

Tabla 3.

Comparación entre la situación actual del faro y la propuesta con biodigestor.

Aspecto evaluado	Situación actual	Propuesta con biodigestor	Mejora
Gestión de residuos	Acumulación / quema	Digestión anaeróbica	Reduce Impacto
Emisiones	Metano libre	Captura y uso de biogás	Menos GEI
Dependencia energética	Alta (GLP)	Autonomía parcial	Ahorro
Costos logísticos	Elevados	Reducción	Menor transporte
Riesgos	Explosión por garrafas	Baja presión del biogás	Más seguridad
Sostenibilidad	No sostenible	Energía renovable	Mejora total
Digestato	No se obtiene	Sí	Fertilizante útil
Impacto ambiental	Alto	Bajo	Reducción significativa

Nota. Tabla elaborada por la autora a partir de criterios técnicos y ambientales expuestos en el Capítulo 2, con apoyo de Deublein & Steinhauer (2011) y Zuluaga-Sánchez et al. (2013).

CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como propósito analizar la viabilidad teórica de implementar un sistema de biodigestión anaeróbica en el Faro Segunda Barranca, mediante la valorización energética y ambiental de los residuos orgánicos generados por las tres personas que habitan el emplazamiento. A lo largo del desarrollo del trabajo, se llevó a cabo un análisis integral que contempló aspectos teóricos, ambientales, técnicos y operativos, con el fin de determinar en qué medida esta tecnología podría contribuir al desarrollo sostenible del faro y mejorar la calidad de vida del personal asignado.

En primer lugar, se comprobó que el problema central identificado la gestión inadecuada de los residuos orgánicos y la alta dependencia del gas envasado constituye un desafío real y significativo para el Faro Segunda Barranca. El análisis inicial dejó en evidencia que el actual manejo de los residuos se basa en prácticas de acumulación, quema o enterramiento, métodos que generan impactos negativos en el entorno, como emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y riesgos sanitarios. Asimismo, la provisión de energía depende exclusivamente del suministro de gas envasado, cuyo transporte es costoso, complejo y vulnerable a las condiciones climáticas. Esta combinación convierte al faro en un espacio altamente dependiente de insumos externos y generador de impactos ambientales que pueden reducirse notablemente mediante tecnologías apropiadas.

El estudio teórico realizado demuestra que la digestión anaeróbica es una tecnología robusta, ampliamente validada en diversos contextos rurales, urbanos y aislados en el mundo, lo que refuerza su pertinencia para zonas remotas como la que ocupa el faro. La revisión de antecedentes internacionales permitió constatar que países como China, India, Alemania y Suiza la han implementado de forma exitosa tanto a pequeña escala como en sistemas industriales, aprovechándola para la gestión de residuos, la producción de energía renovable y la generación de fertilizantes orgánicos. En Argentina, si bien su adopción es menos extendida, existen experiencias rurales que han demostrado su eficacia y adaptabilidad, lo que confirma que la tecnología no solo es aplicable, sino que también puede ajustarse a las condiciones locales del país.

Desde el análisis técnico, la estimación de generación de residuos permitió obtener valores coherentes y suficientes para el funcionamiento de un biodigestor de pequeña escala. La cantidad producida durante un período de 15 a 20 días, entre 20 y 27 kilogramos de residuos orgánicos resulta adecuada para sistemas tubulares o domésticos, especialmente si se considera la dilución con agua y la capacidad de procesamiento requerida. El potencial energético de estos residuos, estimado entre 6 y 13 m³ de biogás por ciclo, demuestra que el sistema puede contribuir significativamente a cubrir las necesidades básicas de energía, particularmente para cocinar, calentando agua y, eventualmente, aportando calor complementario en ciertas épocas del año.

En cuanto al diseño del biodigestor, se seleccionó el modelo tubular de polietileno debido a su bajo costo, facilidad de transporte y resistencia frente al ambiente marino. Este tipo de biodigestor, ampliamente utilizado en países en desarrollo, presenta ventajas notables para contextos como el del faro: no requiere mano de obra especializada, demanda un mantenimiento mínimo y permite operaciones por carga semicontinua, adecuándose a la rutina del personal. El dimensionamiento del sistema, basado en un Tiempo de Retención Hidráulica de 25 días, arrojó una necesidad aproximada de un reactor de entre 200 y 300 litros, lo que garantiza un funcionamiento estable y la posibilidad de manejar variaciones en la cantidad de residuos generados.

Otro aspecto fundamental fue el análisis de los parámetros operativos, como la relación C/N, la temperatura y el pH. Se determinó que los residuos orgánicos producidos en el faro poseen una relación C/N subóptima que puede ajustarse fácilmente mediante la incorporación de pequeñas cantidades de material vegetal seco, como restos de poda o paja, asegurando así la eficiencia del proceso. Asimismo, las condiciones climáticas de la zona, caracterizadas por temperaturas moderadas, resultan favorables para un proceso mesofílico sin necesidad de calefacción adicional. Esto supone una ventaja significativa al reducir la complejidad técnica y los costos operativos del sistema.

Desde el punto de vista ambiental, se comprobó que la implementación de un biodigestor tendría un impacto altamente positivo en el faro. La captura de metano gas con un potencial de calentamiento global notablemente superior al del dióxido de carbono permitiría reducir las emisiones fugitivas que actualmente se liberan al ambiente durante la descomposición de los

residuos y durante la quema informal que se utiliza como método de eliminación. El aprovechamiento del digestato, un subproducto orgánico rico en nutrientes, abre la posibilidad de mejorar los suelos del predio, plantar vegetación adaptada y recuperar áreas erosionadas por el viento salino. Esto transforma la problemática de los residuos en una oportunidad para favorecer la restauración ecológica del entorno inmediato del faro.

El análisis comparativo con la situación actual mostró que el biodigestor no solo constituye una alternativa viable, sino que representa una mejora sustancial en términos de eficiencia energética, sustentabilidad ambiental y reducción de costos logísticos. El sistema propuesto permite reemplazar parcialmente el gas envasado, disminuye la frecuencia de abastecimiento externo, reduce la acumulación de residuos y aporta una solución sostenible y continua que opera en armonía con el ecosistema costero. Asimismo, su implementación fortalecería la autonomía del faro, un aspecto estratégico para zonas aisladas donde las condiciones climáticas o marítimas pueden interrumpir el suministro externo por períodos prolongados.

En relación con los objetivos planteados, se puede afirmar que todos los objetivos específicos se cumplieron satisfactoriamente, y, en consecuencia, también se cumplió el objetivo general del trabajo. El volumen y tipo de residuos orgánicos generados en el faro fueron estimados con base en literatura análoga confiable; se establecieron criterios de diseño y dimensionamiento técnico adaptados a las condiciones reales del emplazamiento; y se evaluaron los beneficios sociales, energéticos y ambientales del sistema propuesto frente a las prácticas actuales. Cada uno de estos componentes permitió construir una propuesta sólida y fundamentada.

Respecto a la pregunta de investigación en qué medida la implementación de un biodigestor contribuiría al desarrollo sostenible y a la mejora de la calidad de vida del personal, los resultados obtenidos permiten concluir que la contribución sería alta y significativa. No solo mejoraría el manejo de los residuos orgánicos, sino que también reduciría la dependencia del gas envasado, minimizaría los impactos ambientales negativos y promovería un modelo de economía circular dentro del faro. Además, el simple hecho de contar con una tecnología que reduce la acumulación de desechos y optimiza el uso de recursos locales mejora directamente las condiciones de habitabilidad del personal.

En cuanto a si la propuesta garantiza la eficiencia y viabilidad del sistema, es importante aclarar que la investigación es de carácter teórico y no experimental, por lo que la garantía absoluta no puede afirmarse sin una implementación práctica. Sin embargo, bajo las condiciones analizadas y dentro del marco teórico de la ingeniería de biodigestores, el modelo propuesto es plenamente viable y técnicamente garantizable, siempre y cuando se cumplan los parámetros operativos recomendados y se realice un mantenimiento básico periódico. Es decir, la tecnología garantiza su funcionamiento si se respetan las condiciones de diseño, operación y cuidado establecidas.

En síntesis, el biodigestor no solo es técnicamente viable, sino también pertinente, sostenible y adaptable a las necesidades del Faro Segunda Barranca. Su implementación contribuiría de manera directa al cumplimiento de principios de sostenibilidad, reduciría la huella de carbono del faro, mejoraría la gestión interna de los residuos y fortalecería la autonomía energética del personal destacado. Todo ello convierte esta propuesta en una herramienta estratégica para promover un modo de vida más sustentable en entornos aislados y, a su vez, en un modelo replicable para otros faros, bases o puestos rurales del territorio nacional.

De esta manera, puede afirmarse que la presente investigación no solo cumple con su objetivo general, sino que además aporta una propuesta concreta, técnicamente fundamentada y alineada con los compromisos globales de mitigación del cambio climático y promoción de energías renovables. El biodigestor se presenta, así, como una solución integral que transforma un problema en un recurso, fortaleciendo el desarrollo sostenible del Faro Segunda Barranca y abriendo nuevas posibilidades para la gestión ambiental en zonas remotas de Argentina.

BILIOGRAFIA

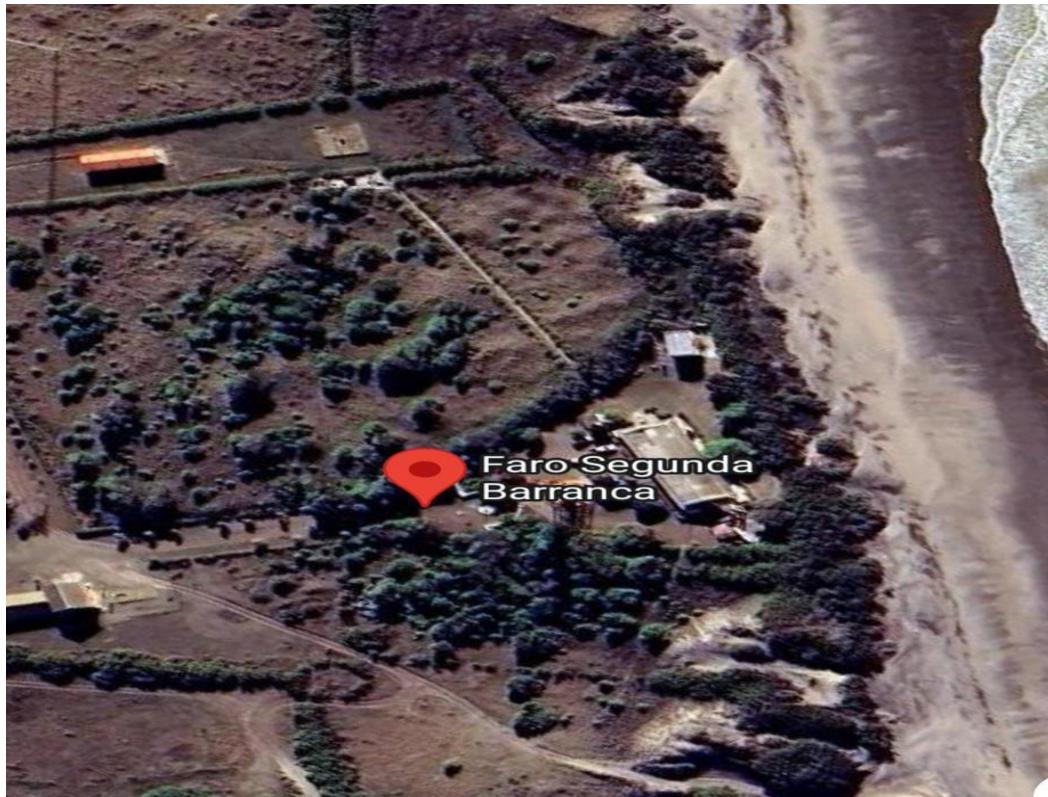
- **Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011).** *Biogas from waste and renewable resources.* Wiley-VCH.
- **Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013).** *Tackling climate change through livestock.* FAO. <https://www.fao.org/>
- **Instituto Geográfico Nacional. (2021).** *Cartografía oficial de la costa atlántica argentina.* IGN. <https://www.ign.gob.ar/>
- **Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014).** *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC.* Cambridge University Press.
- **Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021).** *Sixth Assessment Report. Summary for policymakers.* IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/>
- **Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011).** The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Argentina. (2020).** *Guía para la gestión integral de residuos sólidos urbanos.* <https://www.argentina.gob.ar/ambiente>
- **Organización de las Naciones Unidas. (2005).** *Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático.* ONU.
- **Peñuela, C., & Fernández Cárdenas, M. (2022).** Conversión de desechos orgánicos comunes en biogás: evaluación del rendimiento y composición del gas. *Revista Colombiana de Energías Renovables*, 9(2), 45–58.
- **Scheutz, C., & Fredenslund, A. (2019).** Evaluation of methane emissions from anaerobic digesters: A review of measurement techniques and influencing factors. *Waste Management*, 87, 817–830. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.032>
- **Servicio Meteorológico Nacional. (2022).** *Climatología de la costa bonaerense: estadísticas históricas.* SMN Argentina. <https://www.smn.gob.ar/>
- **Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002).** *Handbook of solid waste management* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- **Tobón Abello, J., Gómez, K., & Ospina, D. (2020).** Digestión anaerobia aplicada al tratamiento de residuos orgánicos: fundamentos microbiológicos y parámetros operacionales. *Ingeniería y Ciencia*, 16(32), 9–38. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.16.32.1>
- **Zuluaga-Sánchez, A., Londoño, C., & Ocampo, J. (2013).** Implementación de biodigestores en comunidades rurales: avances, retos y perspectivas. *Revista Ingeniería y Región*, 25(1), 55–67.

ANEXOS

ANEXO A: Ubicación Geográfica del Faro Segunda Barranca

Figura A 1.

Vista satelital del Faro Segunda Barranca y su entorno costero.

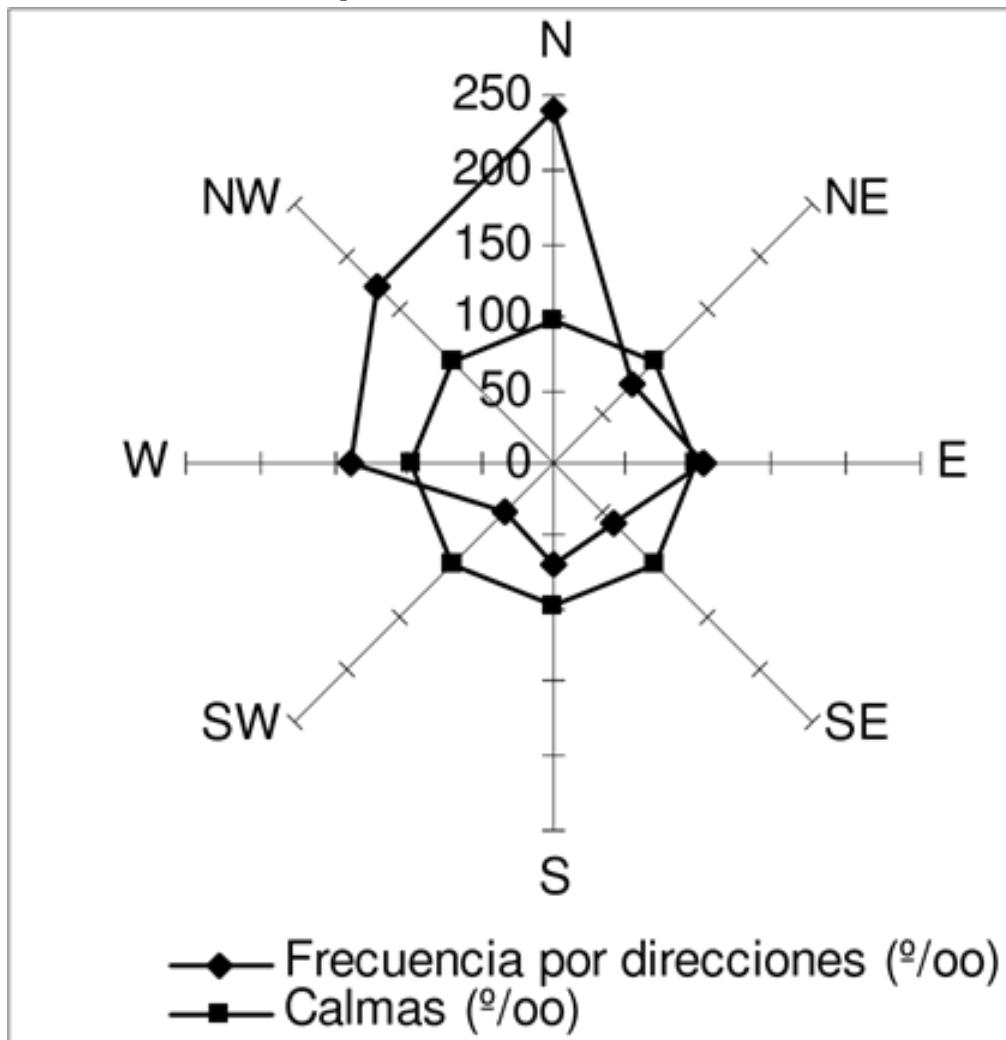


Nota. Captura satelital, fuente propia GPS personal. La imagen permite identificar el aislamiento geográfico y la distancia con centros urbanos.

ANEXO B: CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL ÁREA

Figura B1.

Rosa de los vientos anual para Bahía Blanca (1981–1990).



Nota. Adaptado de *Climatología del Estuario de Bahía Blanca* (Capelli de Steffens & Campo de Ferreras, 2004, p.9).

ANEXO C: BENEFICIOS ESTIMADOS DEL BIOGÁS.

Tabla A.

Equivalencias energéticas y beneficios prácticos del biogás producido.

Volumen de biogás generado	Equivalente energético	Beneficio para el faro	Uso posible
1 m ³	~6 kWh	Reduce consumo de GLP	Cocina 3–4 horas
6–10 m ³ (15 días)	36–60 kWh	Autonomía parcial	Cocina + agua caliente
13 m ³ (20 días)	~78 kWh	Sustitución extendida de gas envasado	Uso prolongado
Digestato	—	Mejora del suelo	Fertilización

Nota. Valores estimados por la autora a partir de rendimientos típicos de biodigestores domésticos pequeños (Deublein & Steinhauser, 2011; Zuluaga-Sánchez et al., 2013).