



**DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**PRÁCTICA FINAL DE CARRERA
SISTEMA.BIO**



**ALUMNA: LARA DE VINCENZO
INSTRUCTORA: CLAUDIA GREENE
TUTORA: CLAUDIA PONG**

ABRIL - 2026

Prólogo

En el marco del Trabajo Final de Carrera, la Práctica Profesional Supervisada (PPS) se realizó en Sistema.bio, una empresa social dedicada al diseño e implementación de biodigestores modulares para productores agrícolas rurales. La experiencia tuvo lugar entre los meses de enero y marzo de 2026.

A nivel personal, esta experiencia me ha permitido comprender el rol del economista desde una perspectiva aplicada y humana. Ha sido una primera aproximación fundamental al mercado laboral, permitiéndome ordenar y dar sentido práctico a los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. Asimismo, el desarrollo de la PPS me permitió crecer profesionalmente al entender las dinámicas de las relaciones laborales y el desenvolvimiento en entornos virtuales. Destaco la alta profesionalidad, amabilidad e integración del equipo de Sistema.bio, cuya apertura y acompañamiento continuo fueron claves para el éxito de esta etapa formativa.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi instructora en la empresa, Claudia Greene, y a mi tutora por parte de la Universidad, Claudia Pong, por su guía, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco a todo el equipo de Sistema.bio por brindarme la posibilidad de realizar esta Práctica Final de Carrera en un entorno tan profesional y enriquecedor.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y amigos, quienes fueron un pilar fundamental y una ayuda constante para transitar con éxito mi formación universitaria. Gracias por el apoyo incondicional en cada etapa de este camino.

Índice

Prólogo.....	II
Agradecimientos.....	II
Índice.....	III
1. Introducción.....	1
2. Posicionamiento de la empresa.....	2
3. Marco teórico.....	4
4. Abordaje metodológico.....	6
5. Análisis del impacto económico.....	8
5.1. Sistemas porcinos y desempeño técnico por clima.....	9
5.2. Requerimientos complementarios y accesorios para el uso del biogás.....	13
5.3. Biofertilizantes (biol) y sustitución parcial de fertilizantes sintéticos.....	14
5.4. Cuantificación monetaria.....	16
5.5. Costo de oportunidad y la revalorización del tiempo.....	20
5.6. Reducción de la vulnerabilidad ante la volatilidad de mercados externos.....	21
5.7. Pay-back.....	22
6. Impacto ambiental.....	28
7. Reflexiones finales.....	33
8. Referencias.....	35

1. Introducción

En el contexto actual de crecientes desafíos económicos, energéticos y ambientales, el sector agropecuario enfrenta la necesidad de adoptar modelos productivos más eficientes y sostenibles. Los pequeños y medianos productores rurales, en particular, se encuentran expuestos a elevados costos de la energía, dependencia de insumos externos y prácticas productivas que generan impactos ambientales negativos, lo que limita su rentabilidad y su resiliencia frente a shocks económicos y climáticos.

Los biodigestores se presentan como una alternativa tecnológica que permite transformar residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes, generando beneficios económicos directos para los productores y sus familias, al mismo tiempo que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la preservación del ecosistema.

El presente informe desarrolla un análisis integral sobre el impacto económico y ambiental generado por la adopción de biodigestores en productores agropecuarios rurales de México, con especial énfasis en comprender de qué manera esta tecnología contribuye a mejorar la situación económica de los hogares rurales. El análisis integra la experiencia adquirida durante la pasantía con herramientas propias de la Economía, abordando la problemática desde una perspectiva aplicada y orientada al desarrollo sostenible.

Con el fin de responder a lo anterior, el trabajo se estructura en cinco secciones principales. En primer lugar, se realiza una caracterización de la empresa Sistema.bio y su modelo de intervención en el sector rural. Seguidamente, se establece el marco teórico y metodológico, donde se definen los enfoques de la economía del desarrollo y ambiental que sustentan el análisis. En el quinto y sexto capítulo, se desarrollan los análisis de impacto económico y ambiental, respectivamente, cuantificando los ahorros por sustitución de insumos y la mitigación de externalidades. Finalmente, el trabajo concluye con una serie de reflexiones finales y recomendaciones, donde se sintetizan los hallazgos de la

práctica y se proyecta la aplicabilidad de esta tecnología en el contexto productivo de Argentina.

2. Posicionamiento de la empresa

Sistema.bio es una empresa social fundada en 2010, con sede central en la Ciudad de México (CDMX). Opera con equipos propios y presencia local como India, Kenia, Guatemala y Colombia, y trabaja a través de distribuidores y alianzas estratégicas en otros mercados de América Latina, donde continúa su proceso de expansión regional.

La empresa tiene como misión impulsar la transición hacia sistemas productivos más limpios, eficientes y resilientes, a través del aprovechamiento de residuos orgánicos para la generación de biogás y biofertilizantes. Para ello, fabrica e implementa biodigestores modulares adaptados a distintas escalas productivas, con el objetivo de reducir la dependencia de combustibles fósiles y de insumos químicos, mejorar la gestión de residuos agropecuarios y contribuir a la mitigación del cambio climático.

El producto central de Sistema.bio es su biodigestor tubular de alta eficiencia, basado en un proceso de digestión anaeróbica que convierte estiércol en biogás – utilizado como combustible limpio – y biofertilizante, empleado para mejorar suelos y reducir el uso de insumos químicos. Esta tecnología sustituye combustibles tradicionales como Leña, Gas LP (o gas licuado de petróleo, una mezcla de propano y butano utilizada comúnmente para cocinar y calentar agua en hogares rurales mediante cilindros) o diésel, al tiempo que optimiza el manejo adecuado de residuos orgánicos dentro de las unidades productivas.

Los biodigestores ofrecidos por Sistema.bio se diferencian principalmente por su capacidad, su configuración de instalación y el destino del biogás (cocción, calentamiento de agua o generación de energía para usos productivos). Asimismo, pueden incorporar distintos componentes y servicios complementarios —como filtrado, almacenamiento, monitoreo y gestión del biofertilizante— según las necesidades del productor. En comparación con

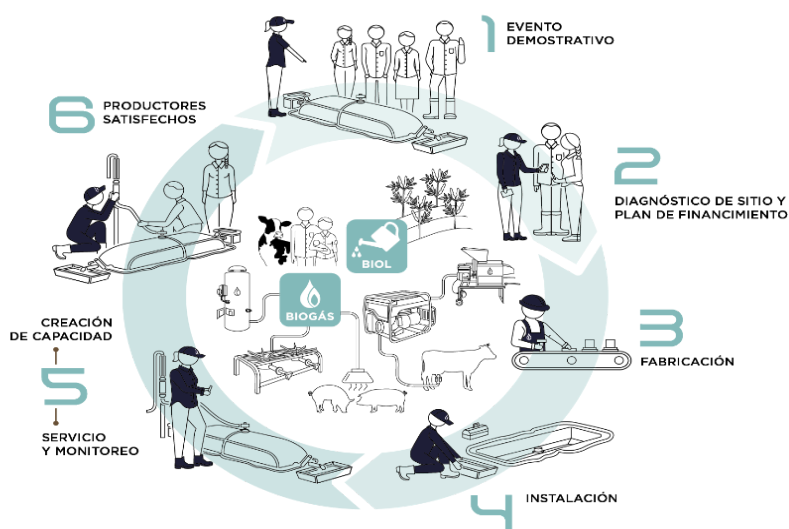
otras soluciones disponibles, estos sistemas se destacan por su flexibilidad de configuración y su prolongada vida útil, sustentadas en el uso de geomembranas de alta durabilidad que permiten operar en diversos climas y condiciones rurales. Esta adaptabilidad facilita el ajuste del biodigestor a la escala de cada unidad productiva y al volumen diario de residuos disponibles.

El modelo de intervención de la empresa no se limita a la provisión tecnológica. Sino que se incluyen:

- I. Diagnóstico energético y productivo de cada unidad rural
- II. Instalación del biodigestor mediante equipos especializados
- III. Capacitación técnica personalizada para asegurar un uso eficiente del sistema
- IV. Acompañamiento continuo para la resolución de incidencias operativas
- V. Programas de financiamiento flexibles en articulación con instituciones locales.

Como se observa en la siguiente ilustración (figura 1), este ciclo de servicio garantiza que la curva de aprendizaje del productor sea breve y que la eficiencia operativa del sistema se mantenga en niveles óptimos a largo plazo.

Figura 1. Modelo de acompañamiento integral de Sistema.bio.



Fuente: Catálogo General Sistema.bio (2025).

A escala internacional hasta 2025, la firma reporta haber contribuido a mitigar alrededor de 1,3 millones de toneladas de CO₂e, posicionándose como una herramienta relevante para los objetivos de desarrollo sostenible, la transición energética y la agricultura regenerativa. Asimismo, en la plataforma institucional de “impacto” la empresa presenta indicadores globales actualizados de manera periódica sobre biodigestores instalados, residuos tratados, biogás generado y hectáreas fertilizadas, que permiten dimensionar la escala de sus resultados ambientales y productivos.

Desde el punto de vista micro económico, Sistema.bio se posiciona como un catalizador de eficiencia operativa. Su modelo permite que el pequeño productor capture ahorros significativos en su estructura de costos —específicamente en energía y fertilización—, transformando gastos corrientes en capacidad de ahorro e inversión. A nivel macro, la empresa actúa como un vehículo de economía circular, donde el residuo se revaloriza, reduciendo las fallas de mercado asociadas a la contaminación y fomentando un desarrollo rural resiliente y bajo en carbono.

3. Marco teórico

El análisis del impacto de los biodigestores en el sector agropecuario rural se aborda desde los enfoques de la economía del desarrollo, la economía ambiental y la economía de la energía. En América Latina, y especialmente en México, donde hay una fuerte presencia de producción agropecuaria familiar, las restricciones energéticas, la dependencia de insumos externos y la gestión ineficiente de residuos constituyen factores estructurales que limitan la productividad y el bienestar económico de los hogares rurales.

El análisis de esta problemática se sustenta en los datos del Balance Nacional de Energía (BNE) de México, el cual revela una dependencia estructural crítica. Actualmente, el sector residencial es uno de los mayores consumidores de energía final en el país, donde el gas LP y la leña predominan como fuentes

principales. Según cifras oficiales, México importa cerca del 70% del Gas LP que consume, lo que expone a los hogares rurales a la volatilidad de los precios internacionales y a las ineficiencias en la cadena de logística nacional. Asimismo, el uso de leña sigue representando aproximadamente el 30% del consumo energético del sector residencial rural, lo que evidencia una brecha tecnológica y una persistente pobreza energética que el sistema de biodigestión puede mitigar mediante la descentralización de la oferta energética.

Desde la perspectiva microeconómica, los productores agropecuarios enfrentan una estructura de costos en la que los gastos energéticos y los insumos químicos —especialmente los fertilizantes químicos— representan una proporción significativa de sus costos operativos. Esta situación se ve agravada por la alta dependencia de insumos importados y por la volatilidad de sus precios en los mercados internacionales, lo que incrementa aún más la vulnerabilidad económica de los productores, reduce su margen de rentabilidad y limita su capacidad de planificación a largo plazo.

En el caso de México, esta dependencia cobra una especial relevancia (Carbajal, 2025). El país importa alrededor del 65% de los fertilizantes que demanda, siendo la urea el insumo principal (60% del total importado). Con aproximadamente 15 millones de hectáreas fertilizadas químicamente —donde el maíz es el cultivo predominante con requerimientos que superan los 400 kilogramos de urea por hectárea—, cualquier “shock” de precios internacionales impacta directamente en el ingreso disponible de las familias. El biofertilizante (biol) generado localmente permite internalizar la producción de insumos, transformando al productor de un “tomador de precios” a un gestor autónomo, mejorando su margen de rentabilidad.

La problemática económica de los hogares rurales no se limita exclusivamente a los costos productivos asociados a la fertilización, sino que también involucra el acceso y el costo de las fuentes de energía utilizadas tanto para actividades domésticas como productivas. En numerosas zonas rurales de México, y especialmente en áreas de difícil acceso, el gas licuado de petróleo (GLP)

representa un gasto elevado para las familias, debido no solo a su precio, sino también a los costos adicionales derivados de su transporte y distribución. Esta barrera económica induce a los hogares a una situación de pobreza energética, obligándolos al uso de combustibles tradicionales como la leña.

Si bien la leña reduce el gasto monetario inmediato, genera costos sociales y sanitarios invisibles. La combustión ineficiente en espacios con poca ventilación incrementa la exposición al monóxido de carbono y material particulado, afectando la salud respiratoria y ocular de mujeres y niños. El biogás, aunque presenta un poder calorífico inferior al GLP (debido a una concentración de metano de entre el 60-65% frente al propano puro), constituye una solución de soberanía energética. La combustión limpia del GLP permite sustituir parcial o totalmente el consumo de leña y gas comercial, eliminando contaminantes intradomiciliarios y revalorizando el tiempo de los integrantes del hogar.

Finalmente, la incorporación de biodigestores se analiza desde la perspectiva de las externalidades. Las prácticas tradicionales generan externalidades negativas: emisión de gases de efecto invernadero (GEI), contaminación de acuíferos y proliferación de vectores. Al no existir mecanismos de mercado que penalicen estos daños, el resultado es socialmente ineficiente.

La implementación de biodigestores permite la internalización de estas externalidades. Al capturar el metano —un gas con un potencial de calentamiento global hasta 28 veces superior al CO_2 — y estabilizar los residuos orgánicos, se generan beneficios ambientales que se derraman sobre la sociedad en su conjunto (externalidades positivas).

4. Abordaje metodológico

El presente trabajo adopta un enfoque metodológico descriptivo, con elementos de análisis económico aplicado, enmarcado en una modalidad de investigación aplicada. La metodología se orienta a analizar los impactos económicos y

ambientales derivados de la implementación de biodigestores en productores agropecuarios rurales de México, a partir de la experiencia desarrollada durante la Práctica Profesional Supervisada en Sistema.bio.

Desde el punto de vista del análisis económico, se adoptó una perspectiva centrada en la estructura de costos de los productores agropecuarios rurales, con énfasis en los gastos asociados al consumo energético y al uso de fertilizantes. A partir de esta perspectiva, se analizó de manera conceptual y descriptiva cómo la implementación de biodigestores permite sustituir insumos adquiridos en el mercado por recursos generados dentro de la propia unidad productiva, generando ahorros monetarios y mejoras en el ingreso disponible de los hogares rurales.

El análisis ambiental se abordó a partir del enfoque de las externalidades, considerando los efectos de la digestión anaeróbica sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la mejora en la gestión de residuos orgánicos. En este sentido, se evaluaron los beneficios ambientales asociados a la adopción de biodigestores, tanto a nivel de la unidad productiva como en términos de impactos de alcance social más amplio.

La metodología utilizada no persigue la estimación econométrica de impactos, sino la integración de evidencia técnica, económica y ambiental que permita evaluar de manera consistente el potencial de los biodigestores como herramienta de desarrollo rural sostenible. Este enfoque resulta adecuado al carácter exploratorio y aplicado del trabajo, así como a los objetivos planteados en el marco de la Práctica Profesional Supervisada.

Por último, el análisis se basó principalmente en el uso de fuentes secundarias y primarias de información. Entre las fuentes secundarias se incluyó la revisión de documentación técnica e institucional provista por Sistema.bio, informes de impacto y sostenibilidad, material técnico sobre biodigestores, y bibliografía especializada vinculada a economía del desarrollo, economía ambiental y energías renovables aplicadas al sector agropecuario. Asimismo, se utilizaron

datos e informes de organismos nacionales e internacionales relevantes para el contexto de México, con especial atención al sector rural.

Las fuentes primarias de información consistieron en reuniones y espacios de intercambio con profesionales del área de impacto y sostenibilidad de la empresa, que permitieron comprender en profundidad el funcionamiento de la tecnología, el modelo de intervención de la empresa y los principales efectos económicos y ambientales observados en las unidades productivas que adoptan biodigestores. Estas instancias aportaron una visión práctica y contextualizada, complementaria a la información documental.

5. Análisis del impacto económico

En línea con las secciones desarrolladas previamente, el presente capítulo analiza el impacto económico de la implementación de biodigestores en productores agropecuarios rurales mexicanos de pequeña y mediana escala, con especial énfasis en la reducción de costos operativos y en la mejora del ingreso disponible de los hogares.

Como paso previo a la evaluación económica, resulta necesario estimar la factibilidad técnica mínima del sistema, es decir, el potencial de producción de biogás en función de la disponibilidad de residuos orgánicos. En base a entrevistas realizadas durante la práctica y utilizando como referencia técnica la información provista por la empresa, la viabilidad de un biodigestor rural depende, en primer lugar, de la cantidad de estiércol disponible diariamente —condicionada por la escala del productor y el manejo del ganado—, dado que esta define la capacidad real de alimentar el sistema de manera sostenida. Asimismo, el desempeño del biodigestor se encuentra fuertemente influido por la temperatura del ambiente, ya que la velocidad de biodegradación y la producción de biogás dependen de las características de la materia prima, el tiempo de retención, el porcentaje de sólidos totales y la temperatura a la que se desarrolla el proceso.

A efectos de homogeneizar el análisis, se adoptan supuestos consistentes con un hogar rural de cuatro integrantes (dos adultos y dos menores), criadores de cerdos, con disponibilidad de agua y espacio físico para la instalación. En todos los casos, la factibilidad mínima se expresa en función de la cantidad de animales disponibles según clima (cálido, templado o frío), y los requerimientos diarios se presentan como mezcla de alimentación (estiércol y agua). Los resultados del sistema se reportan como metros cúbicos (m^3) diarios de biogás obtenidos y con su respectiva equivalencia en horas para cocción (h) y litros diarios de biofertilizante (biol).

A continuación, se nombran los distintos sistemas provistos por la empresa para productores de menor y mediana escala. Se define como escala reducida al conjunto de los agricultores de subsistencia, quienes presentan un uso intensivo de madera y acceso limitado a fertilizantes químicos. Por su parte, la mediana escala comprende a un grupo de productores orientados tanto al autoconsumo como a la comercialización en los mercados locales.

5.1. Sistemas porcinos y desempeño técnico por clima

A partir del catálogo 2024 de la firma, se establecen los siguientes parámetros de dimensionamiento:

El **Sistema 6 (S6)** está diseñado para unidades productivas porcinas de pequeña escala. Su viabilidad mínima requiere de 10 cerdos en clima frío, 16 animales en templado y hasta 19 en clima cálido. Para su operación, el sistema demanda una carga diaria de 40 litros (L) de mezcla, compuesta por 20 L de estiércol y 20 L de agua. En términos de resultados, el rendimiento energético varía según el piso térmico: produce 0,9 metros cúbicos por día (m^3/d) en clima frío (equivalente a 1,8 h de cocción), unos 1,5 m^3/d en templado (3 h) y alcanza 1,93 m^3/d en clima cálido (3,7 h).

El **Sistema 8 (S8)** representa un escalón superior de capacidad, recomendado para granjas que cuentan con 13 cerdos en clima frío, 22 en templado y 25 en un clima cálido. Los requerimientos de alimentación diaria ascienden a 53 L de mezcla, integrando aproximadamente 27 L de estiércol y 26 L de agua. Este sistema ofrece una mayor estabilidad energética, entregando 1,2 m³/d en clima frío (2,2 h), 2 m³/d en templado (4 h) y hasta 2,6 m³/d en clima cálido (5 h).

El **Sistema 12 (S12)** constituye la alternativa intermedia para alcanzar la autonomía energética total en el hogar. Su operación es viable con un inventario de 19 cerdos en clima frío, 28 en templado y 35 en clima cálido. El sistema debe alimentarse diariamente con 80 L de mezcla (40 L de estiércol y 40 L de agua). Los rendimientos reportados son significativos: 1,8 m³/d en clima frío (3 h); 2,8 m³/d en templado (5,5 h) y 3,9 m³/d en clima cálido (7,5 h). Estos niveles de producción aseguran la sustitución del 100% del Gas LP en la mayoría de los escenarios.

El **Sistema 16 (S16)** eleva la capacidad de procesamiento para productores con mayor disponibilidad de recursos, requiriendo 28 cerdos en clima frío, 41 en templado y 50 en clima cálido. La carga diaria operativa es de 106 L de mezcla, combinando 53 L de estiércol con 53 L de agua. Es el sistema de mayor impacto energético, con producciones de 2,1 m³/d en clima frío (4 h); 3,5 m³/d en templado (7 h) y un máximo de 5,2 m³/d en clima cálido, permitiendo hasta 10 h de cocción diaria.

Para facilitar la comparativa técnica entre los modelos analizados y su desempeño según las condiciones ambientales, se presenta a continuación una tabla resumen. En esta se integran los requerimientos de biomasa (cerdos) y el rendimiento energético esperado (biogás y horas de cocción) para cada zona climática de implementación.

Tabla 1. Especificaciones técnicas y rendimientos por modelo y piso térmico

Modelo	Parámetro Operativo	Clima Frío	Clima Templado	Clima Cálido
S6	Cerdos requeridos (un)	10	16	19
	Carga diaria (L mezcla)	40	40	40
	Producción Biogás (m³/d)	0,9	1,5	1,93
	Tiempo cocción (h)	1,8	3,0	3,7
S8	Cerdos requeridos (un)	13	22	25
	Carga diaria (L mezcla)	53	53	53
	Producción Biogás (m³/d)	1,2	2,0	2,6
	Tiempo cocción (h)	2,2	4,0	5,0
S12	Cerdos requeridos (un)	19	28	35
	Carga diaria (L mezcla)	80	80	80
	Producción Biogás (m³/d)	1,8	2,8	3,9
	Tiempo cocción (h)	3,0	5,5	7,5
S16	Cerdos requeridos (un)	28	41	50

Modelo	Parámetro Operativo	Clima Frío	Clima Templado	Clima Cálido
	Carga diaria (L mezcla)	106	106	106
	Producción Biogás (m³/d)	2,1	3,5	5,2
	Tiempo cocción (h)	4,0	7,0	10

Fuente: Elaboración propia basandose en Catálogo General Sistema.bio (2025)

Por último, en la Figura 2 se exponen las dimensiones de los biodigestores según su modelo, detallando las longitudes de los reactores en metros (m). Esta representación gráfica permite observar la modularidad del sistema, donde el diseño se extiende longitudinalmente para incrementar la capacidad de tratamiento de desechos sin alterar el ancho estándar del componente. Dicha información es crucial para el productor al momento de planificar la obra civil y la excavación de la fosa donde se alojará el equipo.

Figura 2. Tamaño de los distintos biodigestores de Sistema.bio.



Fuente: Catálogo General Sistema.bio (2025).

5.2. Requerimientos complementarios y accesorios para el uso del biogás

Complementariamente a la instalación del reactor, el aprovechamiento doméstico del biogás requiere de dispositivos compatibles con las bajas presiones de este combustible (Figuras 3 y 4). Específicamente, se utiliza la Bioestufa-2, equipada con quemadores diseñados exclusivamente para biogás (no compatibles con gas LP ni electricidad), lo que garantiza una combustión eficiente y segura. Este accesorio es compatible con los modelos S6, S8, S12 y S16, y representa una inversión adicional de \$93 USD sobre el costo base del biodigestor.

Figura 3. Bio Estufa-2



Fuente: Catálogo General Sistema.bio (2025).

Otro accesorio destacable es el Bio-calentador de agua de flujo continuo, diseñado para proveer agua caliente sanitaria al hogar de manera sostenible. Considerando un régimen de uso diario de entre 4 y 8 duchas —con una duración de 10 minutos y un caudal de 5 L/min (litros por minuto)—, este dispositivo es técnica y energéticamente compatible con los sistemas S12 y S16. Su integración representa una inversión adicional de \$305 USD respecto al costo del biodigestor.

Figura 4. Bio Calentador-2

Fuente: Catálogo General Sistema.bio (2025).

5.3. Biofertilizantes (biol) y sustitución parcial de fertilizantes sintéticos

El biofertilizante (biol) no constituye un sustituto perfecto de la urea u otros fertilizantes sintéticos, pero actúa como un sustituto parcial eficiente. A diferencia de la urea —que funciona principalmente como fuente de nitrógeno—, el biol no solo aporta nutrientes, sino que mejora la estructura del suelo, incrementa la actividad biológica y favorece la sostenibilidad productiva. A continuación, se detalla la relación entre el volumen de biol producido y su capacidad de cobertura en hectáreas (ha), considerando que a mayor temperatura ambiente, se incrementa la eficiencia biológica del sistema y, por ende, la disponibilidad del recurso.

Para ilustrar la capacidad de fertilización de cada modelo, se presenta a continuación la comparativa de producción de biol y su rendimiento en términos de superficie agrícola cubierta anualmente, desglosada por zona climática.

El S6 genera una salida neta de 135 litros por día (L/d) en clima cálido, 113 L/d en templado y 72 L/d en clima frío. Esta producción permite cubrir una superficie de 4,9 ha/año; 4,1 ha/año y 2,6 ha/año, respectivamente.

En el caso del S8, se producen 180 L/d en clima cálido, 158 L/d en templado y 99 L/d en clima frío, logrando una cobertura de 6,6 ha/año; 5,7 ha/año y 3,6 ha/año, respectivamente.

Por su parte, el S12 genera 270 L/d en clima cálido, 203 L/d en templado y 135 L/d en clima frío. Los rendimientos de fertilización alcanzan las 9,9 ha/año; 7,4 ha/año y 4,9 ha/año, respectivamente.

Finalmente, el S16 alcanza una producción de 360 L/d en clima cálido, 293 L/d en templado y 270 L/d en clima frío. En este escenario, la capacidad de cobertura es de 13,1 ha/año; 10,7 ha/año y 7,4 ha/año, respectivamente.

Se observa un patrón consistente donde la productividad del sistema y la superficie fertilizada disminuyen progresivamente al transitar de pisos térmicos cálidos a fríos, debido a la ralentización de los procesos de digestión anaeróbica. Este patrón se presenta en el siguiente cuadro resumen:

Tabla 2. Producción diaria de biol y capacidad de cobertura anual por modelo y clima.

Modelo	Parámetro de Fertilización	Clima Cálido	Clima Templado	Clima Frío
S6	Producción de biol (L/d)	135	113	72
	Cobertura anual (ha/año)	4,9	4,1	2,6
S8	Producción de biol (L/d)	180	158	99
	Cobertura anual (ha/año)	6,6	5,7	3,6

Modelo	Parámetro de Fertilización	Clima Cálido	Clima Templado	Clima Frío
S12	Producción de biol (L/d)	270	203	135
	Cobertura anual (ha/año)	9,9	7,4	4,9
S16	Producción de biol (L/d)	360	293	270
	Cobertura anual (ha/año)	13,1	10,7	7,4

Fuente: Elaboración propia basandose en Catálogo General Sistema.bio (2025)

5.4. Cuantificación monetaria

Para cuantificar el ahorro real en los hogares en dólares estadounidenses (USD), se parte de una base de consumo doméstico aproximado de 30 kilogramos (kg) de Gas LP mensuales, lo que, a un precio promedio de \$1,05 USD/kg, representa un gasto anual de \$378 USD, según datos oficiales (Comisión Nacional de Energía, 2025).

Asimismo, de acuerdo con la equivalencia técnica establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, donde un metro cúbico (1 m³) de biogás equivale a 0,45 kg de Gas LP, se determina que una familia necesita producir aproximadamente 66,6 m³ de biogás al mes (alrededor de 2,22 m³ diarios) para sustituir el 100% de su consumo de cilindro.

Para analizar el ahorro en fertilización, se toma como referencia el cultivo de maíz, pilar de la agricultura de pequeña escala en México. En promedio, este cultivo requiere una aplicación de 300 kg de urea por hectárea, lo que a un

precio proyectado de \$0,90 USD/kg supone una inversión de \$270 USD por ciclo agrícola.

Sin embargo, el biofertilizante líquido (Biol) producido por el sistema no es un sustituto total, sino un optimizador del suelo. La recomendación técnica para una transición agroecológica segura es una sustitución parcial del 30% del nitrógeno químico. Entonces, para alcanzar este objetivo, se requiere aportar aproximadamente 125 kg de nitrógeno equivalente mediante Biol.

Considerando que 1 litro de Biol aporta los nutrientes necesarios para complementar la fertilización sin saturar el suelo, se determina que la capacidad de cobertura varía drásticamente según el modelo del sistema y la temperatura ambiente. A mayor temperatura, el proceso de mineralización en el biodigestor es más eficiente, entregando un fertilizante con nutrientes más disponibles, lo que permite ampliar la superficie tratada o intensificar la nutrición por planta.

A continuación, se analiza la capacidad de ahorro según el modelo instalado en escenarios de distintos climas.

Tabla 3. Capacidad de ahorro en un clima cálido

Modelo	Producción (m³/d)	GLP equivalente mensual (kg)	% Sust. GLP	Ahorro Gas anual	Biol diario generado (litros)	Ha cubiertas	% Sust urea	Ahorro Urea anual	Ahorro total
S6	1,93	26,06	86,85%	\$328,29	135	4,9	30%	\$396,9	\$725,19
S8	2,60	35,10	100,00%	\$378,00	180	6,6	30%	\$534,6	\$912,60
S12	3,90	52,65	100,00%	\$378,00	270	9,9	30%	\$801,9	\$1.179,90
S16	5,20	70,20	100,00%	\$378,00	360	13,1	30%	\$1.061,1	\$1.439,10

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

En el escenario de clima cálido se observa el máximo potencial de eficiencia biológica de los sistemas. Los modelos a partir del S8 logran una autonomía energética del 100%, eliminando por completo el gasto en Gas LP para la cocción doméstica. Se destaca el ahorro económico del S16, que al combinar la sustitución total de gas con la fertilización de 13,1 ha genera un beneficio anual acumulado de \$1.439,10 USD. Este escenario demuestra que las altas temperaturas optimizan la digestión anaeróbica, maximizando el retorno de la inversión para el productor.

Tabla 4. Capacidad de ahorro en un clima templado

Modelo	Producción (m³/d)	GLP equivalente mensual (kg)	% Sust. GLP	Ahorro Gas anual	Biol diario generado (litros)	Ha cubiertas	% Sust urea	Ahorro Urea anual	Ahorro total
S6	1,50	20,25	67,50%	\$255,15	113	4,1	30%	\$332,10	\$587,25
S8	2,00	27,00	90,00%	\$340,20	158	5,7	30%	\$461,70	\$801,90
S12	2,80	37,80	100,00%	\$378,00	203	7,4	30%	\$599,40	\$977,40
S16	3,5	47,25	100,00%	\$378,00	293	10,7	30%	\$866,70	\$1.244,70

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

En condiciones de clima templado, los niveles de ahorro se mantienen significativos, aunque con una ligera disminución en la producción de biogás respecto al clima cálido. Mientras que los modelos medianos (S12 y S16) conservan su capacidad de sustituir totalmente el Gas LP, el S6 y S8 presentan una cobertura del 67,5% y 90% respectivamente. En cuanto al biofertilizante, la capacidad de cobertura del S16 permite tratar 10,7 ha/año, lo que se traduce en un ahorro por sustitución de urea de \$866,70 USD, consolidando la viabilidad económica del sistema en zonas de temperatura moderada.

Tabla 5. Capacidad de ahorro en un clima frío

Modelo	Producción (m³/d)	GLP equivalente mensual (kg)	% Sust. GLP	Ahorro Gas anual	Biol diario generado (litros)	Hacubiertas	% Sust urea	Ahorro Urea anual	Ahorro total
S6	0,90	12,15	40,50%	\$153,09	72	2,6	30%	\$210,60	\$363,69
S8	1,20	16,20	54,00%	\$204,12	99	3,6	30%	\$291,60	\$495,72
S12	1,80	24,30	81,00%	\$306,18	135	4,9	30%	\$396,90	\$703,08
S16	2,1	28,35	94,50%	\$357,21	270	7,4	30%	\$599,40	\$956,61

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

El escenario de clima frío representa el desafío técnico mayor debido a la ralentización metabólica de las bacterias en el biodigestor. En este caso, ningún modelo logra la sustitución total del Gas LP, con rangos que van desde el 40,5% en el S6 hasta un notable 94,5% en el S16. A pesar de la reducción en el volumen de biol y biogás, el sistema continúa siendo una herramienta de resiliencia financiera: el S12, por ejemplo, genera un ahorro total de \$703,08 USD anuales, una cifra que sigue siendo relevante para la economía del hogar rural en condiciones climáticas adversas.

El análisis desarrollado permite concluir que la implementación de biodigestores modulares trasciende la mera gestión de residuos orgánicos, consolidándose como una inversión estratégica con alta capacidad de generación de ahorro directo.

La evaluación de los sistemas 6, 8, 12 y 16 demuestra que la viabilidad económica está intrínsecamente ligada a dos factores críticos: la escala de producción de biol y el piso térmico de la región. Mientras que el biogás ofrece una solución inmediata a la pobreza energética y la dependencia de combustibles fósiles (alcanzando ahorros de hasta \$378 USD anuales por hogar), es el aprovechamiento integral del biofertilizante lo que potencia el retorno de inversión.

En los escenarios de clima cálido y templado, la capacidad de sustituir el 30% de la urea química —dato obtenido a través de entrevistas a empleados de la empresa— permite a los productores medianos (S12 y S16) capturar ahorros que superan los \$800 USD anuales. Esta liberación de recursos financieros no solo mejora el ingreso disponible del hogar, sino que dota a la unidad productiva de una mayor resiliencia ante la volatilidad de los precios internacionales de los fertilizantes nitrogenados.

Finalmente, al integrar las externalidades positivas —como el ahorro en gastos médicos y la revalorización del tiempo—, el biodigestor se posiciona no solo como una tecnología limpia, sino como un instrumento de soberanía económica y energética. La solidez de estos ahorros anuales constituye la base para el análisis de flujo de caja y retorno de inversión que se presenta a continuación, donde se demostrará que el costo inicial de los sistemas es rápidamente amortizado por los beneficios operativos generados.

5.5. Costo de oportunidad y la revalorización del tiempo

Un análisis económico integral no debe limitarse exclusivamente al ahorro en el flujo de caja operativo; debe incorporar la mitigación de externalidades negativas y el aprovechamiento de los costos de oportunidad asociados a las prácticas tradicionales.

En primer lugar, es imperativo considerar la revalorización del tiempo. En contextos rurales sin acceso a combustibles modernos, la recolección de biomasa (leña) o la logística de traslado de cilindros de Gas LP consume entre cinco y diez horas semanales. Esta labor, que históricamente recae de manera desproporcionada en mujeres y niños, representa un lucro cesante significativo. La implementación del biodigestor elimina esta necesidad, permitiendo que dicho tiempo sea reinvertido en capital humano (educación) o en actividades

generadoras de ingresos (microemprendimientos productivos), generando un beneficio económico indirecto que potencia el desarrollo del hogar.

En segundo lugar, existe un costo de oportunidad crítico vinculado a la bioseguridad y sanidad. El manejo inadecuado de excretas al aire libre fomenta la proliferación de patógenos y una fauna nociva. El costo de “no implementar” un sistema de tratamiento se traduce en:

- Gastos médicos directos: derivados de enfermedades gastrointestinales y afecciones respiratorias (por inhalación de humo de leña).
- Productividad laboral: pérdida de jornadas de trabajo por enfermedad de los integrantes del hogar.

Al confinar los residuos en un sistema anaeróbico cerrado, el productor no solo gestiona desechos, sino que previene pérdidas económicas derivadas de la mala sanidad, mejorando la eficiencia productiva global de la unidad agropecuaria.

5.6. Reducción de la vulnerabilidad ante la volatilidad de mercados externos

Un pilar fundamental del impacto económico de esta tecnología es la transformación del productor de un “tomador de precios” a un gestor de recursos autónomo. El pequeño productor rural es históricamente vulnerable a la volatilidad de los precios internacionales de los hidrocarburos, así como a las fluctuaciones en el mercado de fertilizantes nitrogenados, cuya disponibilidad y costo dependen de factores geopolíticos y logísticos ajenos a la unidad productiva.

Al implementar un biodigestor, la familia reduce drásticamente su exposición al riesgo de mercado. Mientras que un hogar convencional ve comprometida su seguridad alimentaria y energética ante aumentos repentinos en el precio del

Gas LP o de la Urea, el usuario de tecnología de biodigestión mantiene una estructura de costos operativa estable.

El sistema actúa, en la práctica, como un “seguro de insumos” que garantiza un suministro constante de energía y fertilizante a un costo marginal cercano a cero tras la inversión inicial. Esta estabilidad no solo protege el ingreso disponible en periodos de crisis inflacionaria, sino que permite una planificación financiera a largo plazo mucho más certera, fortaleciendo la resiliencia económica de la comunidad rural frente a choques externos.

5.7. Pay-back

Luego de cuantificar los beneficios operativos asociados a la generación de biogás y biofertilizante, resulta pertinente evaluar la viabilidad financiera de la tecnología de Sistema.bio. Para el pequeño y mediano productor, el biodigestor no solo representa una mejora en la gestión de residuos, sino también una inversión de capital que compete con otras necesidades de la unidad productiva.

El análisis que se presenta a continuación se basa en la metodología de Flujo de Caja Neto, contrastando los costos de inversión inicial frente a los ahorros directos generados por la sustitución de Gas LP y, de manera complementaria, por la reducción en el uso de fertilizantes químicos (urea) a partir del uso de biofertilizante. Bajo este enfoque, el *payback* se define como el momento en que el ahorro acumulado iguala el costo total de implementación del sistema.

Para el cálculo, realizado sobre un escenario representativo de clima cálido, se adoptan los siguientes criterios:

- Horizonte de evaluación: 5 años para el flujo de caja, a pesar de que la vida útil del biodigestor puede superar los 20 años.
- Se utiliza una tasa de actualización (tasa de descuento) del 12%.

- Costos operativos: se incorpora un costo anual de mantenimiento asociado a reposiciones menores y limpieza/ajustes de componentes.
- Ingresos (ahorros): se contabiliza como “ingreso”, el gasto evitado por la familia en gas LP y fertilizantes, utilizando precios de referencia para 2026.
- Criterio de evaluación: se utiliza un payback simple (no descontado), por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación financiera de corto plazo.

A continuación, se presentan los flujos de caja para los cuatro sistemas evaluados en un escenario de clima cálido. En estos cuadros, se observa cómo el ahorro acumulado logra neutralizar la inversión inicial en periodos breves.

Tabla 6. Flujo de caja para el sistema 6

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial	- \$1.800,00					
Elementos	- \$93,00					
Ahorro Gas LP		\$328,00	\$328,00	\$328,00	\$328,00	\$328,00
Ahorro Urea (Biol)		\$396,90	\$396,90	\$396,90	\$396,90	\$396,90
Costo Mantenimiento			- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00
Flujo Neto Anual	- \$1.893,00	\$724,90	\$684,90	\$684,90	\$684,90	\$684,90
Flujo Acumulado	- \$1.893,00	- \$1.168,10	- \$483,20	\$201,70	\$886,60	\$1.571,50

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

En el modelo S6, se observa que el ahorro acumulado logra cubrir la inversión inicial de \$1.893 USD poco después de finalizar el segundo año. A partir del tercer año, el sistema comienza a generar un flujo positivo neto de \$684,90

USD anuales, lo que demuestra que, a pesar de ser el sistema de menor escala, su capacidad de sustitución de insumos es lo suficientemente robusta para liberar flujo de caja en el corto plazo.

Tabla 7. Flujo de caja para el sistema 8

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial	- \$2.000,00					
Elementos	- \$93,00					
Ahorro Gas LP		\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00
Ahorro Urea (Biol)		\$534,60	\$534,60	\$534,60	\$534,60	\$534,60
Costo Mantenimiento			- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00
Flujo Neto Anual	- \$2.093,00	\$912,60	\$872,60	\$872,60	\$872,60	\$872,60
Flujo Acumulado	- \$2.093,00	- \$1.180,40	- \$307,80	\$564,80	\$1.437,40	\$2.310,00

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

Para el S8, el flujo neto anual es superior debido a una mayor capacidad de producción de biogás y biol. Esto permite que el flujo acumulado pase a terreno positivo de manera más holgada en el tercer año, generando una riqueza acumulada de \$2.310 USD al finalizar el quinto año. Se evidencia una mejora en la rentabilidad respecto al modelo anterior, manteniendo los mismos costos de mantenimiento operativos.

Tabla 8. Flujo de caja para el sistema 12

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial	- \$2.200,00					
Elementos	- \$398,00					
Ahorro Gas LP		\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ahorro Urea (Biol)		\$801,90	\$801,90	\$801,90	\$801,90	\$801,90
Costo Mantenimiento			- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00
Flujo Neto Anual	- \$2.598,00	\$1.179,90	\$1.139,90	\$1.139,90	\$1.139,90	\$1.139,90
Flujo Acumulado	- \$2.598,00	- \$1.418,10	- \$278,20	\$861,70	\$2.001,60	\$3.141,50

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

El sistema S12 muestra un salto cualitativo en el ahorro por fertilización (\$801,90 USD anuales). Aunque la inversión inicial es mayor, el flujo neto anual de \$1.139,90 USD permite que la recuperación de la inversión sea sumamente eficiente. Al terminar el horizonte de evaluación de 5 años, el productor ha obtenido un beneficio acumulado que supera los \$3.000 USD, consolidando la autonomía energética y económica.

Tabla 9. Flujo de caja para el sistema 16

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión Inicial	- \$2.600,00					
Elementos	- \$398,00					
Ahorro Gas LP		\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00	\$378,00
Ahorro Urea (Biol)		\$1.061,10	\$1.061,10	\$1.061,10	\$1.061,10	\$1.061,10
Costo Mantenimiento			- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00	- \$40,00
Flujo Neto Anual	- \$2.998,00	\$1.439,10	\$1.399,10	\$1.399,10	\$1.399,10	\$1.399,10
Flujo Acumulado	- \$2.998,00	- \$1.558,90	- \$159,80	\$1.239,30	\$2.638,40	\$4.037,50

Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por Sistema.bio.

En el S16, se registra el mayor flujo neto anual del análisis (\$1.399,10 USD). A pesar de ser la inversión inicial más alta, la magnitud de los ahorros en Gas LP y urea minimiza el tiempo de exposición al riesgo. En este modelo, el flujo acumulado del Año 2 queda muy cerca del punto de equilibrio (apenas -\$159,80 USD), logrando una capitalización neta de \$4.037,50 USD al quinto año, la más alta de todos los sistemas.

Al consolidar los resultados de los flujos anteriores, se obtienen los indicadores que confirman la robustez financiera de la inversión. La Tabla 10 resume el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), evidenciando una eficiencia excepcional en la recuperación del capital.

Tabla 10. Comparación de la Tasa Interna de Retorno (TIR) frente al costo de oportunidad (12%)

Sistema	Inversión (Año 0)	VAN (12%)	TIR	Payback (Meses)
S6	\$1.893,00	\$611,63	25%	32
S8	\$2.093,00	\$1.088,24	32%	28
S12	\$2.598,00	\$1.546,80	34%	27
S16	\$2.998,00	\$2.081,16	38%	25

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos anteriormente.

Los indicadores obtenidos confirman una robustez financiera excepcional en los cuatro modelos analizados:

- Valor Actual Neto: En todos los casos, el VAN es positivo (oscilando entre \$611,63 USD para el S6 y \$2.081,61 USD para el S16). Un VAN mayor a cero indica que el proyecto no solo recupera la inversión inicial y los costos de mantenimiento, sino que genera una riqueza neta excedente por encima de la rentabilidad exigida.

- Tasa Interna de Retorno (TIR): Las tasas de retorno obtenidas (que superan el 25% en el modelo base y alcanzan el 38% en el modelo S16) sobrepasan la tasa de descuento del 12%. Esto demuestra que la eficiencia en la sustitución de insumos críticos (Gas LP y Urea) transforma al biodigestor en un activo altamente rentable con un riesgo de inversión muy bajo.
- Los resultados muestran tiempos de recuperación inferiores a los 2,7 años. Se observa que a medida que aumenta la escala del sistema, se aceleran los beneficios, confirmando la existencia de economías de escala.

En conjunto, estos valores sugieren que, bajo los supuestos adoptados —ahorros relativamente estables por sustitución de gas LP, sustitución parcial de fertilización química vía biofertilizante y costos de mantenimiento acotados—, la tecnología presenta una alta capacidad de recuperación de capital y potencial para mejorar la liquidez y el ingreso disponible del hogar rural en el mediano plazo.

La reducción del payback a medida que aumenta la escala del sistema indica que los biodigestores de mayor capacidad tienden a generar mayores beneficios económicos anuales y, por lo tanto, aceleran la amortización de la inversión, siempre que existan condiciones técnicas adecuadas (disponibilidad diaria de estiércol y agua, operación sostenida y desempeño acorde al clima). En este sentido, los resultados deben interpretarse como un escenario de referencia, más probable en unidades productivas capaces de mantener el sistema operando de forma continua y de traducir la producción de biogás y biofertilizante en una reducción efectiva de compras de energía e insumos.

Desde una perspectiva de desarrollo rural, una inversión con repago relativamente corto contribuye a reducir la vulnerabilidad frente a la volatilidad de precios energéticos y permite liberar recursos para otros usos productivos. A su vez, parte de los beneficios asociados —como la mejora en la gestión de residuos y la reducción de emisiones— excede la esfera privada del productor y se manifiesta como externalidades positivas, lo que refuerza la pertinencia de

esquemas de financiamiento, acompañamiento técnico e instrumentos de política que faciliten su adopción.

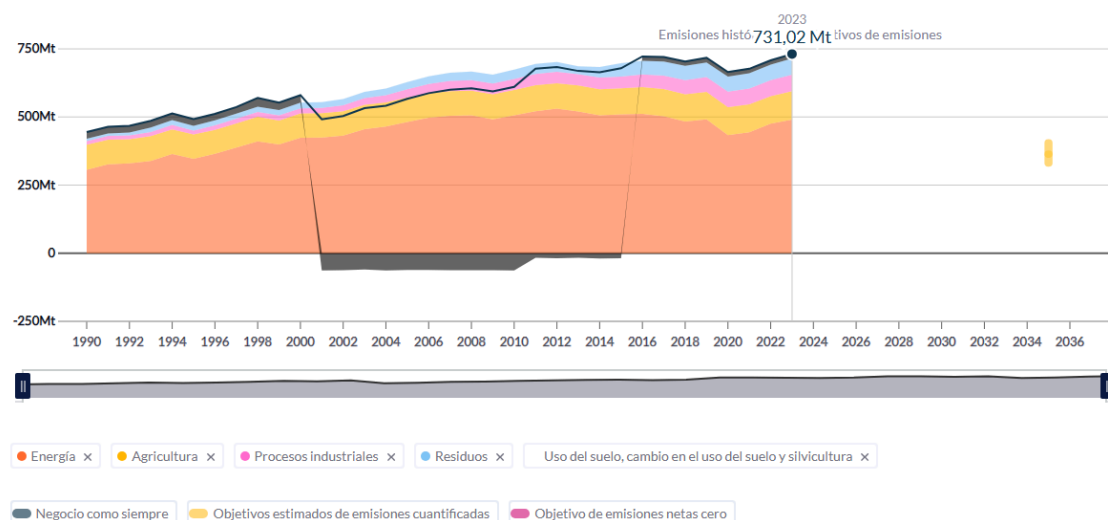
El incremento progresivo del VAN y la TIR conforme aumenta la escala del sistema evidencia la existencia de economías de escala. El Sistema 16 se posiciona como la opción más eficiente financieramente, ofreciendo el mayor enriquecimiento neto para el productor y el menor tiempo de exposición al riesgo (Payback). Estos resultados validan que la tecnología de Sistema.bio es una solución financieramente sostenible que fortalece la capitalización del hogar rural.

6. Impacto ambiental

En continuidad con los apartados desarrollados previamente, este capítulo analiza los impactos ambientales y sociales relacionados a la adopción de biodigestores en unidades agropecuarias rurales, con foco en México como caso de referencia. A diferencia del capítulo económico —centrado en ahorros monetarios—, aquí se aborda el conjunto de beneficios que exceden la esfera estrictamente privada y que, en gran medida, se manifiestan como externalidades positivas: impactos favorables sobre el clima, el ambiente local y el bienestar de los hogares rurales, que no siempre se reflejan plenamente en los precios de mercado.

Para comprender la relevancia de la tecnología de biodigestión, es necesario analizar el perfil de las emisiones de GEI de México. Según los datos históricos recopilados por Climate Watch (de 1990 a 2023), México ha experimentado un crecimiento sostenido en sus emisiones totales, donde los sectores de Energía y Agricultura se consolidan como los pilares de la huella de carbono nacional.

Figura 5. Emisiones de GEI y objetivos de emisiones en México



Fuente: Climate Watch Data.

Al desglosar la imagen, se pueden destacar tres puntos clave que validan el uso de biodigestores:

- **Dominio del Sector Energía:** como se observa en la franja naranja, la energía es la principal fuente de emisiones. El uso de biogás para la cocción ataca directamente este sector, sustituyendo el Gas LP (un combustible fósil) por una fuente renovable local.
- **Impacto de la Agricultura:** El sector agrícola (franja amarilla) mantiene una presencia constante y significativa en la huella de carbono nacional. El biodigestor interviene aquí al capturar el metano del estiércol que, de otro modo, se liberaría a la atmósfera.
- **Gestión de Residuos:** El componente de residuos (franja azul claro) también contribuye al total. La tecnología de Sistema.bio tecnifica este manejo, transformando lo que la gráfica clasifica como “residuo” en un activo (biofertilizante).

Esta transición hacia un desarrollo sustentable permite que la tecnología de Sistema.bio se alinee directamente con la Agenda 2030, contribuyendo al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

- ODS 2 (Hambre cero): Mediante el uso del biol para mejorar la productividad y salud del suelo.
- ODS 5 (Igualdad de género): Al reducir el tiempo de recolección de leña y mejorar la salud respiratoria de las mujeres en el hogar rural.
- ODS 7 (Energía asequible y no contaminante): Al brindar acceso a una fuente de energía renovable local.
- ODS 13 (Acción por el clima): Por la reducción directa de emisiones de metano en el sector agropecuario.

La implementación de biodigestores es una medida de mitigación costo-efectiva, especialmente necesaria en México. El biodigestor ataca este problema mediante dos mecanismos:

- Sustitución de combustibles tradicionales por biogás: como se explicó anteriormente, el biogás puede utilizarse en cocción y otras aplicaciones domésticas/productivas, reemplazando de manera parcial o totalmente combustibles como el gas LP y, en algunos contextos, la leña. Este desplazamiento reduce emisiones asociadas a la combustión de combustibles fósiles y puede disminuir la presión sobre los recursos naturales cuando sustituye la biomasa.
- Captura y control del metano asociado al estiércol: en escenarios sin tratamiento, la descomposición de residuos orgánicos puede generar emisiones de metano, particularmente cuando existen condiciones anaeróbicas. El biodigestor canaliza ese proceso dentro de un sistema controlado, capturando el biogás y permitiendo su uso energético, reduciendo así la liberación directa de gases de efecto invernadero.

Más allá del componente climático, el biodigestor transforma el manejo del estiércol y residuos orgánicos dentro de la unidad productiva. En un escenario base, el estiércol puede acumularse al aire libre o disponerse sin tratamiento, generando problemas frecuentes: olores intensos, proliferación de vectores (moscas), escurrimientos y riesgos de contaminación de suelos y fuentes de agua por carga orgánica y nutrientes.

En contextos rurales, el acceso a esta energía limpia mejora la calidad del aire intradomiciliario y reduce la exposición a humo. Asimismo, otorga autonomía y soberanía energética al hogar, eliminando la vulnerabilidad ante fallas en la cadena de suministro externa de Gas LP. Adicionalmente, en hogares que recolectan leña, parte del beneficio social se refleja en el ahorro de tiempo, liberando horas para actividades productivas o educativas.

La instalación del biodigestor introduce un esquema de gestión más ordenado y controlado: el residuo se canaliza hacia un proceso de digestión y se obtiene un efluente (digestato/biol) con potencial de uso agronómico. Esto puede traducirse en mejoras visibles en el entorno inmediato del hogar y la granja.

El biofertilizante (biol) puede aportar nutrientes y materia orgánica, y su uso adecuado puede favorecer una mejora gradual de la estructura del suelo y la dinámica biológica, con potenciales efectos indirectos sobre productividad y resiliencia (por ejemplo, mayor retención de humedad y mejor aprovechamiento de nutrientes). Estos beneficios suelen ser de mediano plazo y dependen del manejo agronómico (dosis, momento de aplicación, combinación con fertilización sintética cuando sea necesario).

Figura 6. Testimonio Lorena, México

4. El biol ayuda a agricultores a alimentar a sus familias



"La caña es mucho más gruesa, el elote es mucho más grande, la hoja es mucho más verde. Y si es en calabaza ni se diga. El frijol también se dio mucho más bonito".

-Lorena, Xaltitla, México

Fuente: Sistema.bio.

El caso de Lorena ejemplifica la aplicación de la tecnología en unidades porcinas de pequeña y mediana escala. Productores con este perfil integran el manejo de entre 10 y 50 cerdos (según el modelo de biodigestor instalado) para transformar las excretas diarias en biogás. Este testimonio refuerza cómo la escala de producción animal se traduce directamente en la autonomía energética para el hogar y en la generación de biofertilizante para sus propias parcelas de cultivo, cerrando el ciclo productivo de la granja.

La adopción de biodigestores genera beneficios privados (ahorro en energía e insumos) y beneficios sociales (reducción de emisiones, menor contaminación local, mejoras de salud y bienestar). Estos últimos constituyen externalidades positivas, ya que sus beneficios se derraman sobre terceros y no son plenamente captados por el productor en forma de ingresos directos. En consecuencia, desde un enfoque económico, la difusión de esta tecnología puede ser menor que la socialmente óptima en ausencia de instrumentos de política y financiamiento que reconozcan dichos beneficios (por ejemplo, créditos blandos, apoyo técnico, programas públicos o esquemas de carbono).

Más allá de los beneficios específicos en mitigación y salud, la implementación de esta tecnología representa una transición efectiva hacia un modelo de Economía Circular en la base de la pirámide. A diferencia del modelo lineal tradicional de 'producir-consumir-desechar' —donde el estiércol es un residuo contaminante—, el biodigestor cierra el ciclo de nutrientes y energía. En este esquema, los desechos orgánicos se reintegran al sistema productivo como energía limpia y fertilizante de alta calidad, transformando un pasivo ambiental en un activo económico estratégico y promoviendo la resiliencia del ecosistema rural.

7. Reflexiones finales

La presente práctica permitió evaluar de manera integral la viabilidad técnica y financiera de los biodigestores de Sistema.bio, analizando cuatro modelos de distinta capacidad (S6, S8, S12 y S16). Para este análisis, se consideró el clima como la variable operativa crítica, determinando que la eficiencia biológica y la producción de biogás se optimizan en climas cálidos, aunque el sistema mantiene su viabilidad funcional en pisos térmicos templados y fríos mediante el ajuste del inventario animal requerido.

Bajo un escenario de un hogar rural de cuatro integrantes, criadores de cerdos, con disponibilidad de agua y espacio físico para la instalación, el análisis de flujo de caja confirma que la tecnología es una inversión de alta rentabilidad. Con un VAN positivo en todos los modelos y una TIR que alcanza el 38% en el Sistema 16, el proyecto supera ampliamente el costo de oportunidad del capital (12%). El Payback promedio de 2 años demuestra que el sistema no solo es ambientalmente responsable, sino financieramente superior a otras alternativas de inversión rural, garantizando una rápida recuperación de la liquidez para el hogar.

A su vez, se identificó que el mayor impacto económico proviene de la sustitución de fertilizantes químicos. En un contexto de alta dependencia de urea importada en México, el biofertilizante (biol) actúa como un motor de soberanía productiva. La capacidad de los sistemas para reducir la vulnerabilidad ante la volatilidad de precios internacionales y el riesgo cambiario transforma al biodigestor en una herramienta de resiliencia macroeconómica.

Finalmente, esta práctica permitió validar que la sostenibilidad de una empresa social reside en su capacidad de demostrar con métricas financieras que la ecología y la rentabilidad pueden coexistir. Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo abren la puerta a nuevas líneas de investigación y aplicación, particularmente para el contexto de Argentina:

- Sustitución de Importaciones y Divisas: en Argentina, la adopción masiva de esta tecnología en granjas porcinas y tambos podría actuar como una política de sustitución de importaciones de fertilizantes nitrogenados, aliviando la demanda de divisas y mejorando la balanza comercial sectorial.
- Adaptación a Climas Templados-Fríos: Una línea futura de gran valor sería estudiar el rendimiento de estos sistemas en la región pampeana o patagónica durante el invierno, evaluando el uso de invernaderos o mantas térmicas para mantener la estabilidad del flujo de gas.
- Mercado de Carbono: Existe un gran potencial para agrupar a pequeños productores en proyectos de certificación de bonos de carbono por la reducción de emisiones de metano, lo que podría generar ingresos adicionales y acelerar aún más el tiempo de repago de la inversión.

En conclusión, la tecnología de biodigestión representa una transición efectiva hacia un modelo de Economía Circular en la base de la pirámide. El esquema de monitoreo y acompañamiento técnico se revela como el factor crítico para asegurar que el biodigestor sea, efectivamente, un catalizador de desarrollo rural sostenible a largo plazo, capaz de ser adaptado con éxito a las particularidades productivas y climáticas del territorio mexicano o argentino.

8. Referencias

- Banco de México. (2022). *Estimación del requerimiento promedio de fertilización con urea para granos seleccionados*.
<https://www.banxico.org.mx/TablasWeb/reportes-economias-regionales/enero-marzo-2022/C155BC9A-A7D0-4D75-8744-5EEA4A91469E.html>
- Carbajal, B. (2025, 20 de enero). *México compra al extranjero 65% de los fertilizantes que utiliza: GCMA. La Jornada*.
<https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/01/20/economia/mexico-compra-al-extranjero-65-de-los-fertilizantes-que-utiliza-gcma-7766>
- Climate Watch. *Mexico country profile*. Recuperado el 2 de marzo de 2026, de
https://www.climatewatchdata.org/countries/MEX?end_year=2023&start_year=1990
- Comisión Nacional de Energía. (2025, 7 de junio). *Precios máximos aplicables de gas LP*.
<https://www.gob.mx/cne/documentos/precios-maximos-aplicables-de-gas-lp-399897>
- Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad. (2022). *Balance Nacional de Energía*.
<https://energia.conacyt.mx/planeas/balance/balance-energia>
- Secretaría de Energía (2025, 10 de febrero). *Balance Nacional de Energía. Gobierno de México*.
<https://www.gob.mx/sener/es/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>
- Sistema.bio. (2024). *Catálogo general de productos y soluciones México*.
<https://sistema.bio/wp-content/uploads/2024/12/Catalogo-general-Mexico.pdf>
- Sistema.bio. (2025). *Una tecnología, múltiples impactos: Brochure 2025*.
https://drive.google.com/file/d/1e8a_epHj5fvpH6HUFr1iWp9lw18kH21r/view