

Thermoeconomic Assessment and Modeling of the Potential for Organic Fertilizer Production from Farm Animal Manure in Latin America: Towards Sustainable and Circular Agriculture.

GÓMEZ MONTOYA Ph.D.^{1*}, Luis Felipe ORTIZ DONGO Ing.², Richard SOLÓRZANO Ph.D.², Carlos ARRIETA GONZALES Ph.D.³, Mario LUNA DELRISCO Ph.D.³, Edgar COAQUIRA TORRES MsC.¹, Jhuliana M. ROJAS RIMBALDI Ing.⁴.

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, *jgomezmo@utp.edu.pe.

²Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Lima, Perú.

³Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Colombia.

⁴DSE Ingeniería SAC DECHINI.

Abstract– This document presents a thermoeconomic mathematical model to quantify the potential of bioenergy that could be generated in Latin America (LATAM) under the circular economy approach. The study focuses on the valorization of livestock manure, an abundant resource in the region, for the production of biofertilizers and biogas, thereby contributing to agricultural and energy sustainability. A calculation model is developed to estimate the number of biodigesters required based on a scenario of partial manure collection, considering the specificities of each country in terms of resource availability and energy needs. The model quantifies the potential production of biogas, which can be used as a renewable energy source, and biofertilizers, which improve soil fertility and reduce dependence on chemical fertilizers. Additionally, three types of biodigesters developed within the framework of this research are detailed, each adapted to different contexts and production scales. These biodigesters have been field-tested, with results endorsed by the Ministry of Agriculture of Peru, ensuring their effectiveness and applicability in real-world conditions. The produced biofertilizers have proven to be of high quality, meeting agronomic standards and promoting organic agriculture. The thermoeconomic analysis includes a detailed assessment of the required investments for the implementation of biodigesters, as well as the return on investment (ROI) rate per country. This analysis demonstrates that, despite initial costs, the adoption of this technology is economically viable and profitable in the medium to long term, especially when considering the associated environmental and social benefits. The results of this research have significant implications for climate change mitigation, as biogas production reduces methane emissions, a potent greenhouse gas, and biofertilizers promote more sustainable agricultural practices. Furthermore, the study contributes to food security by enhancing agricultural productivity and reducing dependence on external inputs. In conclusion, this work not only provides a robust tool for planning and decision-making in the agricultural and energy sectors of LATAM but also promotes the transition toward a circular economy and sustainable agriculture, aligning with the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs). The implementation of these technologies represents an opportunity to drive rural development, reduce poverty, and ensure a more sustainable future for the region.

Keywords– Circular economy, bioenergy, biogas, biofertilizer, green hydrogen, decentralized generation.

Evaluación Termoeconómica y Modelado del Potencial de Producción de Abonos Orgánicos a partir de Estiércol de Animales de Granja en América Latina: Hacia una Agricultura Sostenible y Circular.

Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.^{1*}, Luis Felipe ORTIZ DONGO Ing.², Richard SOLÓRZANO PhD.², Carlos ARRIETA GONZALES PhD.³, Mario LUNA DELRISCO PhD.³, Edgar COAQUIRA TORRES MsC.¹, Jhuliana M. ROJAS RIMBALDI Ing.⁴.

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, *jgomezmo@utp.edu.pe.

² Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Lima, Perú.

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Colombia.

⁴ DSE Ingeniería SAC DECHINI.

Resumen- Este documento presenta el modelo matemático termoeconómico para la cuantificación del potencial de bioenergía que se podría generar para LATAM de acuerdo al concepto de economía circular; se presenta el modelo de cálculo para estimar los biodigestores requeridos de acuerdo a un escenario de recolección parcial del estiércol de animales de granja; se detalla el cálculo del estimado de producción de bioabonos y biogás; También se presentan tres tipos de biodigestores que se han desarrollado en la investigación y las características del bioabono que produce con resultados de campo validados por el Ministerio de Agricultura de Perú. Además, en el análisis termo-económico se incluyen las inversiones requeridas, así como la tasa del retorno de la inversión por país. Esta investigación busca fomentar la agricultura orgánica al producir bioabonos de alta calidad con el propósito a largo plazo de mitigar el cambio climático y garantizar la seguridad alimentaria.

Palabras clave—Economía circular, bioenergía, biogás, bioabono, hidrógeno verde, generación descentraliza.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de agroquímicos como fertilizantes ha revolucionado la agricultura moderna, permitiendo aumentos significativos en la producción de alimentos. Sin embargo, su aplicación excesiva y descontrolada ha generado impactos ambientales negativos específicamente sobre la salud del suelo. Los fertilizantes químicos, compuestos básicamente por nitrógeno, fósforo y potasio, son fundamentales para el crecimiento de las plantas; pero el sobreuso de estos conlleva acumulación de nutrientes en el suelo, resultando en problemas como la eutrofización de cuerpos de agua cercanos, donde el exceso de nutrientes promueve el crecimiento desmedido de algas; el fenómeno reduce los niveles de oxígeno en el agua, afectando negativamente a la vida acuática y alterando los ecosistemas acuáticos [1]. Además, el uso prolongado de fertilizantes químicos puede degradar la estructura del suelo, disminuyendo su capacidad para retener agua y nutrientes; haciendo el suelo más susceptible a la erosión y la pérdida de fertilidad a largo plazo [2]. La dependencia excesiva de fertilizantes químicos reduce la biodiversidad microbiana del suelo, afectando negativamente los procesos ecológicos esenciales como la descomposición de materia orgánica y el ciclo de nutrientes [3].

El crecimiento de la industria de agroquímicos, especialmente los fertilizantes, han transformado la agricultura,

permitiendo incrementos en la productividad industrial. La adopción de fertilizantes químicos ha permitido a los agricultores aumentar los rendimientos y mejorar la satisfacción en la demanda de alimentos [4]. Pero este crecimiento también ha tenido un impacto complejo en la economía de los campesinos. Por un lado, los fertilizantes aumentaron el rendimiento por hectárea, con mayores ingresos y mejor calidad de vida en muchas regiones. En países en desarrollo el uso de fertilizantes ha sido fundamental para reducir la pobreza rural y mejorar la seguridad alimentaria [5]. Por otro lado, con el pasar del tiempo, la dependencia de fertilizantes químicos impone una carga económica significativa sobre los pequeños agricultores. El costo de los fertilizantes puede ser exorbitante para los agricultores, y su uso continuado puede llevar a la degradación del suelo, obligando a los agricultores a utilizar cantidades cada vez mayores de fertilizantes para mantener los rendimientos afectando su economía [6]. También, las variaciones en los precios de los fertilizantes afectan la estabilidad económica de los agricultores, haciéndolos vulnerables a las dinámicas del mercado [7].

Entre las décadas de 1940 y 1960, la revolución verde impulsó el desarrollo agrícola con implementación mundial, con el objetivo de aumentar la producción de alimentos y combatir el hambre en países en desarrollo. Esta revolución fue caracterizada por la adopción de nuevas estrategias: Variedades de alto rendimiento; uso intensivo de agroquímicos; riego y mecanización; y prácticas de cultivo mejoradas. La revolución verde tuvo un impacto en la seguridad alimentaria global, principalmente en Asia y América Latina, donde los rendimientos agrícolas aumentaron. También resultó en problemas ambientales y sociales, como la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y el aumento de las desigualdades socioeconómicas entre pequeños agricultores y grandes productores agrícolas [4].

Aunque los fertilizantes químicos han sido esenciales para aumentar la productividad, es necesario adoptar prácticas sostenibles y diversificadas para mitigar los impactos económicos y ambientales a largo plazo; así como la rotación de cultivos, el uso de biofertilizantes orgánicos y el monitoreo continuo de la salud del suelo. Estas prácticas pueden ayudar a mitigar los efectos negativos de los fertilizantes químicos. Por todo lo anterior esta investigación plantea el siguiente problema específico: ¿Es posible hacer una planificación

territorial bioenergética en LATAM basada en modelos de economía circular de biomasa?

Para responder parcialmente esta pregunta, esta investigación formula tres artículos proponiendo analizar dos escenarios para la economía circular y el diseño eficiente de motores para combustibles renovables y alternativos; el primer escenario urbano, usando la materia orgánica domiciliar para generación descentralizada de energía eléctrica usando combustibles renovables como el biogás e hidrogeno; el segundo escenario rural, usando los residuos del estiércol de los animales de granja para la producción de bioabonos para fomentar la agricultura orgánica y aumentar la producción de alimentos;

El enfoque de esta investigación es cuantitativo con un alcance descriptivo, que busca cuantificar el potencial de la bioenergía en LATAM, usando un modelo de economía circular (EC) [8] que se viene desarrollando como método y procedimiento de investigación; como técnica la investigación está basada en la formulación y datos experimentales disponibles, y usando información recolectada con inteligencia artificial (IA); como herramientas para crear una base de datos de la disponibilidad bioenergética para LATAM, se usará el modelo de EC y los datos poblacionales de animales de granja obtenidos usando ChatGPT; lo anterior, aplicado a dos escenarios, el primero urbano con materia orgánica domiciliar y el segundo rural usando estiércol de animales de granja; para lo cual se desarrollarán tres artículos por separado para obtener el análisis termo-económico de los escenarios analizados y el diseño eficiente de motores para combustibles renovables y alternativos. El objetivo de la investigación es presentar una propuesta de planificación territorial bioenergética para LATAM basada en un modelo de EC para los sectores urbano y rural.

II. ESTADO DEL ARTE DE LA EC, BIODIGESTORES DESARROLLADOS, METODOLOGÍA Y MODELOS USADOS

A. Estado del Arte sobre la Economía Circular

Se seleccionaron algunos artículos para presentar la información más importante desarrollada en los últimos años relacionada con el avance de la EC y de las biorrefinerías usando biomasa (BUB).

Awasthi et al. [9] analizaron el potencial de las BUB para producir biocombustibles y biofertilizantes; encontrando que aún se requiere desarrollar más investigaciones basadas en tecnologías de biorrefinación más efectivas, considerando técnicas más profundas para el desarrollo de la generación de bioenergía. Concluyen que existe una demanda de innovación en tecnología para el diseño de biorrefinerías, y que se deberían introducir nuevos modelos novedosos para desarrollar la EC en general y específicamente para la biomasa.

Petković et al. [10] afirmaron que la EC es un marco conceptual en desarrollo para fomentar la sostenibilidad a largo plazo, e impulsar la reducción del desperdicio de materiales y energía; además, indican que las tareas críticas para la EC son reutilizar, restaurar, remanufacturar y reciclar. Concluyen que

la EC debe reducir el uso de insumos naturales, residuos, contaminación y huella de carbono.

Según [11] definieron la EC según dos principios: maximizar el servicio proporcionado por los materiales asociados a los productos y minimizar la pérdida de servicio con el tiempo. Describieron el término “bioeconomía circular” como la composición de iniciativas de bioeconomía con énfasis político en la circularidad. La EC es una visión de una sociedad sostenible, que exige una mayor responsabilidad en la producción y recuperación del valor material de la biomasa. Las BUB utilizan biomasa para fabricar bioproductos y bioenergía, pero la responsabilidad debe reconocerse y alinearse con las políticas públicas para una EC.

Según [12] presentaron un escenario para implementar diferentes estrategias en el marco conceptual de la EC para la gestión de residuos sólidos municipales y residuos industriales. La investigación presenta los resultados de una planta de tratamiento de residuos; esta planta procesa 50.000 toneladas de biomasa al año y produce 4.275.000 m³ de biogás y 5.000 toneladas de compost. Con el biogás se produce calor y bioenergía en dos motores de encendido por chispa de 626 kW, con una generación de 7.500 MWh/año de electricidad, que venden a la red eléctrica; también presentan una recuperación calorífica de 1.700 MW/año utilizado para calentar los digestores mediante intercambiadores de calor.

Según [13] definieron la EC azul, describiéndola en un marco conceptual, el reciclaje y la reutilización son la vía para diseñar y desarrollar productos, utilizando materiales basados en residuos, con un alcance de recuperación financiera y de recursos a través de una gestión sostenible. La investigación concluye que la biorrefinación es una de las estrategias críticas de la EC azul, para cerrar los ciclos de las materias primas de biomasa, minerales, agua y carbono.

Según [14] clasificaron un marco conceptual para categorizar algunos indicadores basados en estrategias de EC; los resultados muestran que la mayoría de los indicadores se centran en la preservación de los materiales reciclados.

Según [15] analizaron la diversidad entre los conceptos de EC, economía verde y bioeconomía. Los resultados se extraen de una revisión bibliométrica de casi dos mil artículos científicos publicados a lo largo de treinta años y de un análisis conceptual realizado en la investigación.

Según [16] realizaron en su investigación una descripción sobre el uso de los sistemas de residuos sólidos y la conversión de estos en energía en el contexto de la EC en países seleccionados. Dando un valor calorífico medio de los residuos orgánicos como fuente de energía. La conversión de residuos en energía se ha asociado a la incineración, pero el concepto es más amplio y abarca diversos procesos de tratamientos para transformar los residuos en bioenergía; la investigación concluye que la EC mantiene parte del valor de los productos, materiales y recursos en el mercado por más tiempo.

La EC representa un nuevo paradigma hacia una gestión más sostenible y eficiente de los recursos orgánicos.

B. Tipos de biodigestores desarrollados en la investigación

En esta investigación se vienen desarrollando una serie de biodigestores los cuales tienen una característica diferencial con respecto a los biodigestores convencionales, su operación es por flujo ascendente por cambio de densidad y separado por etapas, para lo cual el proceso de hidrólisis se da en la parte inferior del biodigestor, luego a medida que la biomasa se degrada, disminuye su densidad y va subiendo; continuando con los procesos de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Este tipo de biodigestores tiene la ventaja de que los microorganismos responsables de la biodigestión anaeróbica se pueden cultivar sin escapar en el biol, porque el sustrato va ascendiendo sin evacuarlos; entonces es posible madurar el crecimiento microbiano y multiplicarlo con el tiempo, con el propósito de entrenar los microorganismos de acuerdo con la necesidad y disponibilidad de materia orgánica.

El primer biodigestor desarrollado usaba tanques IBC de 1,000 litros, reciclados de la industria química como estrategia de la EC, ver Figura 1, de manera sencilla se adecuó un tubo de 4 pulgadas en PVC tipo sifón, para la entrada que baja hasta el fondo del tanque; en la parte superior se ubicó un tubo de PVC de media pulgada para la salida del biogás; en la pared lateral al 80% de altura, se ubicó un tubo de PVC de 3 pulgadas para la salida del biol, que luego se filtra para extraer el bioabono. La forma de alimentación vertical garantiza el sellado hidráulico para evitar el ingreso de aire al tanque y la presión hidrostática para la dinámica del sustrato desde la entrada como materia orgánica hasta la salida como biol. El biodigestor de la imagen se probó en el Instituto Nacional de Innovación Agraria del Perú (INIA), usando 4 tanques en paralelo y probando diferentes tipos de sustratos: Materia orgánica de cosechas de granja, estiércol de res, cerdo y cuy. Los biodigestores se han madurado en su operación por un año.

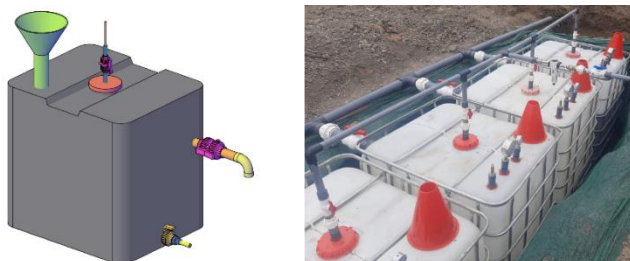


Fig. 1 Biodigestores anaeróbicos usando tanques IBC de 1,000 litros

El segundo biodigestor, ver Figura 2, se optimizó ubicando unas barreras físicas internas para separarlo en tres etapas, el biodigestor se construyó de 100 litros. Como técnica de optimización, la primera etapa de hidrólisis se hace externa, en valdes plásticos de 20 litros cerrados por ocho días; luego la alimentación se hace con el sustrato que va hasta el volumen del fondo donde hace la acidogénesis, a medida que se va descomponiendo el sustrato y con la alimentación, el sustrato con menor densidad asciende al volumen intermedio para la acetogénesis, y luego asciende al volumen superior para la metanogénesis. De esta manera, la operación final del proceso completo se hace en cuatro etapas por separado, controlando el

tiempo de retención en cada volumen con la cantidad de alimentación que se hace. Teniendo presente que, en el tope del biodigestor, por encima de la tercera válvula de salida del biol, se deja espacio para el almacenamiento de 20 litros de biogás; entonces, la alimentación se hace para 80 litros por mes como tiempo medio para la biodigestión completa, 20 litros por semana aproximadamente, de los cuales 5 litros son materia orgánica domiciliar triturada finamente y 15 litros son agua, con pH neutro y sin cloro; la alimentación se puede dividir en 3 días por semana. Este tipo de biodigestor se viene probando para uso doméstico con residuos orgánicos de alimentos, pero también se está probado con estiércol de cuy y de res para hacer cálculos comparativos con respecto a la literatura.

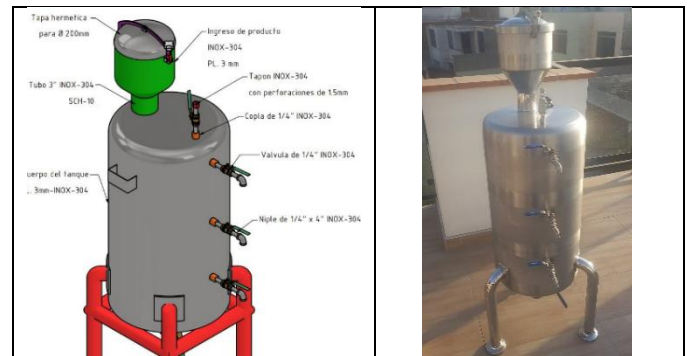


Fig. 2 Biodigestor anaeróbico en acero inoxidable de 3 etapas de 100 litros

El tercer biodigestor, que sigue el mismo principio de operación de los dos primeros con flujo ascendente por cambio de densidad, fue construido en concreto con varillas de hierro como estructura, para una mayor economía con respecto al acero inoxidable y mayor durabilidad con respecto a los biodigestores plásticos. Para la construcción se hizo una excavación del terreno, en escala para garantizar la forma presentada en la Figura 3, que permite una dinámica del sustrato por presión hidrostática, además el biodigestor también está diseñado para que los microorganismos puedan ser cultivados y no sean evacuados a través de la salida en el biol, con el propósito de poder fortalecerlos y multiplicarlos para una mejor operación del biodigestor en cuanto a la calidad del bioabono y la cantidad de biogás.

En el primer volumen abierto de la izquierda se prepara la mezcla de la materia orgánica y el agua, para formar el sustrato, con la apertura de una compuerta el sustrato ingresa al primer tanque para el proceso de hidrólisis por diez días para el ciclo inicial de biodigestión. Luego, se abre una válvula entre los dos primeros tanques para que parte del sustrato vaya al segundo tanque para el proceso de acidogénesis y acetogénesis por diez días más; luego se alimenta de nuevo el tanque uno. Pasados los diez se pasa sustrato del biodigestor uno al dos con la hidrólisis terminada, y sustrato del biodigestor dos al tres con la acetogénesis completa; luego, el sustrato en el biodigestor tres empezará con la metanogénesis por diez días. Luego de 30 días de haber empezado la alimentación inicial, se empieza la alimentación continua, con una alimentación semanal de 2,000

litros de sustrato dividido en tres días, de los cuales entre 500-1000 litros serán materia orgánica y el resto agua, dependiendo de la materia orgánica usada. Para el estiércol de res la relación volumétrica con agua es 1:1, para el estiércol de cerdo es 1:2, para estiércol de cuy y para la materia orgánica domiciliaria es 1:3.

Como estrategia para mejorar la producción de biogás y mejorar la calidad del bioabono, se hace codigestión, usando tanto estiércol de animales de granja como residuos domiciliarios orgánicos o residuos de frutos maduros de granja. El control del volumen se debe hacer individual para garantizar que cada alimentación entre con la cantidad recomendada de agua y material orgánico. Para el tiempo de retención, se debe garantizar que la materia orgánica que pasa por la entrada estará pasando por la salida en 30 días, una vez la operación sea continua y el biodigestor allá logrado la madurez. Cuando la temperatura atmosférica sea en promedio menor a 23°C durante todo el día, se recomienda que el tiempo de retención sea mayor, llegando a 40 días en casos de temperaturas promedio cercanas a 15°C, o más tiempo si la temperatura es más baja.

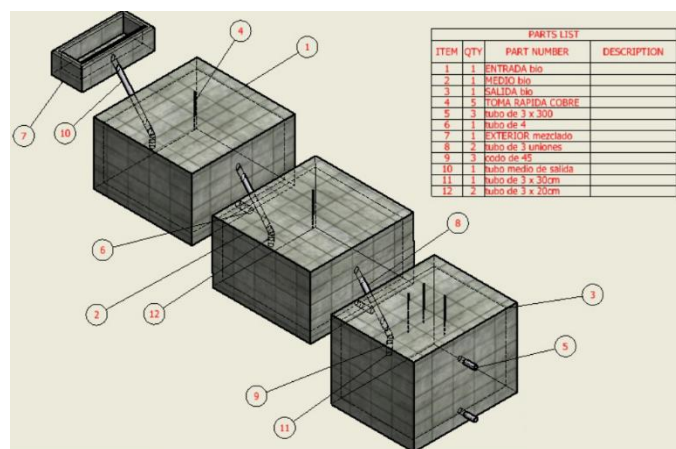


Fig. 3 Biodigestor anaeróbico en concreto de 3 etapas de 10,000 litros

C. Metodología y modelos usados en el cálculo del potencial bioenergético para el componente rural

Para presentar el modelo propuesto para el componente rural bioenergético para los países de LATAM, se analizará paso a paso el cálculo del potencial estimado para el caso de Colombia. Lo primero es recordar que el estimado se hace con base en la formulación científica disponible y en las bases de datos accedidas usando la IA a través de chatGPT [17].

El modelo termo-económico aplicado en este estudio se fundamenta en principios energéticos y económicos, adaptados a sistemas de biodigestión a pequeña escala en América Latina. Las ecuaciones principales —incluyendo el balance de energía, las funciones de distribución de costos y las estimaciones de eficiencia— se encuentran desarrolladas en su totalidad en la Referencia [8].

Lo primero es consultar el censo poblacional de animales en la IA, que para el caso de Colombia es el siguiente: 24 millones de reses, 4 millones de cerdos, 43.5 millones gallinas

ponedoras, 728 millones de pollos de engorde por año [17], ver tabla 1 para LATAM. Segundo, definición de la muestra: debido a que el cambio debe ser progresivo, se propone inicialmente un escenario usando el 10% de las reses totales, debido a que es posible que la mayoría de los animales vivan en campo abierto y sea un poco complicado la recolección del estiércol; 40% de los cerdos totales, debido a que estos normalmente son criados bajo techo y es más fácil recolectar el estiércol. 50% de las gallinas ponedoras y 50% de los pollos de engorde, teniendo presente que la mayoría de estos animales son criados por empresas dedicadas al negocio, y que podrían ser más fácilmente regulables. Luego, de acuerdo con la IA [17] en promedio, el estiércol que produce una res adulta es 15 kg/día, un cerdo produce 4 kg/día, las gallinas ponedoras 0.1 kg/día y los pollos de engorde producen 2 kg durante su vida, que en promedio son 7 semanas, es corta debido a las prácticas de producción intensiva en la industria avícola. Luego, para calcular la cantidad de estiércol disponible para Colombia:

$$24 M \text{ reses} * 10\% * 15 \text{ kg/día/res} * 1 \text{ ton}/1,000 \text{ kg} = 36.0 \text{ k ton/día}$$

$$4 M \text{ cerdos} * 40\% * 4 \text{ kg/día/cerdo} * 1 \text{ ton}/1,000 \text{ kg} = 6.4 \text{ k ton/día}$$

$$43.5 M \text{ gallinas} * 50\% * 0.1 \text{ kg/día/gallina} * 1 \text{ ton}/1,000 \text{ kg} = 2.2 \text{ k ton/día}$$

$$728 M \text{ pollos/año} * 50\% * 2 \text{ kg/pollo} * 1 \text{ ton}/1,000 \text{ kg} * 1 \text{ año}/365 \text{ días} = 2.0 \text{ k ton/día. Para un total de 46.6 kton/día.}$$

TABLA. I
POBLACIÓN DE HABITANTES, RESES, CERDOS, GALLINAS Y POLLOS EN LATAM

Países LATAM	Designación	Habitantes (Millones)	# Reses (Millones)	# Cerdos (Millones)	# Gallinas (Millones)	# Pollos (Millones)
Brasil	BRA	213.0	214.0	42.0	225.0	6,700.0
Argentina	ARG	45.0	53.5	6.0	47.5	800.0
México	MEX	130.0	34.0	18.0	165.0	1,200.0
Colombia	COL	52.0	24.0	4.0	43.5	728.0
Paraguay	PAR	7.0	14.0	0.3	9.0	140.0
Uruguay	URU	4.5	12.0	2.0	3.0	75.0
Venezuela	VEN	28.0	12.0	1.0	12.5	426.3
Perú	PER	34.0	5.8	3.0	32.5	280.0
Bolivia	BOL	12.0	9.0	0.3	5.0	150.0
Chile	CHI	19.0	3.0	3.0	39.0	647.0
Guatemala	GUA	18.0	6.0	1.2	6.0	250.0
Nicaragua	NIC	6.0	6.0	0.70	8.0	150.0
Ecuador	ECU	18.0	2.0	1.5	22.0	550.0
Honduras	HON	10.0	2.5	0.9	5.0	165.0
Costa Rica	CRI	5.0	1.5	1.6	2.5	130.0
El Salvador	SAL	6.0	1.5	0.8	4.0	65.0
Rep. Domi.	RDO	11.0	1.2	0.3	10.0	165.0
Panamá	PAN	4.5	1.1	0.4	7.0	130.0
Cuba	CUB	11.0	1.5	0.20	5.0	0.5
Jamaica	JAM	4.5	0.04	0.20	0.75	37.5
Puerto Rico	PRI	4.5	0.01	0.03	0.19	12.5

Para la estimación del volumen de sustrato a procesar se utiliza la relación de estiércol con agua sugerida por [18,19] y que se ha verificado en esta investigación con estiércol de res, cerdo y cuy. Siendo así: estiércol res / agua (1/1), estiércol de cerdo / agua (1/3), estiércol de gallinas / agua (1/3) y estiércol de pollos / agua (1/3). Además, usando una densidad promedio del estiércol: reses 0.9 ton/m³, cerdos 0.85 ton/m³ y aves de corral 0.55 ton/m³ [17], se calcula el sustrato a procesar:

$$36.0 \text{ k ton/día} / 0.9 \text{ ton/m}^3 * 2 \text{ (estiércol res + agua)} = 80.0 \text{ k m}^3/\text{día}$$

$6.4 \text{ k ton/día} / 0.85 \text{ ton/m}^3 * 4 \text{ (estiércol cerdo + agua)} = 30.1 \text{ k m}^3/\text{día}$
 $2.2 \text{ k ton/día} / 0.55 \text{ ton/m}^3 * 4 \text{ (estiércol gallina + agua)} = 15.8 \text{ k m}^3/\text{día}$
 $2.0 \text{ k ton/día} / 0.55 \text{ ton/m}^3 * 4 \text{ (estiércol pollos + agua)} = 14.5 \text{ k m}^3/\text{día}$

Resultando un volumen total a procesar de $140.4 \text{ k m}^3/\text{día}$, o $4.21 \text{ M m}^3/\text{mes}$ de sustrato. Esta investigación propone la construcción de biodigestores de 10 m^3 por etapas, como el presentado en la figura 3, construidos con concreto, hierro, mayólicas cerámicas internamente, tubería y válvulas de polietileno de alta densidad (HDPE). Este tipo de biodigestores son fáciles de construir y replicar a lo largo de cada país. Teniendo presente lo anterior, para el caso de Colombia se requerirían construir 421 mil biodigestores de 10 m^3 , cada uno estimado en 4,000 USD, para una inversión total requerida de 1,600 M USD. Teniendo presente la forma de construcción y los materiales requeridos, esta inversión dinamizaría la economía de cada país, dando trabajo a constructores y empresas productoras locales. Con paredes de 15 cm, los biodigestores enchapados internamente con mayólicas cerámicas, protegidas con fragua, y enterrados bajo tierra, se estiman tener una vida útil superior a 15 años.

Para la estimación de bioenergía se toma la siguiente consideración, suponiendo que 1 kg de estiércol fresco tiene un contenido de sólidos volátiles del 80% (0.8 kg de sólidos volátiles por kg de estiércol). Luego, los datos de conversión promedio entre masa de estiércol y volumen de biogás [19,20]: 0.028 m^3 de biogás por kg de estiércol de res; 0.025 m^3 de biogás por kg de estiércol de cerdo y 0.021 m^3 de biogás por kg de estiércol de aves de corral. Para el cálculo del biogás en Colombia:

$$36.0 \text{ k ton/día} * 0.028 \text{ m}^3/\text{kg} * 1,000 \text{ kg/ton} = 1.0 \text{ M m}^3/\text{día}$$

$$6.4 \text{ k ton/día} * 0.025 \text{ m}^3/\text{kg} * 1,000 \text{ kg/ton} = 160 \text{ k m}^3/\text{día}$$

$$(2.2+2) \text{ k ton/día} * 0.021 \text{ m}^3/\text{kg} * 1,000 \text{ kg/ton} = 88 \text{ k m}^3/\text{día}$$

Para una producción total de $1.25 \text{ M m}^3/\text{día}$ o $458 \text{ M m}^3/\text{año}$ de biogás. Usando un poder calorífico inferior de 6.25 kWh/m^3 [19,20], se multiplica este valor por la producción de biogás para estimar la energía térmica disponible: 7.85 GWh/día o $2,864 \text{ GWh/año}$. Ahora, tomando un valor promedio de 10 kWh/m^3 para el gas natural (GN), se estima el potencial de sustitución con la energía disponible:

$$7,847,250 \text{ kWh/día} / 10 \text{ kWh/m}^3 = 784,725 \text{ m}^3/\text{día de GN}$$

Equivalente a 286 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, luego consultando la IA para el precio medio del GN por país se estima el potencial de ahorro [17]. Para el caso de Colombia el precio promedio es 0.3 USD/m^3 , lo que implicaría un ahorro 235 kUSD/día o 85 MUSD/año .

Para el bioabono se estima que del total de sustrato de $140.4 \text{ k m}^3/\text{día}$ para el caso de Colombia, el 50% se puede recuperar como bioabono y el otro 50% como inóculo para alimentación de los mismos biodigestores, en vez de agua, para mejorar la calidad del bioabono y del biogás [17], como estrategia usada en esta investigación; resultando en $2.1 \text{ M m}^3/\text{mes}$ de biol; tomando un precio comercial muy conservador de 35 USD/m^3 [17], se estima un ahorro de 74 M USD/mes o 885 M USD/año . El ahorro total por bioabonos más el equivalente por ahorro de gas natural por la producción de biogás sería 970 MUSD/año . Ahora para calcular la tasa de

retorno de la inversión (TIR) se toma la inversión total requerida para los biodigestores junto con los ahorros totales por la producción de bioabonos y biogás, para el caso de Colombia la TIR es 33.2% calculada a 3 años; sin tener en cuenta la valorización de la huella de carbono por el gas natural que se evita de consumir, ni la huella de carbono evitada por los agroquímicos que se dejan de usar, tampoco se tiene en cuenta la valoración de la mejora en la dinámica económica por la agricultura orgánica; esto como limitación del alcance de la investigación, ya que una valorización más detallada requiere una investigación adicional.

Para verificar la calidad de los bioabonos producidos, en la tabla 2 se resumen las propiedades que deben cumplir los abonos orgánicos según la Organización Mundial de la Salud.

TABLA. II
 CARACTERÍSTICAS DEL ABONO ORGÁNICO SEGÚN LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

Propiedades	Rango Normal
Contenido de humedad (%)	30 - 50
Materia inerte (%)	30 - 70
Contenido orgánico (%)	10 - 30
pH	6 - 9
Tamaño máximo de las partículas (mm)	2 - 10
Materia orgánica (%)	25 a 50
Carbono (%)	8 a 50
Nitrógeno (%)	0,4 a 3,5
Fósforo (%)	0,3 a 3,5
Potasio (%)	0,5 a 1,8

III. RESULTADOS

A. Características de los bioles producidos en el proyecto

Los resultados de los análisis de laboratorio de los bioles de los estiércoles utilizados para el biodigestor de la Figura 1, permiten confirmar que el estiércol cumple con los parámetros establecidos para ser considerados como bioabonos orgánicos, según el Organismo Mundial de la Salud, de acuerdo con la Tabla 2, donde se presentan los resultados de dos ensayos.

La relación C/N indica el impacto que el carbono proporciona en energía a los microorganismos y el nitrógeno es necesario para la síntesis de nuevas moléculas [21], para un bioabono obtenido del proceso en un biodigestor. En los productos obtenidos del proceso (biol, biosol y biogas), a partir de las reacciones químicas en un proceso anaerobico, se puede decir, que la relación C/N no es alterada en el proceso. También hay que considerar los puntos de investigaciones anteriores donde indican que el rango óptimo de C/N esta entre 25 – 35 para la biomasa [22].

TABLA III. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE DOS BIOLES PRODUCIDOS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE CUY USANDO AGUA CON PH ALCALINO Y PH NEUTRO

ENSAYO	UNIDAD	1/05/2023	1/05/2023
		Estiercol cuy	Estiercol cuy
PH	UNID. H	8.3	5.9
Conductividad electrica	dS/m	2.5	5.8
Cantidad de Humedad	%	3.3	4.55
Cantidad organico	%	21.03	22.58
N	%	1.52	1.42
P2O5	%	0.74	0.76
K2O	%	1.47	1.7
CaO	%	1.01	1.18
MgO	%	2.55	2.02
C/N	%	13.84	15.9

B. Resultado de pruebas de los bioles en cultivos

Se realizó un ensayo para determinar la de toxicidad y capacidad estimulante de los bioles procedentes de tres tipos de estiércoles: de cuy, de vacuno y de porcino. Se determinó el índice de germinación (IG). Se ensayaron diez concentraciones crecientes desde cero hasta cien por ciento del biol de cada especie. A medida que la concentración subía también lo hacía el pH y la conductividad eléctrica. El biol de vacuno tuvo un pH de 8.26 y conductividad eléctrica de 10.86 dS/m. El biol de porcino tuvo un pH 7.36 y conductividad eléctrica de 16.8 dS/m. El biol de estiércol de cuy 8.28 y conductividad eléctrica de 10.49 dS/m. Resalta la conductividad eléctrica elevada del biol procedente del estiércol de porcino. El IG es producto de multiplicar el porcentaje de germinación (número de semillas germinadas divididas por el total de semillas puestas a germinar) con el porcentaje de longitud de raíz (la longitud de raíz por concentración de biol dividida por la longitud del tratamiento control sin biol).

De acuerdo con la Figura 4, el índice muestra que el estiércol de vacuno tiene un efecto estimulante superior al control cuando se emplea diluido hasta el 10%, en cantidades superiores afecta el crecimiento normal del cultivo, que para estos fines se empleó cebada de la variedad Centenario. El caso del biol de porcino es diferente, aquí el efecto estimulante sobre el crecimiento de la cebada fue en la concentración del 20%, cuando se emplea en concentraciones inferiores no hay un efecto claro y en concentraciones superiores se reduce notablemente el crecimiento de la planta a diferencia de los bioles de vacuno y cuy, siendo el más tóxico. Al ejecutar el análisis de varianza se encontró diferencias entre bioles, siendo estadísticamente significativos los bioles de vacuno y cuy, ver figura 5. Las diferencias entre concentraciones se pueden analizar a mayor profundidad, pero no tiene objeto desde que se vuelven tóxicas para el cultivo. Estos resultados son importantes porque a menudo se emplean dosis altas en los cultivos que pueden ser perjudiciales o dosis muy bajas que no generan un efecto real sobre la planta lo que permitirá un mejor

aprovechamiento de los residuos a este nivel como biofertilizantes.

C. Potencial bioenergético para LATAM

El orden de presentación de los resultados se hace en orden descendente, de acuerdo con los países que más potencial de producción de biogás tienen, de acuerdo con la figura 6. Primero, muy por encima de los demás países esta Brasil. Luego, para analizar los resultados, los demás países se agrupan así grupo 1 (G1): Argentina, México, Colombia, Paraguay y Uruguay; grupo 2 (G2): Venezuela, Perú, Bolivia, Chile y Guatemala; grupo 3 (G3): Nicaragua, Ecuador, Honduras, Costa Rica y El Salvador; y grupo 4 (G4): Republica Dominicana, Panamá, Cuba, Jamaica y Puerto Rico.

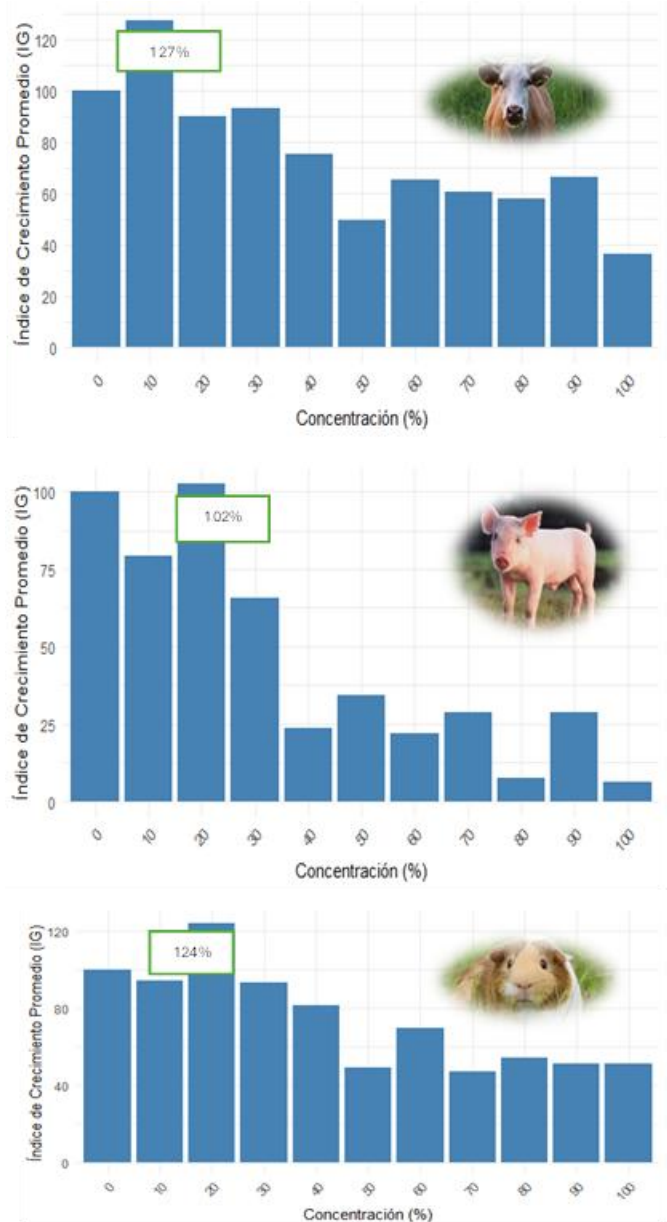


Fig. 4 Resultados pruebas experimentales en los bioles producidos

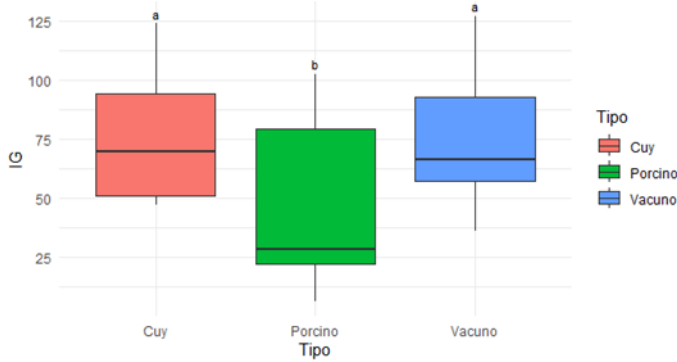


Fig. 5 Análisis comparativo entre los tipos de bioles analizados

En la Tabla 4 se presenta el potencial de recolección de estiércol de animales de granja de acuerdo con los porcentajes propuestos en la metodología. De acuerdo a los cálculos Brasil tendría el mayor potencial, 400 mil ton/día, siendo el 77% por estiércol de res; el G1 tendría el potencial entre 22-95 mil ton/día, con un promedio de 79% para estiércol de res; el G2 tendría entre 12-21 mil ton/día, con un promedio de 68% para estiércol de res; el G3 tendría entre 3.9-10.9 mil ton/día, con un promedio del 57% para estiércol de res; y el G4 tendría entre 100-3,200 ton/día, con un promedio de 43% para estiércol de res. Los países con menos porcentaje de participación con reses son CRI, ECU, PRI y JAM. A pesar de que solo se estima utilizar el 10% del estiércol de las reses por país, debido a la producción individual, el estiércol de res es el que mayor valor en toneladas aporta.

TABLA. IV POTENCIAL DE RECOLECCIÓN DE ESTIÉRCOL EN GRANJAS PARA LATAM

Países LATAM	Estiércol reses (ton/día)	Estiércol cerdos (ton/día)	Estiércol gallinas (ton/día)	Estiércol pollos (ton/día)
BRA	321,000	67,200	11,250	18,356
ARG	80,250	9,600	2,375	2,192
MEX	51,000	28,800	8,250	3,288
COL	36,000	6,400	2,175	1,995
PAR	21,000	480	450	384
URU	18,000	3,200	150	205
VEN	18,000	1,600	625	1,168
PER	8,700	4,800	1,625	767
BOL	13,500	480	250	411
CHI	4,500	4,800	1,950	1,773
GUA	9,000	1,920	300	685
NIC	9,000	1,120	400	411
ECU	3,000	2,400	1,100	1,507
HON	3,750	1,440	250	452
CRI	2,250	2,560	125	356
SAL	2,250	1,280	200	178
RDO	1,800	480	500	452
PAN	1,650	640	350	356
CUB	2,250	320	250	2
JAM	53	320	38	103
PRI	15	48	9	34

La Tabla 5 presenta la información sobre el volumen de sustratos a procesar en los países de LATAM para calcular el número de biodigestores requeridos. El estiércol de res requiere menos agua que los demás para la biodigestión. Brasil debería procesar 1.25 M m³/día de sustrato; el G1 debería procesar entre 58-257 mil m³/día de sustrato; el G2 debería procesar entre 36-60 mil m³/día de sustrato; el G3 debería procesar entre 13-32 mil m³/día de sustrato; y el G4 debería procesar entre 0.5-13 mil m³/día de sustrato. Esta información puede ser usada para verificar los cálculos por países del potencial bioenergético.

La Tabla 6 presenta el potencial bioenergético de producción de biogás en los países de LATAM. Brasil tendría el potencial de producir más de 11 millones de m³/día usando 3.7 millones de biodigestores de 10 m³, de acuerdo con la propuesta presentada en esta investigación, del cual el 80% provendría del estiércol de res. El G1 tendría el potencial de producir entre 0.6-2.6 millones de m³/día de biogás, usando entre 173-770 mil biodigestores, siendo en promedio el 81% proveniente del estiércol de res. El G2 tendría el potencial de producir entre 321-582 mil m³/día de biogás, usando entre 109-182 mil biodigestores, siendo en promedio el 71% proveniente del estiércol de res. El G3 tendría el potencial de producir entre 103-297 mil m³/día de biogás, usando entre 41-110 mil biodigestores, siendo en promedio el 60% proveniente del estiércol de res. El G4 tendría el potencial de producir entre 2.5-82 mil m³/día de biogás, usando entre 1.7-40 mil biodigestores, siendo en promedio el 46% proveniente del estiércol de res.

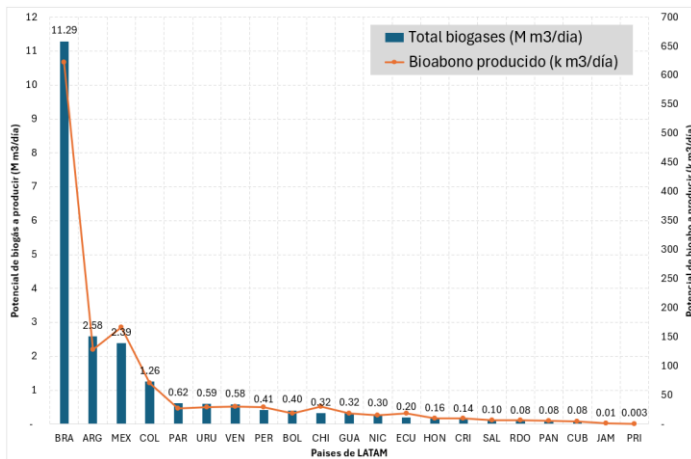


Fig. 6 Potencial de generación de biogás y bioabonos para LATAM.

TABLA. V VOLUMEN DE SUSTRATOS A PROCESAR EN LOS PAÍSES DE LATAM.

Países LATAM	Volumen de sustrato res (m3/día)	Volumen de sustrato cerdo	Volumen de sustrato aves de corral	Total sustratos (m3/día)
BRA	713,333	316,235	215,318	1,244,886
ARG	178,333	45,176	33,213	256,723
MEX	113,333	135,529	83,910	332,773
COL	80,000	30,118	30,324	140,441
PAR	46,667	2,259	6,062	54,988
URU	40,000	15,059	2,585	57,644
VEN	40,000	7,529	13,040	60,570
PER	19,333	22,588	17,397	59,319
BOL	30,000	2,259	4,807	37,066
CHI	10,000	22,588	27,073	59,662
GUA	20,000	9,035	7,163	36,198
NIC	20,000	5,271	5,898	31,168
ECU	6,667	11,294	18,959	36,920
HON	8,333	6,776	5,106	20,216
CRI	5,000	12,047	3,499	20,546
SAL	5,000	6,024	2,750	13,773
RDO	4,000	2,259	6,924	13,183
PAN	3,667	3,012	5,136	11,814
CUB	5,000	1,506	1,829	8,335
JAM	117	1,506	1,020	2,642
PRI	33	226	317	576

Una primera conclusión indicaría que a pesar de solo presupuestar un 10% de recolección del estiércol de las reses por país, comparado con el 40% de cerdos y 50% de aves de corral, el promedio total de recolección de estiércol sería el 75% para el estiércol de reses, generando el 78% del biogás, de acuerdo con el potencial bioenergético analizado en el escenario propuesto.

TABLA. VI POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS PAÍSES DE LATAM.

Países LATAM	Biogás x res (m3/día)	Biogás x cerdos (m3/día)	Biogás x aves corral (m3/día)	Total biogás m3/día
BRA	8,988,000	1,680,000	621,729	11,289,729
ARG	2,247,000	240,000	95,902	2,582,902
MEX	1,428,000	720,000	242,291	2,390,291
COL	1,008,000	160,000	87,560	1,255,560
PAR	588,000	12,000	17,505	617,505
URU	504,000	80,000	7,465	591,465
VEN	504,000	40,000	37,654	581,654
PER	243,600	120,000	50,235	413,835
BOL	378,000	12,000	13,880	403,880
CHI	126,000	120,000	78,175	324,175
GUA	252,000	48,000	20,684	320,684
NIC	252,000	28,000	17,030	297,030
ECU	84,000	60,000	54,744	198,744
HON	105,000	36,000	14,743	155,743
CRI	63,000	64,000	10,104	137,104
SAL	63,000	32,000	7,940	102,940
RDO	50,400	12,000	19,993	82,393
PAN	46,200	16,000	14,829	77,029
CUB	63,000	8,000	5,282	76,282
JAM	1,470	8,000	2,945	12,415
PRI	420	1,200	916	2,536

La Tabla 7 presenta información de equivalencia de sustitución entre biogás y gas natural, basada en la energía térmica que se puede producir con biogás y la cantidad de gas natural que se requeriría para producir una energía semejante. Brasil tendría el potencial de producir 70 GWh/día de energía térmica con biogás, lo que sería equivalente a usar 7 millones m³/día de gas natural, con un precio promedio de 0.5 USD/m³, se tendría un ahorro diario potencial de 3.5 millones de dólares. El G1 tiene un potencial de ahorro entre 260-480 mil USD por día; el G2 tiene un potencial de ahorro entre 36-120 mil USD por día; teniendo presente que el valor más bajo es el caso de Venezuela, donde el gas natural es muy económico. El G3 tiene un potencial de ahorro entre 45-111 mil USD por día. El G4 tiene un potencial de ahorro entre 0.35-30 mil USD por día, el último puesto es el de Puerto Rico, donde ambos, producción de biogás y el precio del gas natural son bajos.

La Tabla 8 presenta información sobre la cantidad de biodigestores de 10 m³ requeridos por país para implementar el modelo de economía circular propuesto, las inversiones requeridas y la producción de biogás y bioabono por año. Brasil requeriría 3.7 millones de biodigestores estimados en 15 mil millones de dólares para producir 4,100 millones de m³/año de biogás y 224 millones de toneladas de bioabono. El G1 requiere entre 173-770 mil biodigestores, para producir entre 216-943 millones de m³/año de biogás, y entre 10-46 millones de m³ de bioles, y con una inversión requerida entre 692-3081 millones de dólares. El G2 requiere entre 109-182 mil biodigestores, para producir entre 117-212 millones de m³/año de biogás y entre 6.5-11 millones de m³ de bioles, y con una inversión requerida entre 434-727 millones de dólares. El G3 requiere entre 41-111 mil biodigestores, para producir entre 38-108 millones de m³/año de biogás y entre 2.5-5.6 millones de m³ de bioles, y con una inversión requerida entre 165-374 millones de dólares. El G4 requiere entre 1.7-40 mil biodigestores, para producir entre 1-30 millones de m³/año de biogás y entre 0.1-2.4 millones de m³ de bioles, y con una inversión requerida entre 7-158 millones de dólares.

TABLA VII. EQUIVALENTE DE SUSTITUCIÓN ENTRE BIOGÁS Y GAS NATURAL DE LATAM

Países LATAM	Energía térmica (kWh/día)	Equivalente en gas natural (m3/día)	Precio mínimo del gas natural	Equivalente del gas natural (USD/día)
BRA	70,560,809	7,056,081	0.50	3,528,040
ARG	16,143,140	1,614,314	0.30	484,294
MEX	14,939,319	1,493,932	0.50	746,966
COL	7,847,250	784,725	0.30	235,417
PAR	3,859,405	385,940	0.60	231,564
URU	3,696,657	369,666	0.70	258,766
VEN	3,635,338	363,534	0.10	36,353
PER	2,586,466	258,647	0.40	103,459
BOL	2,524,251	252,425	0.30	75,728
CHI	2,026,092	202,609	0.60	121,565
GUA	2,004,272	200,427	0.60	120,256
NIC	1,856,438	185,644	0.60	111,386
ECU	1,242,149	124,215	0.40	49,686
HON	973,395	97,339	0.70	68,138
CRI	856,903	85,690	0.60	51,414
SAL	643,373	64,337	0.70	45,036
RDO	514,957	51,496	0.60	30,897
PAN	481,434	48,143	0.60	28,886
CUB	476,760	47,676	0.10	4,768
JAM	77,594	7,759	0.90	6,983
PRI	15,850	1,585	0.22	353

Teniendo presente la población completa por país, para implementar el modelo propuesto se requerirían en promedio general 46 USD/persona para la inversión inicial, lo que no es una inversión muy alta para un estado que adopte la economía circular como política de ley con el propósito de beneficiar en especial a la población campesina y a las agroindustrias; lo que generaría una media de 0.7 m³/persona/año de bioabono orgánico, y 13 m³/persona/año de biogás; siendo el biol el producto más importante, suficiente para fomentar la agricultura orgánica y cambiar el rumbo de una nación buscando la seguridad alimentaria; por otro lado, para la producción masiva de biogás se requieren juntar otros insumos como la materia orgánica domiciliar y aumentar la recolección de diferentes tipos de estiércoles de animales, residuos de jardines y parques, para lograr una sustitución representativa con respecto a los derivados del petróleo.

La Tabla 9 presenta el análisis económico de la propuesta de investigación para la implementación del modelo de economía circular para el componente rural; se presentan los ahorros por bioabono por año, ahorro por reducción en el uso de gas natural por el uso del biogás, ahorro total, retorno de la inversión y la TIR a 3 años. Brasil tendría un estimado de ahorro de 7,843 MUSD por bioabonos y 1,270 MUSD por la producción de biogás. El G1 tendría ahorros entre 363-1617 MSUD por el bioabono y 93-174 MUSD por el biogás. El G2 tendría ahorros entre 228-382 MSUD por el bioabono y 13-43 MUSD por el biogás. El G3 tendría ahorros entre 87-196 MSUD por el bioabono y 16-40 MUSD por el biogás. El G4 tendría ahorros entre 3.6-83 MSUD por el bioabono y 0.13-11.1 MUSD por el biogás. Para todos los países de LATAM, en promedio el 88% de los ahorros son por la producción del abono orgánico; el retorno de la inversión sería menor a dos años y

con una tasa de retorno de la inversión promedio del 35.8% por la implementación del modelo de economía.

TABLA. VIII
CANTIDAD E INVERSIÓN EN BIODIGESTORES Y PRODUCCIÓN ANUAL

Países LATAM	Cantidad de biodigestores de 10 m3	Inversiones en biodigestores (MUSD)	Total biogas (M m3/año)	Bioabono producido (M m3/año)
BRA	3,734,659	14,939	4,121	224
ARG	770,168	3,081	943	46
MEX	998,319	3,993	872	60
COL	421,324	1,685	458	25
PAR	164,963	660	225	10
URU	172,932	692	216	10
VEN	181,709	727	212	11
PER	177,956	712	151	11
BOL	111,197	445	147	6.7
CHI	178,985	716	118	11
GUA	108,595	434	117	6.5
NIC	93,505	374	108	5.6
ECU	110,759	443	72.5	6.6
HON	60,647	243	56.8	3.6
CRI	61,639	247	50.0	3.7
SAL	41,320	165	37.6	2.5
RDO	39,549	158	30.1	2.4
PAN	35,443	142	28.1	2.1
CUB	25,005	100	27.8	1.5
JAM	7,927	32	4.5	0.48
PRI	1,729	6.9	0.9	0.10

TABLA. IX
ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PROPUESTA DE LA INVESTIGACIÓN

Países LATAM	Ahorro bioabono/año (MUSD)	Ahorro por gas natural/año (MUSD)	Ahorro total/año (USD)	Retorno de la inversión (años)	TIR a 3 años
BRA	7,843	1,270	9,113	1.6	37.6%
ARG	1,617	174	1,792	1.7	34.0%
MEX	2,096	269	2,365	1.7	35.3%
COL	885	84.8	970	1.7	33.2%
PAR	346	83.4	430	1.5	42.7%
URU	363	93.2	456	1.5	43.8%
VEN	382	13.1	395	1.8	29.0%
PER	374	37.2	411	1.7	33.4%
BOL	234	27.3	261	1.7	34.6%
CHI	376	43.8	420	1.7	34.6%
GUA	228	43.3	271	1.6	39.4%
NIC	196	40.1	236	1.6	40.4%
ECU	233	17.9	250	1.8	31.9%
HON	127	24.5	152	1.6	39.6%
CRI	129	18.5	148	1.7	36.3%
SAL	86.8	16.2	103	1.6	39.2%
RDO	83.1	11.1	94.2	1.7	35.7%
PAN	74.4	10.4	84.8	1.7	36.1%
CUB	52.5	1.72	54.2	1.8	28.9%
JAM	16.6	2.51	19.2	1.7	36.9%
PRI	3.63	0.13	3.76	1.8	29.1%

D. Discusión final

La agricultura ha tenido varias revoluciones importantes a lo largo de la historia: Primero, la revolución neolítica (10,000 a.C.), marcó el comienzo de la agricultura, con transición de sociedades cazadoras-recolectoras a sociedades agrícolas; caracterizada por la domesticación de plantas y animales. Luego, la revolución agrícola medieval entre los siglos VIII-XIII con innovaciones en técnicas agrícolas en Europa; se caracterizó por la introducción de herramientas como el arado de vertedera y la rotación de cultivos de tres campos. Posteriormente, la revolución agrícola británica entre los siglos

XVII-XIX con mejoras significativas en la productividad agrícola en Gran Bretaña; se caracterizó por las innovaciones como el arado de hierro, la rotación de cultivos de cuatro campos y la cría selectiva de animales. Luego, la revolución verde a mitad del siglo XX, con la introducción de variedades de cultivos de alto rendimiento, fertilizantes químicos, pesticidas y riego avanzado; resultando en un aumento significativo en la producción de alimentos, especialmente en países en desarrollo. Finalmente, la revolución agrícola digital del siglo XXI, con el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, drones, sensores y “big data”; se caracteriza por ser agricultura de precisión con mejoras en la eficiencia y sostenibilidad de la producción agrícola [23]. El presente modelo de economía circular busca apoyar específicamente el ámbito de la sostenibilidad, al usar los residuos orgánicos, para mejorar la economía con un impacto social y ambiental. Cada una de las revoluciones de la agricultura ha transformado la forma en que se practica la agricultura y ha tenido un impacto complejo en la sociedad y la economía.

IV. CONCLUSIONES

Esta investigación busca desarrollar con información científica, técnica y comercial dos escenarios para un modelo de economía circular de la biomasa; el primer componente urbano, se discute en el primer artículo, usando residuos domiciliarios orgánicos para la producción de biogás, electricidad, hidrogeno verde y bioabonos; el segundo componente rural busca aprovechar el estiércol de los animales para la producción de bioabonos principalmente y biogás, con el propósito de fomentar la agricultura orgánica y buscar alcanzar la seguridad alimentaria ad-ortas de la quinta revolución de la agricultura.

Las principales conclusiones de esta investigación son:

- A pesar de solo presupuestar un 10% de recolección del estiércol de las reses por país, comparado con el 40% de cerdos y 50% de aves de corral, la recolección de estiércol sería el 75% para el estiércol de reses, generando el 78% del biogás, de acuerdo con el potencial bioenergético analizado.

- Teniendo presente la población completa por país, para implementar el modelo propuesto se requerirían en promedio 46 USD/persona para la inversión inicial; lo que generaría una media de 0.7 m³/persona/año de bioabono orgánico, y 13 m³/persona/año de biogás; siendo el biol el producto más importante para fomentar la agricultura orgánica.

- Para todos los países de LATAM, en promedio el 88% de los ahorros son por la producción del abono orgánico; el retorno de la inversión sería menor a dos años y con una TIR promedio del 35.8% por la implementación del modelo de economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Alhamdulillah, agradecimientos a la Universidad Tecnológica del Perú por el financiamiento del Proyecto P-2024-LIM-06 “Estudio comparativo teórico y experimental del efecto de la adición de hidrógeno al GNV y GLP para generación de electricidad, y de la producción de bioabonos generados en un biodigestor de escala domiciliaria.”.

REFERENCIAS

- [1] Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196.
- [2] Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- [3] Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694-1697.
- [4] Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the impact of the Green Revolution, 1960 to 2000. *Science*, 300(5620), 758-762.
- [5] Pingali, P. L. (2012). Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302-12308.
- [6] Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- [7] Heisey, P. W., & Norton, G. W. (2007). Fertilizers and other farm chemicals. In R. Evenson & P. Pingali (Eds.), *Handbook of Agricultural Economics* (Vol. 3, pp. 2741-2777).
- [8] J.P. Gómez Montoya et al. A thermo-economic analysis of a circular economy model for biomass in South America producing biofertilizers and biogas from municipal solid waste. *Renewable Energy* 225 (2024) pp. 120254.
- [9] M. Awasthi et al, “Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 127, July 2020, pp. 109876.
- [10] B. Petković et al, “Neuro-fuzzy evaluation of circular economy based on waste generation, recycling, renewable energy, biomass, and soil pollution”, *Rhizosphere*, Vol. 9, September 2021, pp. 100418.
- [11] J. Sherwood, “The significance of biomass in a circular economy”, *Bioresource Technology*, Vol. 300, March 2020, pp. 122755.
- [12] V. Abada et al, “Promoting circular economy in the surroundings of an organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion treatment plant: Biogas production impact and economic factors”, *Bioresource Technology*, vol. 283, 2019, pp. 10-17.
- [13] V. Naddeo and M. Taherzadeh, “Biomass valorization and bioenergy in the blue circular economy”, *Biomass and Bioenergy* vol.149, 2021, pp.106069.
- [14] Moraga et al, *Circular economy indicators: What do they measure?*, *Resources, Conservation, and Recycling journal*, Vol. 146, July 2019, pp. 452-461.
- [15] D'Amato et al, *Green, circular, bio-economy: A comparative analysis of sustainability avenues*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 168, 2017, Pages 716-734
- [16] Malinauskaite et al, *Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe*, *Energy*, vol. 141, 2017, pp. 2013-2044.
- [17] ChatGPT. <https://chatgpt.com/>
- [18] A. Khalid et al. Review: The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31 (2011) pp. 1737-1744.
- [19] Manual de biogas. Ministerio de Energía. Gobierno de Chile. ISBN 978-95-306892-0. Proyecto CHI/00/G32, “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. 2011.
- [20] Hartmann, H., Ahring, B. K., & Angelidaki, I. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure. *Water Research*, (2006) 40(19), 3693-3702.
- [21] Gordillo, F., y Chávez, E. Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros. (2011) Obtenido de: <https://www.dspace.espol.edu.ec/>
- [22] Jhorar, B., Phogat, y Malik, E. Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest.* (1991).
- [23] Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). "Big Data in Smart Farming – A review". *Agricultural Systems*, 153, 69-80.