

# Proposal for Bioenergy Territorial Planning in LATAM; Part 1/2: Circular Economy Model, Urban Component Using Household Biomass.

Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.<sup>1</sup><sup>\*</sup>, Luis Felipe ORTIZ DONGO Ing.<sup>2</sup>, Fernando SILVA MsC<sup>1</sup>, Jhon

Jhonathan PEÑALVA PhD.<sup>1</sup>, Carlos ARRIETA GONZALES PhD.<sup>3</sup> and Mario LUNA-DELRISCO PhD.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Technological University of Peru, Lima, Peru \*[jgomezmo@utp.edu.pe](mailto:jgomezmo@utp.edu.pe).

<sup>2</sup> Directorate of Agricultural Technology Development, National Institute of Agricultural Innovation (INIA), Lima, Peru.

<sup>3</sup> Faculty of Engineering, University of Medellin, Medellin, Colombia.

*Abstract— The research is divided into two articles, presenting a bioenergy territorial planning proposal for LATAM. The first part focuses on an urban circular economy (CE) model using household organic municipal waste based on source separation. The second part is related to a proposal for designing internal combustion engines for renewable and alternative gaseous fuels. This paper quantifies the bioenergy potential that could be generated for LATAM by using national population censuses—based on scientific formulation and AI-powered databases—to estimate the amount of biofertilizers, biogas, and green hydrogen that can be obtained according to the proposed CE model. The sustainability of the CE model is analyzed through a thermo-economic assessment, social impact, and environmental impact, with carbon footprint measurement using a standardized calculator. Additional considerations, risk analysis, and challenges for the model's implementation are also presented to promote its widespread adoption.*

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

# Propuesta de planificación territorial bioenergética en LATAM; Parte 1/2: Modelo de Economía Circular, componente urbano usando biomasa domiciliaria.

Juan Pablo GÓMEZ MONTOYA PhD.<sup>1</sup>, Luis Felipe ORTIZ DONGO Ing.<sup>2</sup>, Fernando SILVA MsC<sup>1</sup>, Jhon

Jhonathan PEÑALVA PhD.<sup>1</sup>, Carlos ARRIETA GONZALES PhD.<sup>3</sup> and Mario LUNA-DELRISCO PhD.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, \*jgomezmo@utp.edu.pe.

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

<sup>3</sup> Facultad de Ingenierías, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.

**Resumen-** *La investigación se divide en dos artículos, presentando una propuesta de planificación territorial bioenergética para LATAM; la primera parte es sobre un modelo de economía circular (EC) urbano usando materia orgánica municipal domiciliaria basado en la separación en fuente de los residuos; la segunda parte está relacionado con una propuesta de diseño de motores de combustión interna para combustibles gaseosos renovables y alternativos. Este documento presenta la cuantificación del potencial de bioenergía que se podría generar para LATAM; usando el censo poblacional por país -basado en la formulación científica y en bases de datos usando IA- para estimar la cantidad de bioabonos, biogás e hidrógeno verde que se puede obtener de acuerdo con el modelo de EC propuesto. La sostenibilidad del modelo de EC presenta el análisis termo-económico, del impacto social y el impacto ambiental con la medida de la huella de carbono usando un calculador estandarizado. También se presentan consideraciones adicionales, análisis de riesgos y desafíos para la implementación del modelo de EC para fomentar su masificación.*

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

## I. INTRODUCCIÓN

Es sabido que el capitalismo, sistema económico predominante, para su éxito requiere un crecimiento continuo de la economía; el cual se impulsa por el aumento en la producción y consumo de bienes y servicios para incrementar las ganancias. Esta tendencia permanente de expansión económica demanda un constante y creciente uso de energía y recursos naturales. Para el éxito del capitalismo la producción de energía es esencial, ya que soporta el uso de maquinaria industrial y del transporte, además sustenta el consumo masivo de productos. La energía especialmente proveniente de combustibles derivados del petróleo ha sido el soporte del desarrollo industrial. Pero, la explotación masiva de estos recursos no renovables resulta en la degradación ambiental y contribuye al cambio climático [1]. La demanda de recursos naturales está en firme aumento por la expansión económica capitalista; la extracción y uso intensivo de recursos naturales a menudo resulta en la contaminación del medio ambiente, destrucción de ecosistemas y pérdida de biodiversidad. También, el control de los recursos limitados, puede generar

conflictos geopolíticos y desigualdad social. Lo anterior plantea desafíos para la sostenibilidad ambiental y la equidad social en el futuro, exigiendo una reevaluación de cómo se proyecta la explotación de los recursos [2].

Los países de LATAM en general tienen baja productividad en sus procesos debido a la falta de generación de valor agregado a los productos, al reducido aporte de los sectores industriales y servicios basados en innovación y conocimiento; Asimismo, la actividad productiva es primaria en uso de tecnologías avanzadas debido a que continúan con los procesos convencionales, y la economía tiene una alta dependencia de los sectores minero y energético. Además, la mayoría de los países de LATAM han sufrido por la crisis global de pérdida de biodiversidad por el cambio climático. La importancia de la sostenibilidad en el desarrollo productivo es un tema reciente para la población y la industria en general. LATAM tiene el potencial de ser líder mundial en producción de alimentos y energías renovables, pero la baja integración económica entre sus países con alto potencial de crecimiento, en consumo, transferencia tecnológica y conocimiento, apenas se presupuesta a mediano plazo sin ser un eje estratégico para cada país y la región [3].

De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (IEA), en el 2021 la matriz energética mundial, que es la combinación de diferentes fuentes de energía primaria, estaba constituida por: Combustibles fósiles en un 81%, (petróleo, gas natural y carbón); Energía nuclear con un 5%; Energía hidroeléctrica con un 7%; Energías renovables con un 7%, (energía solar, energía eólica y bioenergía). La matriz energética no es estática, evoluciona con el tiempo debido a las políticas implementadas, condiciones medioambientales y a las variaciones en el costo de las tecnologías de generación [4]. Para mejorar la matriz energética local y regional se debe reducir el uso de derivados del petróleo y carbón, aumentar el consumo de GNV y GLP, y aumentar la producción y uso de combustibles renovables como el hidrógeno y el biogás. El hidrógeno se puede producir a partir de diferentes fuentes y procesos, como destilación de petróleo, combustión de gas natural y electrolisis del agua. Mientras que el biogás se produce a través de cuatro procesos que constituyen la digestión anaeróbica. En LATAM solo 10 países cuentan con estrategias publicadas o en preparación para la producción de hidrogeno

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LEIRD).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LEIRD).

**DO NOT REMOVE**

como interés nacional, dando cuenta del interés naciente de los gobiernos para el desarrollo local [5].

A lo largo de toda LATAM la biomasa como el estiércol de animales o los residuos domiciliarios y agroindustriales no se usan normalmente con un fin productivo, en pocos casos se hace compostaje o producción de biocombustibles; regularmente, el estiércol se descompone libremente contaminando la atmosfera y los residuos orgánicos normalmente terminan en los rellenos sanitarios, por no haber programas de separación en fuente de los residuos sólidos municipales, salvo en pequeños pueblos. No hay producción local masificada de bioabonos y la dependencia de los agroquímicos continua, contaminando el campo y produciendo alimentos poco saludables; también, dependiendo del precio internacional, en épocas de guerra la urea sufre incrementos significativos amenazando la seguridad alimentaria de las naciones [6]. 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 verde; y 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 EC [7] que se viene desarrollando como método y procedimiento de investigación, modelo que se mejora en el presente trabajo, ampliando la población de análisis e incluyendo el hidrogeno verde; 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 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 sobre 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 urbano y rural.

## II. MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS USADO PARA ESTIMAR LA BIOENERGÍA.

### A. Definición de la Economía Circular

La EC es una nueva tendencia en la gestión de los recursos naturales para la organización eficiente de los procesos productivos tratando de eliminar los conceptos de desperdicio o basura, siguiendo un uso integral de los recursos, y reutilizando los materiales de desecho con un ámbito de recuperación financiera y material. La EC tiene siete estrategias principales: economía colaborativa, reciclaje, remanufactura, reparación circular, diseño ecológico, economía funcional (servicios en vez de productos) y biorrefinerías que utilizan biomasa (BUB). Las BUB permiten un amplio uso de residuos orgánicos, lo que es un enfoque prometedor para convertir eficazmente la biomasa en diversos bioproductos y bioenergía [8]. Los bioproductos y biocombustibles se caracterizan por tener un impacto ambiental reducido en comparación con las refinerías de petróleo convencionales. Las BUB producen biofertilizantes, biogás, gas de síntesis, bioetanol, biodiesel, biopolímeros, bioplásticos, bioaceite y biocarbón [9].

Las BUB puede clasificarse como refinado de biomasa termoquímico y bioquímico; el refinado termoquímico incluye pirólisis y gasificación; el refinado bioquímico utiliza microorganismos o enzimas para descomponer la biomasa en numerosos compuestos, incluida la hidrólisis, la fermentación y la biodigestión anaeróbica [10]. Lo esencial del proceso de biorrefinación es la conversión eficiente de diversas materias primas de biomasa en combustibles, materiales u otros compuestos químicos a través de actividad microbiana o enzimática y una serie de vías bioquímicas. Las máquinas moleculares y las fábricas de células son las tecnologías clave para respaldar el funcionamiento de BUB. La tecnología de digestión anaeróbica ofrece el alcance más significativo en cuanto a recuperación de nutrientes y uso de digestato como bioabonos. Ofrece una recuperación integrada de nutrientes y energía a partir de biomasa orgánica o flujos de residuos [11].

La biomasa se considera una alternativa en evolución para sustituir los combustibles derivados del petróleo, de la cual se produce bioenergía y bioproductos. La EC para la biomasa se basa en el ciclo mejorado del carbono: primero, la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera por parte de plantas y árboles mediante la fotosíntesis; segundo, reciclar y reutilizar materia orgánica para producir por biodigestión anaeróbica, bioabonos y biogás; tercero, utilizar el biogás para obtener bioenergía; luego, utilizar los bioabonos para nutrir el crecimiento de árboles y plantas aumentando la absorción de CO<sub>2</sub> y la producción de oxígeno; finalmente, reducir el uso de combustibles derivados del petróleo para aumentar la descarbonización de la atmósfera. Las BUB permiten la reutilización de nitrógeno, fósforo y potasio al tiempo que limita la contaminación y reduce el impacto ambiental [11,12].

Las BUB son vitales para la producción industrial integrada y el desarrollo económico; estas podrían abordar las demandas de energía, la gestión de residuos y el crecimiento económico para convertir los residuos en forma cíclica, restaurativa y reproductiva para apoyar el desarrollo sostenible [13]. La generación de electricidad a partir de combustibles

renovables será protagonista para la transición energética global, para reducir la dependencia de los combustibles derivados del petróleo, mitigando el efecto invernadero responsable del cambio climático. Las centrales hidroeléctricas, los paneles solares y los molinos de viento son tecnologías casi completamente desarrolladas, pero las tecnologías disponibles para la utilización de la biomasa, como biogás e hidrógeno verde, siguen sin un desarrollo significativo ni uso masivo [5,6,10,11]. Aunque, al considerar el ciclo de vida de los productos, las energías renovables no son completamente limpias; la fabricación de paneles solares y molinos de viento implican emisiones nocivas para el medio ambiente al extraer materias primas como acero, silicio, cobre y aluminio entre otros; mientras que la combustión de biogás es casi neutra en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> debido al carácter renovable del combustible pero produce algo de monóxido de carbono durante el proceso de combustión [14].

A pesar de las ventajas que deberían aportar los modelos de EC, existen algunos puntos de vista críticos; los críticos afirman que la EC tiene límites difusos y fundamentos teóricos poco claros y que su implementación enfrenta dificultades estructurales, de planificación territorial y poca voluntad política local y regional. La EC se basa en una agenda ideológica dominada por explicaciones técnicas y económicas que aportan contribuciones inciertas a la sostenibilidad [15]. La EC se describe como una combinación de actividades de reducción, reutilización y reciclaje, pero no se destaca que la EC requiera un cambio sistémico y de planificación territorial; las definiciones muestran pocas conexiones entre el concepto de EC con desarrollo sostenible. El objetivo principal de la EC es el éxito económico con calidad ambiental, pero apenas se menciona su impacto en la equidad social para las generaciones futuras [16].

### B. Modelo de Economía Circular desarrollado

El modelo de EC, que ya fue publicado por Gómez et al [7] y que se mejora en esta investigación, comienza con la separación en origen de la biomasa o materia orgánica municipal (MOM), reciclada de los residuos sólidos municipales; la MOM resulta de hogares, restaurantes, supermercados, universidades y diferentes lugares de trabajo. Según la Figura 1, la MOM debe recolectarse independientemente de la materia inorgánica municipal (MIM), que normalmente termina en los rellenos sanitarios convencionales. La MIM por un lado, puede reciclarse, reutilizarse, restaurarse y remanufacturarse con el propósito de reducir el uso de recursos naturales. Para lograr la separación en fuente, el sistema de recolección de residuos municipales debe replantearse, teniendo al menos dos días específicos para que el carro recolector pase por la MOM. La MOM debe ir a plantas especializadas, como se propone con el uso de las BUB. En las BUB, la MOM primero se debe triturar y mezclar con agua, controlando el PH del agua en valores neutros y sin presencia de cloro; también se puede usar el agua de salida del biodigestor, separada del bioabono, que tiene el inoculo con los

microorganismos para acelerar el proceso de biodigestión. La mezcla debe pasar a los biodigestores anaeróbicos donde los microorganismos descomponen el material biodegradable en ausencia de oxígeno. La biodigestión anaeróbica implica una serie de procesos que descomponen la materia orgánica en azúcares y aminoácidos mediante hidrólisis. Luego, las bacterias acidogénicas y acetogénicas convierten estos productos en ácido acético, que se convierte posteriormente en metano mediante el proceso final de metanogénesis. Este proceso genera diferentes gases, como CO<sub>2</sub> y metano, mezcla conocida como biogás.

El biogás se puede comprimir y utilizar en motores de encendido provocado con alta relación de compresión y usando pistones modificados para aumentar la intensidad de la turbulencia y la velocidad de la llama turbulenta, reduciendo la duración de la combustión y las pérdidas de calor, haciendo que el proceso de combustión tenga eficiencia térmica similar al gas natural o al combustible diésel [17,18]. Los gases de escape de la combustión del biogás se pueden usar para cogeneración, recuperando parte de la energía térmica en intercambiadores de calor. También, el biogás se puede utilizar directamente en hornos especializados para generación de calor, por ejemplo, hornos de combustión sin llama con alta eficiencia térmica.

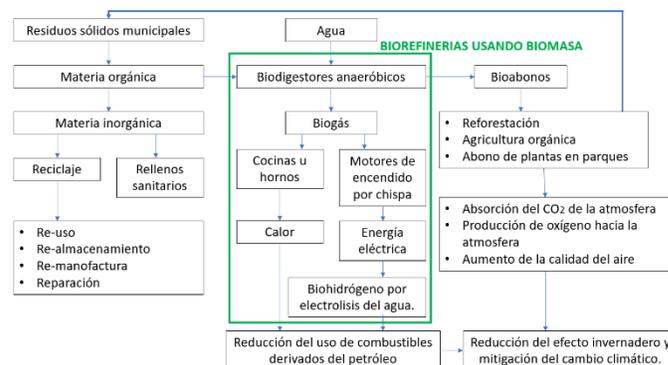


Fig. 1 Modelo de Economía Circular de la Biomasa mejorado.

Los bioabonos producidos en las BUB podrían usarse en agricultura orgánica para nutrir el crecimiento de plantas y árboles frutales, o en reforestación para acelerar el crecimiento de árboles nativos en bosques, en ambos casos, acelerando la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y aumentando la producción de oxígeno. Una mayor producción de alimentos incrementará el proceso de EC al generar más MOM, cerrando el ciclo.

Finalmente, con la energía eléctrica generada en el motor optimizado para biogás, se hará la producción de hidrógeno verde mediante un electrolizador avanzado PEM-AEM del tipo stack, a través de la electrolisis del agua que produce hidrogeno y oxígeno; debido a que la energía eléctrica es renovable, que proviene del biogás, el hidrógeno verde también puede ser clasificado como hidrógeno verde; esta propuesta busca mejorar el modelo de EC antes publicado [7], además el análisis actual se hace para LATAM, mientras que antes se había hecho solo para los países de Sur America.

El potencial aumento de la producción de alimentos y el posterior uso de la MOM retroalimentará el ciclo para producir

más bioabonos, biogás e hidrógeno verde. Esta es la lógica propuesta en el modelo de EC con las BUB, que busca como propósito final la soberanía alimentaria para todos los países a través de la agricultura orgánica, así como la **limpieza** de la atmósfera mediante la descarbonización. La hipótesis de esta investigación es que el aumento en la siembra de alimentos orgánicos utilizando bioabonos, reemplazando los agroquímicos, junto con el uso de biogás e hidrógeno verde para reducir el uso de combustibles derivados del petróleo, acelerará el ciclo del carbono, mejorará la calidad de los suelos, descarbonizará la atmósfera y mejorará la calidad del aire, reduciendo el efecto invernadero y mitigando el cambio climático con la masificación de la implementación de la tecnología propuesta.

### C. Detalle las biorrefinerías propuestas

La figura 2 presenta el diseño conceptual de una BUB la cual tiene una capacidad promedio de procesar cuatro mil toneladas por mes de MOM por BUB, para atender a medio millón de habitantes. Se requieren de cinco biodigestores anaeróbicos de 5,400 m<sup>3</sup> (4,400 m<sup>3</sup> útiles para el substrato y 1,000 m<sup>3</sup> para biogás) con una capacidad de procesar 800 toneladas por mes de MOM cada uno, una propuesta comercial de este tipo de biodigestores está disponible en [19]. Antes de los biodigestores se requieren plantas de trituración de la MOM y mezclado con el agua que no requieren un diseño específico.

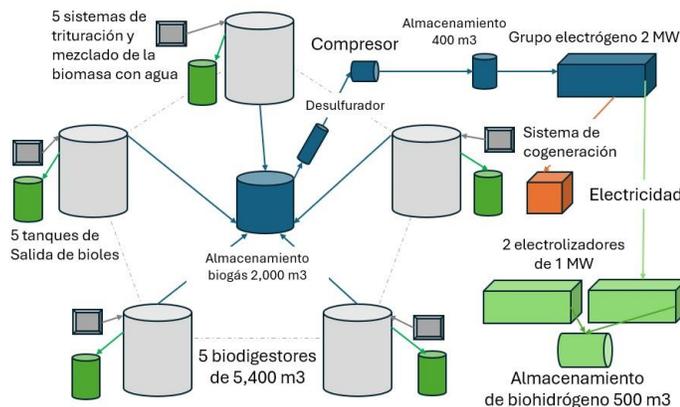


Fig. 2 Detalle de elementos que componen una biorrefinería usando biomasa.

A la salida de cada biodigestor se requiere un tanque de almacenamiento del biol con una capacidad de procesar 150 m<sup>3</sup>/día, de donde se filtrará el bioabono (75 m<sup>3</sup>/día/biodigestor), los otros 75 m<sup>3</sup>/día se usan como inóculo para la alimentación del substrato para mejorar la eficiencia del proceso de biodigestión. A la salida de los biodigestores habrá un tanque central de 2,000 m<sup>3</sup> para el almacenamiento de biogás a baja presión, luego el biogás va a un desulfurador y a un compresor para subir la presión entre 6-10 bar; luego, el biogás va a otro tanque de almacenamiento de 400 m<sup>3</sup> para alimentación del motor. Se requiere un grupo electrógeno (motor-generador) para biogás con una capacidad máxima de producir 2.3 MW de energía eléctrica, comercialmente una buena alternativa se encuentra en [20]. Luego, con la energía eléctrica generada se

alimentarán dos electrolizadores de 1 MW para la generación de hidrógeno verde, también habiendo una selección comercial en [21]. Finalmente, los gases de la combustión se pueden utilizar para cogeneración, usando intercambiadores de calor para recuperar el calor de los gases, estos gases calientes se pueden usar para mejorar la eficiencia de los biodigestores manteniendo la temperatura en la noche.

### D. Metodología para estimar el potencial de bioenergía.

La tabla 1 presenta los datos de población y muestra poblacional en LATAM [22], pero para presentar la metodología de cálculo se seleccionó como ejemplo el país de Colombia. La estimación poblacional de análisis se hace de acuerdo con la IA [22], Colombia actualmente tiene aproximadamente 52 millones de habitantes. La muestra que se usará para todos los países será del 40% de la población para estimar el potencial de bioenergía urbana, este porcentaje representa en promedio la mitad de la población urbana en LATAM [22]. Entonces la muestra poblacional en Colombia es de 20.8 millones de habitantes. Para la MOM se usa un estimado promedio de 8 kg/habitante/mes, el cual es multiplicado por la muestra poblacional y así se calcula el potencial de recolección materia orgánica, resultando en 166,400 toneladas/mes (5.55 millones kg/día) de MOM en Colombia.

TABLA I. POBLACIÓN Y MUESTRA POBLACIONAL EN LATAM.

Países	LATA	Desig.	Población	Muestra	Países	LATA	Desig.	Población	Muestra
Brasil	BRA		213	85.2	R. Dominicana	RDO		11.0	4.4
México	MEX		130	52.0	Honduras	HON		10.0	4.0
Colombia	COL		52	20.8	Paraguay	PAR		7.0	2.8
Argentina	ARG		45	18.0	El Salvador	SAL		6.0	2.4
Perú	PER		34	13.6	Nicaragua	NIC		6.0	2.4
Venezuela	VEN		28	11.2	Costa Rica	CRI		5.0	2.0
Chile	CHI		19	7.6	Panamá	PAN		4.0	1.8
Guatemala	GUA		18	7.2	Uruguay	URU		3.5	1.8
Ecuador	ECU		18	7.2	Puerto Rico	PRI		3.3	1.8
Bolivia	BOL		12	4.8	Jamaica	JAM		3.0	1.8
Cuba	CUB		11	4.4					

De acuerdo con la IA y a la literatura [22,23], se hizo una recopilación de datos ajustando los cálculos de la IA con las referencias más confiables, un buen dato promedio para la producción de biogás es 0.108 m<sup>3</sup>/kg de MOM, además en la próxima sección se presenta un modelo para calcular la cantidad de sólidos volátiles y biogás que se pueden producir a partir de 1 kg de residuos de alimentos. Luego, multiplicando el factor de m<sup>3</sup>/kg por los kg/día de MOM, se obtiene el estimado de biogás, que sería 599 mil m<sup>3</sup>/día. Usando un poder calorífico promedio de 6.25 kWh/m<sup>3</sup> [23] se estima la disponibilidad de energía térmica, igual a 3,744,000 kWh/día por la combustión del biogás. La eficiencia térmica máxima del grupo electrógeno es del 45% de acuerdo con el fabricante [20] para operación a plena carga, usando un 35% de eficiencia térmica para carga parcial, para conservar el motor, se estima la producción de electricidad en 1,310,400 kWh/día. Operando el motor 16 horas/día en promedio, se tiene una disponibilidad de potencia eléctrica de 81,900 kW; operando el grupo electrógeno al 87%

de la carga máxima, es decir a 2,000 kW, se estima la cantidad de 41 motores requeridos para la bioenergía eléctrica que se puede producir en Colombia.

Ahora, para calcular los biodigestores, usando una densidad media de 0.8 kg/m<sup>3</sup> para la MOM, se multiplica la densidad por las toneladas/mes de MOM, estimando el volumen de 208,000 m<sup>3</sup>/mes para MOM. Usando una mezcla de sustrato de 1m<sup>3</sup> de MOM por 3m<sup>3</sup> de agua [23], el volumen total del sustrato sería 832,000 m<sup>3</sup>/mes. Tomando un tiempo de residencia de un mes para el proceso de biodigestión anaeróbica y dividiendo el valor anterior por el volumen útil de los biodigestores que es 4,400 m<sup>3</sup>, serían 189 biodigestores, equivalentes a 5 biodigestores/BUB. La estimación de bioabonos es del 50% de la materia orgánica usada [23], siendo en este caso 83,200 ton/mes para Colombia. Con un precio conservador estimado del abono de 100 USD/ton [22], se estima un valor de 8.32 MUSD/mes para el bioabono que se puede producir de la MOM urbana.

La cantidad de electrolizadores es igual al número de grupos electrógenos por 2, por la relación de potencias, siendo requeridos 82 electrolizadores para Colombia. La producción al 90% de capacidad del electrolizador es de 180 m<sup>3</sup>/h [21], operando por 16 horas/día da como resultado 236,160 m<sup>3</sup>/día de hidrógeno. Con un precio promedio del hidrógeno verde de 2.5 USD/m<sup>3</sup> [22] se estima un valor de 17.7 MUSD/mes para el hidrógeno verde producido con energía renovable.

Las inversiones requeridas, puestas en planta y con impuestos, para una BUB serían: 849,000 USD para el grupo electrógeno, 780,000 USD por cada electrolizador, 400,000 USD para cada biodigestor, un estimado de 300,000 USD por el terreno para construir la BUB y 750,000 USD para los demás elementos de la BUB (sistemas de trituración y mezclado, compresores, tanques de almacenamiento de biogás y bioles, sistema de cogeneración) que no requieren una selección específica. Con un estimado total de 5,46 MUSD/BUB y 223.9 MUSD para las 41 BUB.

Los gastos de operación se estiman en un 10% del valor de la suma del bioabono y el hidrógeno siendo 2.6 MUSD/mes (63,500 USD/BUB/mes), para un ahorro neto total estimado de 23.3 MUSD/mes o 280 USD/año para todas las BUB. Para el cálculo de la tasa interna de retorno de la inversión (TIR), se toma la inversión total y se proyectan los ahorros, así 50% para el primer año, 60% para el segundo año y 80% para el tercer año, resultando con una TIR de 53.7% a tres años, lo que es un retorno de la inversión muy favorable para un proyecto energético de estas dimensiones, sin tener presente la valoración de la huella de carbono, ni el impacto social que puede generar la implementación de un proyecto con estas características de sostenibilidad y que puede cambiar el rumbo de un país hacia una soberanía alimentaria.

Adicionalmente, como instrumento de la investigación se hará uso del calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) [24] para estimar: Toneladas métricas equivalente de CO<sub>2</sub>/mes o barriles de petróleo, galones de diésel

o toneladas de carbón evitados de consumir. Este calculador es una herramienta en línea que convierte emisiones de GEI en términos más comprensibles. Permite a los usuarios transformar toneladas de dióxido de carbono y otros gases en equivalentes prácticos, como millas recorridas por un automóvil, consumo eléctrico de hogares, o número de vehículos retirados de circulación. Esto facilita la comunicación del impacto ambiental de proyectos y actividades, ayudando a visualizar la huella de carbono y los beneficios de reducir emisiones de manera más clara para el público.

Los indicadores de equivalencias energéticas estimados por el Calculador de Equivalencias de GEI de la EPA se basan en conversiones que facilitan la comprensión de las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de consumo de energía o ahorro. Estos indicadores son descripciones cuantificadas que reflejan el impacto de la energía en diferentes actividades cotidianas o industriales. Algunos de los indicadores más comunes incluyen:

- Millas recorridas por un vehículo promedio: Convierte las emisiones en la cantidad de millas que un automóvil típico recorrería al emitir una cantidad equivalente de CO<sub>2</sub>.
- Consumo de electricidad en hogares: Muestra cuánta electricidad usaría un hogar promedio durante un año, equivalente a las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas.
- Combustible fósil quemado: Expresa las emisiones en términos de barriles de petróleo o galones de gasolina consumidos.
- Vehículos retirados de circulación: Cuántos autos necesitarían ser eliminados para evitar el nivel de emisiones estimado.

Estos indicadores están diseñados para hacer más accesible y comprensible el impacto ambiental, facilitando la interpretación de emisiones en relación con el uso cotidiano de energía.

Como limitación del alcance de la investigación, no se consideró la valorización de la huella de carbono por la bioenergía, por el combustible 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.

#### *E. Método para estimar el biogás de la MOM.*

Para calcular la cantidad de sólidos volátiles, totales y biogás que se puede producir a partir de 1 kg de MOM, se utilizan valores típicos basados en la literatura científica [23, 25].

##### - Sólidos Totales (ST):

Los residuos de alimentos suelen tener un contenido de sólidos totales cercanos al 30%; lo que significa que en 1 kg de MOM, hay aproximadamente 0.3 kg de sólidos totales.

##### - Sólidos Volátiles (SV):

El 90% de los sólidos totales suelen ser sólidos volátiles; es decir, de los 0.3 kg el 90% igual a 0.27 kg son SV.

##### - Producción de Biogás:

Los residuos de alimentos típicamente producen entre 0.3 y 0.5 m<sup>3</sup> de biogás por kg de SV. Entonces, la producción de biogás a partir de 0.27 kg de SV: Mínimo: 0.27 kg \* 0.3 m<sup>3</sup>/kg = 0.081

m<sup>3</sup>; máximo: 0.27 kg \* 0.5 m<sup>3</sup>/kg = 0.135 m<sup>3</sup>. De ahí, que en esta investigación se use el promedio de 0.108 m<sup>3</sup>/kg de MOM para estimar la bioenergía.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Resultados del modelo de EC.

La figura 3 presenta el estimado de recolección de MOM y producción de biogás en LATAM de acuerdo con el modelo de EC presentado; en esta figura y las próximas los países de LATAM están organizados en el eje horizontal de mayor a menor población de izquierda a derecha. Parte del análisis se hará dividiendo los países en cuatro grupos de acuerdo a la población: grupo 1 (G1) con mayor población Brasil, México, Colombia, Argentina y Perú, estos países tienen el mayor potencial de recolección de MOM y producción de biogás; grupo 2 (G2) con alta población Venezuela, Chile, Guatemala, Ecuador y Bolivia con menor disponibilidad; grupo 3 (G3) con población media: Cuba, República Dominicana, Honduras, Paraguay, El Salvador y Nicaragua; grupo 4 (G4) con menor población Costa Rica, Panamá, Uruguay, Puerto Rico y Jamaica, estos países tienen el menor potencial de recolección de MOM y producción de biogás, pero el impacto per cápita en proyectos de sostenibilidad es similar para todos los grupos de países porque se estima el mismo porcentaje de recolección por país. El G1 tienen una capacidad entre 3,600-23,000 ton/día de MOM, el G2 entre 1,300-3,000 ton/día de MOM, el G3 entre 650-1200 ton/día de MOM y G4 entre 480-540 ton/día de MOM. BRA y MEX son los países que tienen el mayor potencial de producción de biogás 2.45 y 1.50 millones m<sup>3</sup>/día respectivamente; COL, ARG y PER tienen valores comparables, entre 3,600-5,500 ton/día de MOM, con un potencial de producción de biogás entre 400-600 mil m<sup>3</sup>/día. El G2 tiene un potencial de producción de biogás 140-323 mil m<sup>3</sup>/día, el G3 tiene un potencial de producción de biogás de 69-127 mil m<sup>3</sup>/día y el G4 tiene un potencial de producción de biogás de 52-58 mil m<sup>3</sup>/día. A pesar de la capacidad que tenga el país el sistema tiene alto grado de innovación y facilitaría el desarrollo local.

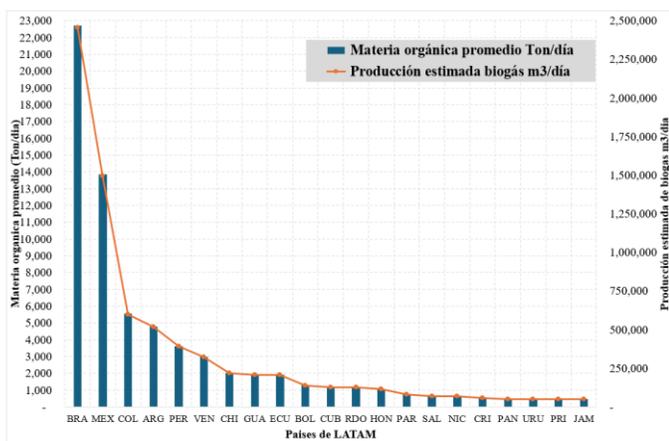


Fig. 3 Estimado de recolección de MOM y producción de biogás en LATAM.

La figura 4 presenta el estimado de bioenergía y cantidad de BUB requeridas en LATAM. El G1 requiere entre 27-168 BUB para generar entre 850-5,400 MWh/día; MEX, COL y ARG requieren 102, 41 y 35 BUB para producir 3,276, 1,310 y 1,134 MWh/día respectivamente. Estos valores de energía son similares a los producidos por centrales térmicas medianas. El G2 requiere entre 10-22 BUB para generar entre 300-700 MWh/día, estos valores de energía son similares a los producidos por centrales térmicas pequeñas. El G3 requiere entre 5-9 BUB para generar entre 150-280 MWh/día. El G4 requiere 4 BUB para generar entre 113-123 MWh/día. Cabe recordar que cada BUB tiene un grupo electrógeno (2.3 MW).

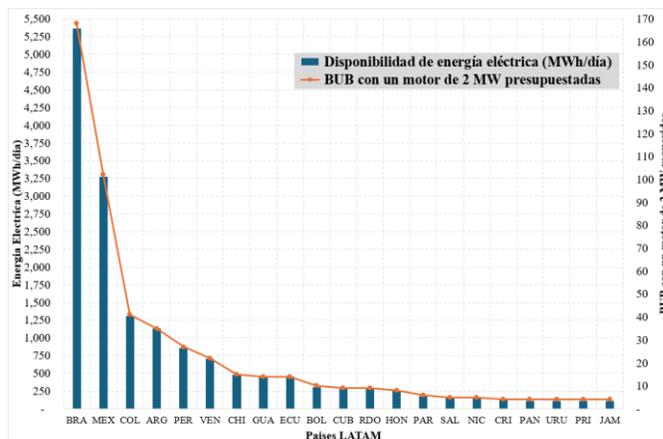


Fig. 4 Estimado bioenergía y cantidad de BUB requeridas en LATAM.

La figura 5 presenta la cantidad de biodigestores y electrolizadores en las BUB en LATAM. Para el G1 se requieren entre 135-840 biodigestores por país y 54-336 electrolizadores; MEX, COL y ARG requieren 510, 205 y 175 biodigestores, y 204, 82 y 70 electrolizadores respectivamente. El G2 requiere entre 50-110 biodigestores y 20-44 electrolizadores por país. El G3 requiere entre 25-45 biodigestores y 10-18 electrolizadores. El G4 requiere 20 biodigestores y 8 electrolizadores por cada país.

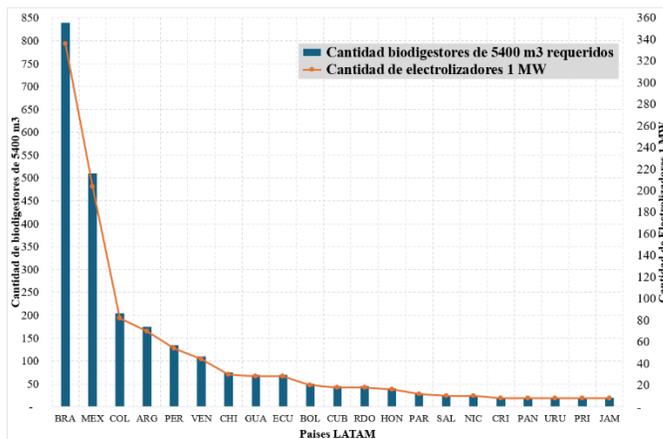


Fig. 5 Cantidad de biodigestores y electrolizadores en las BUB en LATAM.

La figura 6 presenta el estimado de producción de bioabono e hidrógeno verde en LATAM de acuerdo con el modelo de EC presentado. Para el G1 se estima una producción entre 1,800-11,300 ton/día de bioabonos y 155-968 mil m<sup>3</sup>/día de hidrógeno verde; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 6,950, 2,800, 2,400 ton/día y 588, 236 y 202 mil m<sup>3</sup>/día hidrógeno verde. Para el G2 se estima una producción entre 650-1,500 ton/día de bioabonos y 58-127 mil m<sup>3</sup>/día de hidrógeno verde. Para el G3 se estima una producción entre 320-590 ton/día de bioabonos y 28-52 mil m<sup>3</sup>/día de hidrógeno verde. Para el G4 se estima una producción entre 240-267 ton/día de bioabonos y 23 mil m<sup>3</sup>/día de hidrógeno verde. Para el caso de Colombia se estima que con el bioabono se podrían subsidiar cerca de 300 mil familias con 250 kg/mes de bioabono, equivalentes al 10% de la población campesina [22]. De acuerdo con la estimación realizada con el modelo de EC, para LATAM la conversión de biogás a hidrogeno verde incrementaría la economía aproximadamente en 3.8 veces, comparando los valores de la energía eléctrica y el hidrogeno verde producidos.

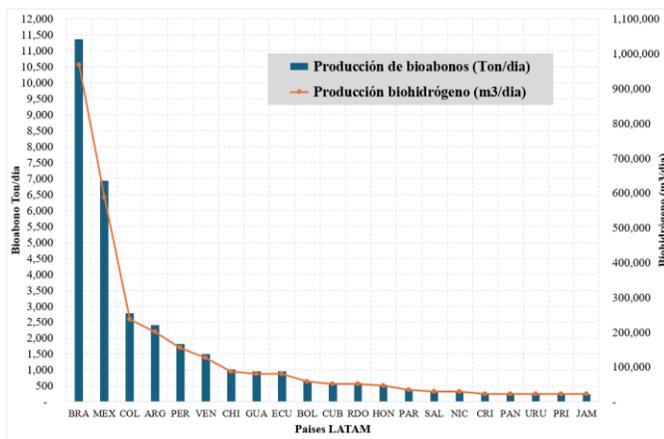


Fig. 6 Estimado de producción de bioabono y hidrógeno verde en LATAM.

La figura 7 presenta las inversiones estimadas para biodigestores y grupos electrógenos en LATAM requeridos para las BUB. Para el G1 se estiman entre 54-336 MUSD para biodigestores y 23-142 MUSD para motores por país; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 204, 82 y 70 MUSD para biodigestores y 87, 35 y 30 para grupos electrógenos. Para el G2 se estima entre 20-44 MUSD para biodigestores y entre 8-19 MUSD para grupos electrógenos. Para el G3 se estima entre 10-18 MUSD para biodigestores y entre 4-7 MUSD para grupos electrógenos. Para el G3 se estima 8 MUSD para biodigestores y 3 MUSD para motores.

La figura 8 presenta las inversiones estimadas para electrolizadores y elementos complementarios para conformar las plantas de producción de las BUB en LATAM requeridas. Para el G1 se estiman entre 42-263 MUSD para electrolizadores y 28-176 MUSD para las plantas; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 159, 64 y 55 MUSD para electrolizadores

y 107, 43 y 37 para los elementos de las plantas. Para el G2 se estima entre 16-34 MUSD para electrolizadores y entre 11-23 MUSD para plantas. Para el G3 se estima entre 8-14 MUSD para electrolizadores y entre 5-9 MUSD para plantas. Para el G4 se estima 6 MUSD para electrolizadores y 4 MUSD para plantas.

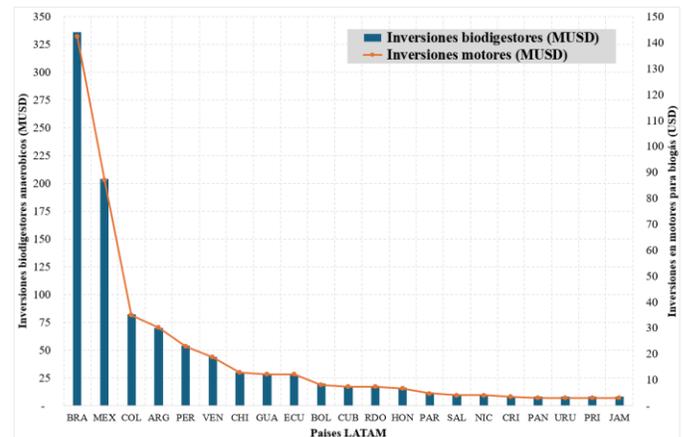


Fig. 7 Inversiones estimada biodigestores y grupos electrógenos en LATAM.

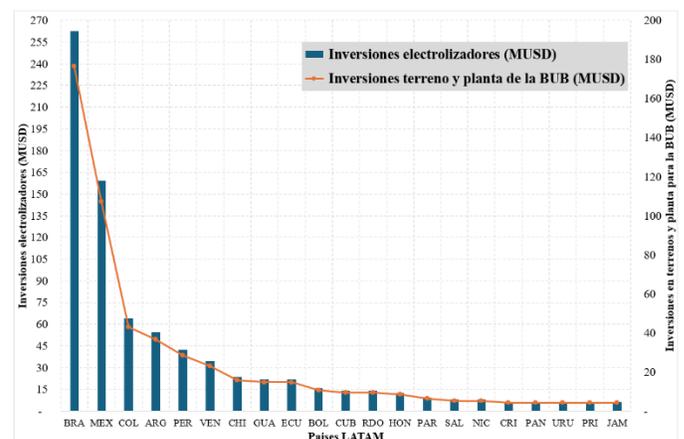


Fig. 8 Inversiones estimada electrolizadores y en plantas BUB en LATAM.

La figura 9 presenta las inversiones totales estimadas para las BUB requeridas en LATAM. Para el G1 se estiman entre 147-917 MUSD para entre 27-168 BUB; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 557, 224 y 191 MUSD para 102, 41 y 35 BUB. Para el G2 se estima entre 54-120 MUSD para entre 10-22 BUB. Para el G3 se estima entre 27-49 MUSD para entre 5-9 BUB. Para el G4 se estima 21.4 MUSD para 4 BUB. Como referencia comparativa con Colombia, para una central térmica mediana de gas natural que produciría un promedio de 1,250 MWh/día, la inversión requerida estaría en el rango de aproximadamente 60 a 75 MUSD; además, comparando con Chile, una central térmica pequeña de gas natural que produciría un promedio de 500 MWh/día, la inversión requerida estaría en el rango de aproximadamente 20 a 29 MUSD; esta estimación puede variar dependiendo de

factores específicos del proyecto, como la ubicación, los costos de construcción, los permisos y las normativas locales [22]. En ambos casos, requiriendo para la BUB una inversión mayor en tres veces comparada con la central de gas natural; pero, teniendo presente que la BUB además de la electricidad produce bioabonos y hidrogeno verde, un desarrollo sostenible con un enfoque diferente a las tecnologías convencionales.

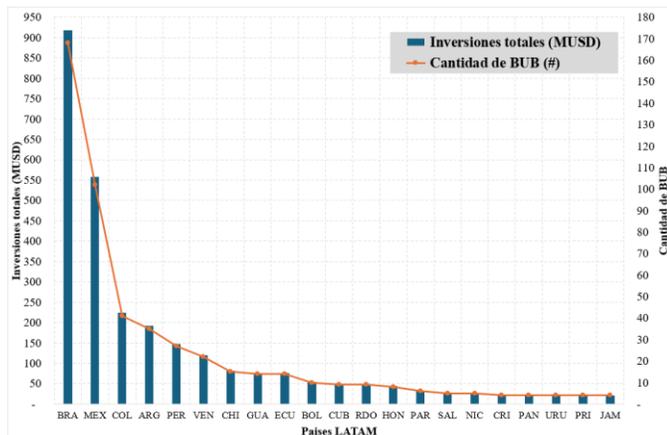


Fig. 9 Inversiones estimadas totales y número de BUB en LATAM.

La figura 10 presenta valor estimado del hidrógeno verde y del bioabono para las BUB que se proponen para LATAM. Para el G1 se estima entre 12-73 MUSD/mes por el hidrogeno verde y 5-34 MUSD/mes por el bioabono; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 44, 18 y 15 MUSD/mes por el hidrogeno verde, y 21, 8 y 7 MUSD/mes por el bioabono. Para el G2 se estima entre 4-10 MUSD/mes por el hidrogeno verde y 2-4 MUSD/mes por el bioabono. Para el G3 se estima entre 2-4 MUSD/mes por el hidrogeno verde y 1-2 MUSD/mes por el bioabono. Para el G4 se estima cerca de dos MUSD/mes por el hidrogeno verde y 1 MUSD/mes por el bioabono. Precios estimados que están sujetos a la evolución del mercado con la masificación en el uso del hidrógeno, el cual tiene un panorama interesante con los vehículos que utilizan pilas de combustible, y con el uso de bioabonos para agricultura orgánica.

La figura 11 presenta los ahorros totales por mes y la TIR para las inversiones y ahorros proyectados a tres años para las BUB en LATAM. Para el G1 se estima el ahorro total entre 15-92 MUSD/mes teniendo presentes los costos de operación, resultando en una TIR entre 50-60% a tres años; para MEX, COL y ARG los ahorros totales son 60, 23 y 20 MUSD/mes. Para el G2 los ahorros se estiman entre 6-13 MUSD/mes. Para el G3 los ahorros se estiman entre 3-6 MUSD/mes. Para el G4 los ahorros se estiman en 2 MUSD/mes. Para todos los países la TIR varía entre 47-62% a tres años lo que indica que las inversiones en BUB deberían ser atractiva para los inversores, y más con proyectos de energía que normalmente se calculan a más de 5 años para el retorno de la inversión.

Teniendo presente la población completa por país, para implementar el modelo de EC propuesto se requerirían en promedio 4.5 USD/persona para la inversión inicial en

LATAM; lo que generaría una media de ahorro de 5.5 USD/persona/año, valores bajos, pero con un alto impacto social y ambiental, que pueden generar una nueva economía.

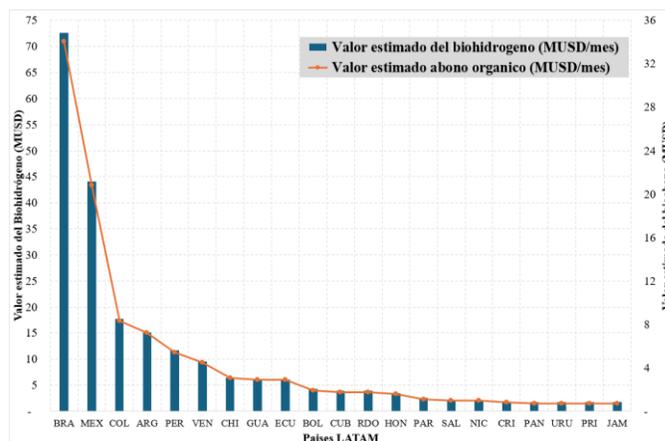


Fig. 10 Valor estimado del hidrógeno verde y del bioabono en LATAM.

La figura 12 presenta la huella de carbono y los barriles de petróleo que se evitarían de usar con la implementación de las BUB en LATAM. Para el G1 se estima entre 18-113 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/mes, equivalente a valores entre 42-260 mil barriles de petróleo que se pueden evitar de usar por mes; para MEX, COL y ARG los valores estimados son 69, 28 y 24 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/mes, equivalentes a 159, 64 y 55 mil barriles de petróleo. Para el G2 se estima entre 6.3-14.8 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/mes, equivalente a valores entre 15-34 mil barriles de petróleo que se pueden evitar de usar por mes. Para el G3 se estima entre 3.2-5.8 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/mes equivalente a valores entre 7.3-13.4 mil barriles de petróleo/mes. Para el G4 se estima entre 2.4-2.6 mil toneladas de CO<sub>2</sub>/mes, equivalente a valores entre 5.4-6.1 mil barriles de petróleo evitables por mes. Para LATAM se estima que anualmente se podría evitar una huella de carbono de 4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente con la implementación propuesta, lo que sería una estrategia de mitigación del efecto invernadero.

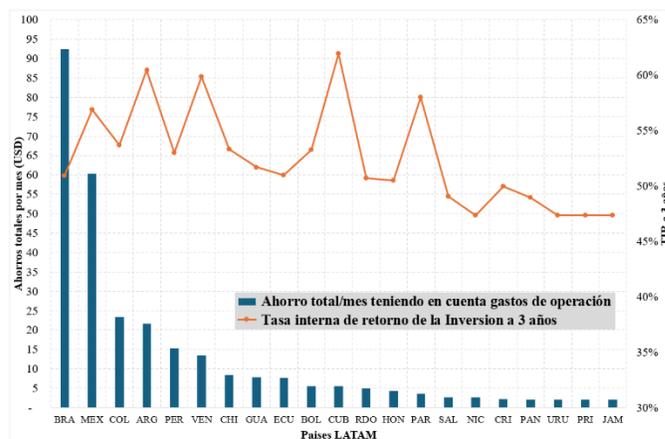


Fig. 11 Ahorro total/mes y TIR por inversiones para BUB en LATAM.

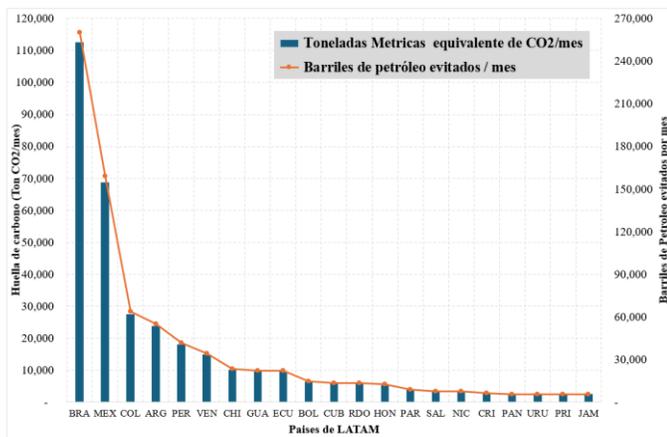


Fig. 12 Huella de carbono y barriles de petróleo evitados de usar en LATAM.

La figura 13 presenta los galones de diésel y las toneladas de carbón equivalentes que se evitarían usar por la implementación de las BUB en LATAM. En el G1 los galones de diésel varían entre 1.7-11 millones por mes y las toneladas de carbón entre 10-63 mil toneladas de carbón por mes; MEX, COL y ARG tendrían 6.7, 2.7 y 2.3 millones de galones de diésel y 38, 15 y 13 mil toneladas de carbón por mes. En el G2 los galones de diésel varían entre 0.6-1.5 millones por mes y las toneladas de carbón entre 3.5-8.3 mil toneladas de carbón por mes que se podrían evitar. En el G3 los galones de diésel varían entre 311-570 mil por mes y las toneladas de carbón entre 1.8-3.3 mil toneladas de carbón por mes. En el G4 los galones de diésel varían entre 233-259 mil por mes y las toneladas de carbón entre 1.3-1.5 mil toneladas de carbón por mes que se podrían evitar.

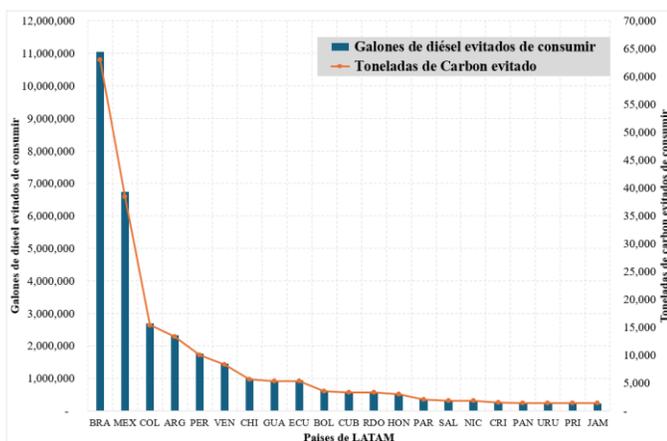


Fig. 13 Galones de diésel y toneladas de carbón evitados de usar en LATAM.

Para tener un mejor entendimiento del impacto del modelo de economía propuesto, la investigación calcula los siguientes indicadores de equivalencias energéticas, de acuerdo con la formulación planteada: 0.165 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente evitadas por cada tonelada de MOM procesada; por cada 2.62 toneladas de MOM procesada se puede obtener la misma energía que la contenida en un barril de petróleo; por

cada 62 kg de MOM procesada se puede obtener la misma energía que la contenida en un galón de diésel; por cada 71 kg de MOM procesada se puede obtener la misma energía que la contenida en un galón de gasolina; y por cada 10.8 toneladas de MOM procesada se puede obtener la misma energía que la contenida en una tonelada de carbón mineral. En otras palabras, con la materia orgánica recolectada en un camión de basura promedio se pueden evitar de ser usados aproximadamente 4 barriles de petróleo.

### B. Consideraciones adicionales, Riesgos y Desafíos.

Es crucial abordar los desafíos en la implementación de un modelo de EC. La falta de infraestructura adecuada para gestionar residuos y reciclar eficientemente, especialmente en LATAM, donde esta es limitada. La resistencia política también es un reto, ya que muchos actores priorizan modelos económicos tradicionales, y la falta de incentivos gubernamentales puede retrasar la adopción de la EC. Además, la capacitación y sensibilización de las comunidades locales es vital para implementar prácticas sostenibles, como el reciclaje y uso de la biomasa. Superar estos obstáculos es esencial para garantizar la viabilidad del modelo en todas las regiones.

Se tener presentes las perspectivas de gobiernos, comunidades locales y empresas en la implementación de la EC. Los gobiernos son responsables de crear políticas e incentivos que favorezcan la transición hacia la EC, pero enfrentan obstáculos como la coordinación interinstitucional y la presión de sectores industriales tradicionales. Las comunidades locales juegan un papel crucial en la gestión de residuos y el uso de biomasa, aunque su participación depende de la sensibilización y la capacitación. Las empresas lideran la innovación tecnológica, pero necesitan inversiones y cambios en sus modelos de negocio para adoptar prácticas sostenibles.

Entre los riesgos se encuentran la falta de aceptación social, que puede mitigarse mediante campañas de sensibilización; la incertidumbre económica relacionada con la inversión inicial, que se puede abordar buscando financiamiento público-privado; y la descoordinación entre actores, que puede resolverse estableciendo alianzas estratégicas. También existen impactos ambientales inesperados, que deben evaluarse con estudios previos, y desafíos tecnológicos, que se pueden mitigar diversificando soluciones y fomentando la investigación y el desarrollo.

La capacitación de comunidades en biogás y producción de hidrógeno verde es crucial para el éxito de proyectos sostenibles. Se pueden implementar talleres prácticos y programas de formación continua para mantener a los participantes actualizados. Colaborar con universidades enriquecerá estas capacitaciones, mientras que incluir temas en los currículos escolares fomentará la conciencia desde una edad temprana. Además, ofrecer incentivos económicos motivará la participación comunitaria. Crear redes locales permitirá el intercambio de experiencias, y proporcionar apoyo técnico garantizará la correcta implementación y mantenimiento de los sistemas, empoderando así a las comunidades hacia un futuro sostenible.

## REFERENCIAS

La colaboración con expertos en sociología, economía e ingeniería ambiental es fundamental para enriquecer el enfoque de proyectos relacionados con la Economía Circular (EC). Los sociólogos aportan una comprensión de las dinámicas sociales, ayudando a superar barreras en la adopción de prácticas sostenibles. Los economistas analizan la viabilidad financiera de iniciativas, asegurando su sostenibilidad. Por otro lado, los ingenieros ambientales desarrollan soluciones tecnológicas innovadoras que optimizan recursos y minimizan impactos. Esta sinergia no solo fortalece el diseño de políticas públicas basadas en evidencia, sino que también potencia el impacto y la efectividad de las soluciones propuestas en las comunidades.

## IV. CONCLUSIONES

Esta investigación presenta un modelo de economía circular mejorado con respecto a uno anterior publicado, incluyendo todos los países de LATAM e incluyendo la producción de hidrogeno verde para ampliar la estimación del potencial de bioenergía para los países de LATAM para el componente urbano. El modelo de cálculo está basado en el censo poblacional, en la formulación científica disponible del tema con base experimental y en la información de bases de datos obtenidas usando una IA. Se presenta el detalle de los elementos requeridos para conformar las BUB propuestas y las unidades requeridas por país. Se presenta también un análisis termo-económico para determinar la viabilidad del proyecto y el análisis ambiental para completar el análisis de sostenibilidad de la propuesta. Las principales conclusiones de la primera parte de la investigación son las siguientes:

- Se presenta un modelo de EC para los países de LATAM en el cual se detallan las unidades de BUB requeridas, con sus inversiones y ahorros estimadas, para todos los países se encuentra que la inversión tiene TIR favorable a 3 años.

- Para las BUB propuestas las inversiones son tres veces mayores comparadas con centrales térmicas de gas natural; pero teniendo presente que las BUB además de la electricidad producen también bioabonos e hidrogeno verde.

- Teniendo presente la población completa, la implementación del modelo de EC requeriría en promedio 4.5 USD/persona para la inversión inicial; lo que generaría una media de ahorro de 5.5 USD/persona/año, valores bajos, pero con un alto impacto social y ambiental, que pueden generar una nueva bioeconomía.

- Indicadores de equivalencias energéticas estimados: 0.165 ton de CO<sub>2</sub>/ ton de MOM; 2.62 ton de MOM / barril de petróleo; 62 kg de MOM/ galón de diésel; 71 kg de MOM/ galón de gasolina; y 10.8 ton de MOM/ ton de carbón.

## AGRADECIMIENTOS

Alhamdulillah, agradecimientos a la Universidad Tecnológica del Perú por el financiamiento del Proyecto P-2023-LIM-02 "Optimización de la producción de biogás y bioabono en un biodigestor anaeróbico mejorando las condiciones de operación y la alimentación del reactor".

- [1] Yuval Noah Harari. Sapiens, de animales a dioses: Una breve historia de la humanidad. Editorial de Bolsillo. Penguin Random House Group Editorial, 2015.
- [2] Yuval Noah Harari. Homo Deus: Una breve historia del mañana. Penguin Random House Group Editorial, 2016.
- [3] R. González-Díaz y L. Becerra. PYMES en América Latina: clasificación, productividad laboral, retos y perspectivas. Revista Internacional Multidisciplinaria. CIID Journal. Año: 2021, N° 01, mayo 2021, pp. 1-39.
- [4] IEA. World Energy Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- [5] Diagnóstico de mercado: los desafíos económicos y financieros para el hidrógeno en Latinoamérica. <https://www.energiaestrategica.com/>. 26 de abril 2024.
- [6] Biomasa: Un nuevo horizonte para generar energía renovable en Latinoamérica. <https://www.ambienteysociedad.org.co/>. 11 marzo, 2016.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] J. Sherwood, "The significance of biomass in a circular economy", Bioresource Technology, Vol. 300, March 2020, pp. 122755.
- [11] Manegdeg et al, "Multi-Attribute Assessment of Waste-to-Energy Technologies for Medical, Industrial, and Electronic Residual Wastes", Journal of Energy Resources Technology, Vol 144(7), 2022: pp. 070908-070920.
- [12] H. Stančin et al, "A review on alternative fuels in the future energy system", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.128, Aug. 2020, pp. 109927.
- [13] S. Sudheshna et al, "Alternative fuels: An overview of current trends and scope for future", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 32, April 2014, pp. 697-712.
- [14] T. Verger et al, "Biomass-based fuel blends as an alternative for the future heavy-duty transport: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 161, June 2022, pp.112391.
- [15] Corvellec H. et al, "Critiques of the circular economy", Journal of Industrial Ecology, vol. 26, 2022, pp:421-432.
- [16] Kirchherr J. et al, "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions", Resources, Conser. & Recycling, vol. 127, 2017, pp:221-232.
- [17] J.P. Gomez, A. Amell. Phenomenological Analysis of the Combustion of Gaseous Fuels to Measure the Energy Quality and Capacity to Produce Work in SI Engines. Journal of Eng. for Gas Turbines and Power, 2021;143(1): 0510161.
- [18] J.P. Gomez, A. Amell. Effect of the turbulence intensity on knocking tendency in a SI engine with high compression ratio using biogas and blends with natural gas, propane, and hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44:18532-18544.
- [19] Hebei Wansheng Environmental Protection Engineering Co., Ltd. <https://www.enameltanks.com/>
- [20] Caterpillar. [https://www.cat.com/es\\_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969773.html](https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/electric-power/gas-generator-sets/15969773.html)
- [21] H-TEC SYSTEMS PEM Electrolyzer ME450. <https://www.h-tec.com/>
- [22] ChatGPT. <https://chatgpt.com/>
- [23] A. Khalid et al. Review: The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Management 31 (2011) pp. 1737-1744.
- [24] Calculador de equivalencias de gases de efecto invernadero. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). <https://espanol.epa.gov/>
- [25] Kothari, R. et al. Biogas production from waste: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2014) 36, 187-197.