

ARTÍCULOS

Hidrógeno verde como recurso energético sostenible a través de la energía de la biomasa urbana

Urban biomass and green hydrogen in Ecuador as a sustainable energy resource



Silvia Coello-Pisco^{1,2}, Benigno Rodríguez-Gómez², Yomar González-Cañizalez³, Rubén Manrique-Suárez⁴



silvia.coello@ug.edu.ec

¹ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.



benigno.rodriguez@udc.es

² Universidade da Coruña. Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol. C. Mendizabal s/n, 15403 Ferrol, España.



yomar.gonzalez@ug.edu.ec

³ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.



ruben.manriques@ug.edu.ec

⁴ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 18, núm. 2, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 14 junio 2024

Aprobación: 09 septiembre 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6799>

Autor de correspondencia:

silvia.coello@ug.edu.ec

RESUMEN

Ecuador es un país rico en biomasa agrícola que no se usa del todo. Pero este tipo de biomasa tiene un valor ecológico que pueden repercutir en la alimentación de la población ecuatoriana. Lo viable es el uso de la biomasa urbana como materia prima para producir hidrógeno verde sostenible. La metodología se basa en una investigación cualitativa (contenido exegético cualitativo) y cuantitativa (análisis elemental del sustrato). La muestra fue de 286 hogares cuyos biorresiduos orgánicos se analizaron para determinar el porcentaje teórico de metano e hidrógeno verde. Los resultados permitieron obtener las ecuaciones estequiométricas del CH₄ en lo que se hallaron un valor de 49,6%, y un PCI de 3878,77 kcal/kg. Se concluye que la biomasa urbana intradomiliar que se genera en los hogares guayaquileños y en las diferentes ciudades principales de Ecuador tiene un 80,74 % de posibilidad de usarse para producción H₂ aplicando la tecnología biológica (fermentación oscura). Combinando ambas tecnologías (hidrógeno y biomasa) se contribuye a la disminución de dependencia energética de combustibles fósiles e hídricos para generar electricidad y disminución de la huella de carbono fomentando una producción energética circular, sostenible y sustentable.

Palabras claves: hidrógeno verde; biomasa urbana; biogás; recurso energético; valoración energética.

Agradecimiento:

Agradecimiento a los estudiantes del tercer semestre del curso de electricidad CI 2024, por su colaboración en la toma de datos en el campo de estudio.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Coello-Pisco, S., Rodríguez-Gómez, B., González-Cañizalez, Y., & Manrique-Suárez, R. (2024). Hidrógeno verde como recurso energético sostenible a través de la energía de la biomasa urbana. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 18(2), 89-100.

<https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6799>

ARTÍCULOS

Hidrógeno verde como recurso energético sostenible a través de la energía de la biomasa urbana

Urban biomass and green hydrogen in Ecuador as a sustainable energy resource



Silvia Coello-Pisco^{1,2}, Benigno Rodríguez-Gómez², Yomar González-Cañizalez³, Rubén Manrique-Suárez⁴



silvia.coello@ug.edu.ec

¹ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.



benigno.rodriguez@udc.es

² Universidade da Coruña. Escola Politécnica de Enxeñaría de Ferrol. C. Mendizabal s/n, 15403 Ferrol, España.



yomar.gonzalez@ug.edu.ec

³ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.



ruben.manriques@ug.edu.ec

⁴ Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Av. Juan Tanca Marengo y las Aguas. 090115. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 18, núm. 2, 2024

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 14 junio 2024

Aprobación: 09 septiembre 2024

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6799>

Autor de correspondencia:

silvia.coello@ug.edu.ec

ABSTRACT

Ecuador is some country rich in agricultural biomass that is not used at all. But this type of biomass has an ecological value that can impact the diet of the Ecuadorian population. What is viable is the use of urban biomass as a raw material to produce sustainable green hydrogen. The methodology is based on qualitative research (qualitative exegetical content) and quantitative research (elementary analysis of the substrate). The sample was 296 homes whose organic bio-waste was analyzed to determine the theoretical percentage of CH₄. The results allowed us to obtain the stoichiometric equations of CH₄, in which a value of 49.6% was found, and a PCI of 3878.77 kcal/kg. It is concluded that the intra-domestic urban biomass generated in Guayaquil homes can be replaced with an 80.74% possibility of being used to produce green hydrogen by applying biological technology (dark fermentation). Combining both technologies (hydrogen and biomass) contribute to reducing energy dependence on fossil fuels and water to generate electricity and reducing the carbon footprint by promoting circular, sustainable and sustainable energy production.

KEYWORDS: green hydrogen; urban biomass; biogas; energy resource; energy valuation



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar: Coello-Pisco, S., Rodríguez-Gómez, B., González-Cañizalez, Y., & Manrique-Suárez, R. (2024). Hidrógeno verde como recurso energético sostenible a través de la energía de la biomasa urbana. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 18(2), 89-100.

<https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.6799>

INTRODUCCIÓN

La biomasa es un recurso que está abriéndose camino para la producción de energía a nivel mundial. Este recurso, no solamente está presente en los desechos agroindustriales o en zonas rurales (Carhuanco, 2015, p. 15, Herrera y Reyes, 2024, p. 23), también se genera en pequeña escala en los hogares urbanos y a gran escala en los vertederos (Coello et al., 2021, p. 3). Nos referimos a los residuos orgánicos de origen animal o vegetal, restos de comida que se producen debido a la actividad humana en las grandes urbes o pequeñas ciudades (Carvajal et al., 2022, p. 315; Coello et al., 2023, p. 2). El uso de este biorresiduo y su correcto tratamiento permite conseguir un gas renovable (biogás); el cual puede ser utilizado para suministro de calor o energía (Caraballo y García, 2017, p. 24; Álvarez et al., 2024, p. 33).

Por ejemplo, España se caracteriza por usar este recurso para producir biogás, una de las metas es que en el año 2024 se recolecte aproximadamente la mitad que genera la actividad humana española. Para lograr este objetivo, se ha implantado un contenedor de color marrón para que la comunidad española desechen en él, los residuos orgánicos que producen en sus hogares cotidianamente (Álvarez et al., 2024, p. 21). Continuando con la idea de utilizar los desechos orgánicos urbanos, Álvarez et al., (2024, p. 8) mencionan que: "el Gobierno español dio su visto bueno a la Hoja de ruta del biogás". El fin, es conseguir su cuadruplicación de producción del biogás y biometano hasta el año 2030. En otras palabras, el apoyo de las autoridades a este tipo de proyecto trae como beneficios y acciones de "aprovechamiento energético de residuos orgánicos" que fortalece la Economía Circular (EC) del país español.

Actualmente, la Unión Europea (EU) cuenta con 17.000 instalaciones de plantas de biogás y biometano. Por otro lado, en Latinoamérica el uso de los desechos orgánicos intradomiciliario está siendo valorizados y aprovechados, usando como inóculos: el estiércol ovino, porcino, gallinaza, etc. (Manrique et al., 2023, p. 63).

Los investigadores ecuatorianos Coello et al. (2021, p. 4), en su estudio determinaron que los poderes calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de 3742,21 kcal/kg y 3309,68 kcal/kg cuenta con potencial energético idóneo para producir biogás, en proyectos de valorización energética con tratamiento de fermentación metánica. El objetivo del estudio era contribuir a la disminución del uso del gas doméstico GLP y fomentar el uso de la tecnología metánica con biodigestores experimentales doméstico para el área urbana (Coello et al., 2021; Segura, 2023, p. 28; González Cubillo, 2021, pp. 43, 56).

En Ecuador existen solo dos plantas de biogás, la primera que está en Quito, aprovecha los desechos que llegan a los vertederos para producir energía y, la otra en Cuenca donde se realiza tratamiento anaerobio para uso de compostaje. Como mencionan Coello et al. (2021, p. 2), en las demás regiones de Ecuador no cuentan con plantas de biogás que estén aprovechando este recurso urbano en los vertederos, solo se usa las técnicas de compostaje como la Bokashi, y la biomasa agroindustrial se utiliza para producción de combustibles (Arroyo y Reina, 2016, pp. 22 - 23; Coello et al., 2019, p. 6; Ramos et al., 2014, p. 6; Rivard et al., 2020, p. 13).

Por otro lado, la técnica del biogás para uso doméstico promete una alternativa limpia a los combustibles fósiles (madera, carbón, GLP) que se suelen utilizar para cocción de alimentos. Los beneficios ambientales son múltiples, desde disminución de gases de efecto invernadero, deforestación, reducción de desechos a los vertederos, contaminación visual, mejora del paisaje (Coello et al., 2022, pp. 6 - 7). También, se podrían adquirir beneficios socioeconómicos como: la eliminación de subsidio y dependencia al gas GLP (gastos energéticos, huella ambiental) usando un biodigestor casero como sistema complementario al gas doméstico (Coello, 2023, p. 127; Mina, 2021, p. 28; Muñiz, 2020, p. 45); coadyuvando a la estabilidad económica del país.

De esta manera, se contribuye con la Agenda 2030 y los objetivos del desarrollo sostenible (Fuentes, 2022, p. 59) y se educa paulatinamente a la ciudadanía con respecto al reciclaje y la correcta disposición de la basura orgánica producida en sus hogares (Cascante, 2022, p. 67; Coello et al., 2022, p. 5).

Con lo antedicho, la Economía Circular se promueve en el aprovechamiento de los residuos orgánicos para obtención de múltiples gases que sustituyan a los fósiles (Torres, 2020, p. 23). Entre los gases que destacan está el biogás y el hidrógeno verde (Tabla 1). El primero se obtiene mediante tecnología anaerobia, el segundo es más costoso que se puede conseguir de diferentes formas como: la electrólisis (separación de las moléculas de hidrógeno y oxígeno por corriente eléctrica) o biológicamente mediante la fermentación metánica o digestión anaerobia (DA). Por ejemplo, Perdomo (2023, p. 121) indica que el hidrógeno se considera un combustible prometedor en el que se están depositando grandes expectativas y al que se le está dedicando un significativo esfuerzo de investigación. El hidrógeno que se produce proviene de los combustibles fósiles, el gris en un 99% cuya obtención libera CO₂ al medio ambiente y el hidrógeno azul (H₂) que tiene sistemas de captura de carbono, y su uso es como combustible de transporte o energía. Existen diversas vías para la producción de hidrógeno. Si deseamos transitar del hidrógeno gris al hidrógeno verde, uno

de los métodos más utilizados es el reformado de metano por vapor (SMR), que utiliza gas natural como materia prima. Otra alternativa es emplear biometano, generado a partir de la fermentación metánica de residuos orgánicos, como componente esencial para la producción de hidrógeno verde (IRENA, 2020). Estos procesos se detallan en la Tabla 1.

TABLA 1
Obtención de hidrógeno a partir de biometano

| Tipo de proceso | Descripción | Características |
|-----------------------------|---|--|
| Oxidación parcial (POX) | Se produce H ₂ a través de la combustión parcial de CH ₄ con O ₂ , formando CO y carbón. | Es una reacción exotérmica (produce calor), no es necesario la contribución externa de calor. El diseño del reactor puede ser más compacto que en el del reformado de CH ₄ por vapor. El CO igualmente puede convertirse en etapas posteriores en H ₂ y CO ₂ . El proceso es más rápido que el reformado de CH ₄ por vapor, pero menos eficaz. |
| Reformado autotérmico (ATM) | La tecnología es el resultado de la combinación del reformado de CH ₄ por vapor y la oxidación parcial del CH ₄ . | La reacción total es exotérmica y produce H ₂ y CO. Luego este CO puede convertirse en H ₂ y CO ₂ . La desventaja de este proceso es que es menos eficiente que el reformado de metano por vapor. La obtención de H ₂ a partir de biometano es una alternativa atrayente a su producción mediante la electrólisis del agua. |

Fuente: IRENA (2020)

La obtención de hidrógeno a partir de la producción de biogás se considera una solución eficiente desde una perspectiva ambiental, dado que el biogás proviene de desechos orgánicos intradomiciliarios o de vertederos que gestionan biorresiduos tratados. Según Perdomo *et al.* (2023, p. 105), cuando el hidrógeno verde se genera a partir de restos orgánicos mediante degradación anaerobia, “no existen objetivos desafiantes de valorización y reciclaje”. En este sentido, el hidrógeno verde, como vector energético, trasciende la categoría de un combustible convencional.

Por lo tanto, en este estudio buscamos determinar la cantidad teórica de biogás (Bt) que se puede obtener de la biomasa urbana, aplicando el análisis elemental CHONS y las ecuaciones estequiométricas biológicas (ecuaciones 1-9) para el sustrato orgánico (Coello, 2023, pp. 82, 97; Méndez y Pintor, 2023, p. 8). De esta manera, realizaremos un análisis sobre la cantidad de hidrógeno verde que se puede producir a partir de la producción teórica de biogás con fines energéticos. En la sección metodológica, se detalla el proceso necesario para cumplir con los objetivos de nuestra investigación, centrada en la posibilidad de utilizar los biorresiduos orgánicos generados por las familias ecuatorianas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar el potencial de metano (CH₄) (Bt) de los residuos generados por las familias ecuatorianas en sus hogares, se llevó a cabo un estudio de identificación y caracterización de residuos domésticos urbanos intradomiciliarios durante un período de 28 días. Este análisis se realizó en hogares voluntarios ubicados en áreas urbanas marginales de la ciudad de Guayaquil, en la provincia del Guayas, Ecuador. En esta investigación, se consideraron los biorresiduos alimentarios, que incluyen cáscaras de vegetales y frutas, así como restos de alimentos cocinados. Se recopiló datos de 296 familias para la caracterización fisicoquímica de los desechos, y se encuestaron a 1192 familias (como muestra de poblaciones ocultas) que contribuyeron a la encuesta sobre la generación de desechos orgánicos intradomiciliarios. La identificación de los niveles socioeconómicos corresponde a nivel bajo (D), medio bajo (C-), medio (C) (ver Tabla 2).

TABLA 2
Características de los participantes de estudio

| Género | | Estrato social | | | Edad | | |
|--------|-------|----------------|-------|-------|---------|---------|---------|
| Hombre | Mujer | C | C (-) | D | 20 - 35 | 36 - 50 | 51 - 65 |
| 59,06 | 40,94 | 11,74 | 61,74 | 26,51 | 16,94 | 69,97 | 13,09 |

D) nivel bajo, (C-) medio bajo, (C) medio

De las familias que participaron en la encuesta, el 59,06% corresponde al género masculino y el 40,94% al femenino. La mayoría de los participantes tenía entre 36 y 50 años, representando aproximadamente el 70% del total. De los 1192 encuestados, 286 familias aceptaron que sus desechos fueran evaluados durante un período de 28 días, lo que equivale al 24% de los encuestados. Para llevar a cabo el análisis fisicoquímico del sustrato, se tomaron muestras de 100 g de cada hogar, con el fin de determinar el potencial anaerobio de metano a escala de laboratorio mediante reactores experimentales tipo Batch (Coello, 2023, pp. 108-110; Segura, 2023, p. 57). Los datos de recolecta de los desechos orgánicos intradomiciliarios se realizó en un cuaderno de campo elaborado por la investigadora principal de este estudio, responsable del análisis de valoración energética de la biomasa urbana para producción de hidrógeno de la Universidad de Guayaquil (UG). El análisis elemental de la materia orgánica regularmente comprende el cálculo del porcentaje de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y cenizas (Pravin Kumar, 2015, p. 7; Tchobanoglous y Theisen, 2002, p. 102), es decir, el análisis elemental del biorresiduo conocido como CHON.

En la Tabla 3, se presenta los métodos aplicados para el análisis elemental del sustrato orgánico recolectado de los 286 hogares (Coello *et al.*, 2021, p. 8; Moratorio *et al.*, 2012, p. 4).

TABLA 3
Normativa internacional para análisis de sustrato orgánico (RSU)

| Normativa | Descripción |
|----------------------|---|
| ASTMD 5331-9 2(2003) | Método de medida para composición de RSU a través de clasificación manual del sustrato orgánico |
| ASTM E790/830/897 | Cálculo porcentual del contenido de humedad, cenizas, sólidos volátiles y carbono fijo del sustrato |
| ASTM E777/778 | Determinación porcentual del contenido de carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N) |
| ASTM E955 | Cálculo del poder calorífico superior (PCS) de una muestra del sustrato orgánico |

Adaptado de Moratorio *et al.* (2012)

Para el cálculo de la producción teórica del metano (Bt), según la demanda química de oxígeno (DQO/SV) y producción porcentual de metano (% CH₄); se estima a partir de la estequiometría, de la cantidad máxima de gas y del cálculo de los parámetros "x", "y", "z"; y de sus coeficientes "a", "b" y "c" (Tabla 4, ecuaciones 2 a 4), en función de la composición química del residuo fórmula desarrollada por Burwel y Hatfield en 1936 pero modificada en 1952 (Gómez, 2020 p.18; Pineda *et al.*, 2014, p. 9).

Donde C_nH_aO_bN_c está dado por la biomasa que junto H₂O produce CH₄. Según Tchobanoglous y Theisen (2002, p. 34) el volumen de gases producidos durante la descomposición anaerobia se puede estimar mediante la ecuación de Müller y Buswell modificada, incluyendo el nitrógeno (N) y azufre (S) para obtener la proporción de amoníaco (NH₃) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) producido por el reactor; basada en el conocimiento de la composición química de los residuos (Tabla 4, ecuación 1), y suponiendo la conversión completa de residuos orgánicos biodegradables a CO₂ y CH₄ (De Souza *et al.*, 2023, p. 7).

No obstante, no todo el sustrato orgánico se convierte en CO₂ y CH₄, con una cierta porción no biodegradable, dependiendo del contenido de lignina. A pesar de las limitaciones, es posible, a través de la fórmula empírica obtenida en la Tabla 4, obtener una estimación de la cantidad máxima de gas que se puede esperar de la fracción fácilmente degradable. En este apartado se estima la cantidad de biogás, el rendimiento de CH₄ y consumo de H₂O a partir de la composición elemental (CHONS) de la biomasa urbana intradomiciliaria usando la fórmula de Boyle, cuyas ecuaciones estequiométricas de la Tabla 4. Continuando con la idea, de las ecuaciones de Buswell y Müller (1952) así como Boyle (1976), estas fórmulas asumen una conversión completa de biomasa (Alfonso Cardero, 2022, p. 27). Cabe indicar, que las ecuaciones propuestas tanto por Buswell et al. según Achinas y Euverink (2016, p. 144), "suponen que los sustratos orgánicos se fermentan individualmente y no forman parte de mezclas complejas de materias primas como suele ser el caso en estos días". Por ende, en los resultados que se obtengan de la composición elemental del sustrato orgánico intradomiciliario estará limitado a solo C, H, O, N, S y salida en forma de CH₄, CO₂, NH₃ (ecuación 1, ver Tabla 4). Se aplican las siguientes fórmulas:

TABLA 4
Fórmulas para el cálculo de Bt de CH₄

| Descripción | Ecuación | |
|---|---|--|
| | $C_nH_aO_bN_c + xH_2O \rightarrow yCH_4 + zCO_2 + cNH_3$ | Donde C _n H _a O _b N _c |
| | | está dado por la |
| Ecuación estequiométrica del sustrato | Ec. (1) | biomasa que junto H ₂ O |
| | $x = n - \frac{a}{4} + \frac{b}{2} + 3\frac{c}{4}$ | produce CH ₄ (Pineda et |
| | Ec. (2) | al., 2014; Achinas y |
| | $y = \frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4} - 3\frac{c}{8}$ | Euverink, 2016). |
| | Ec. (3) | |
| | $z = \frac{n}{2} - \frac{a}{8} - \frac{b}{4} + 3\frac{c}{8}$ | |
| | Ec. (4) | |
| Producción teórica CH ₄ (Bt) | $B_t = \frac{22,4 \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right) \cdot 1000}{12n + a + 16b + 14c} \left[\frac{mlCH_4}{gSV} \right]$ | Ec. (5) |
| | | La producción teórica de CH ₄ (Bt) se calcula con la ecuación 16 de Buswell, en términos de sólidos volátiles (SV) basada en la composición química elemental del sustrato (De Souza et al., 2020). |
| Producción porcentual de metano (%CH ₄) | $\%CH_4 = \frac{\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8}}{n+c} \left[\frac{\%CH_4}{vol} \right]$ | Ec. (6) |

Fuente: Coello (2023, pp. 96 - 99)

Dónde: "n" es el número de moles de carbono, "a": número de moles de hidrógeno, "b": número de moles de oxígeno y "c": número de moles de nitrógeno

La producción porcentual teórica de CH₄ se calcula con la ecuación 5 de Buswell, en términos de sólidos volátiles (SV) basada en la composición química elemental del sustrato (De Souza et al., 2023, p. 22). El método de la composición elemental es relativamente rápido para determinar todos los compuestos. Sin embargo, es necesario acotar que esta ecuación no diferencia entre componente biodegradable y no biodegradable, y parte del sustrato orgánico biodegradable que manejan las bacterias para desarrollarse no favorece al valor teórico de las Bt (De Souza et al., 2023, p. 33; Nielfa et al. 2015, p.18).

En relación con el H₂S, su masa nos permite determinar el material absorbente necesario para el filtro, en caso de que se opte por elaborar un filtro de gases destinado a purificar el biogás. Para este propósito, se utilizan diferentes formulaciones (Mörs et al., 2024, pp. 10, 13) que no se consideran en este estudio. Según el estado del arte, el contenido de H₂S presente en el biogás suele oscilar entre 3000 ppm y 5000 ppm, lo que equivale a un 3% a 5% (AS Lestari, 2016, p. 12; Torres et al., 2021, p. 34). La ecuación 6 da el valor teórico del metano en condiciones de laboratorio. El valor de 22,4: volumen (L) ocupado por un gas ideal a condiciones estándar de

temperatura (273K) y presión (1atm). El valor de 1000: Factor de conversión del volumen de litros (L) a mililitros (mL). Los valores de 12, 1, 16, 14: peso molecular del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, respectivamente. De la ecuación estequiométrica, se calcula el % CH₄ en volumen que tendría el biogás producido por el sustrato utilizado para alimentar el prototipo experimental (Coello, 2023, p. 101).

Cabe indicar, que los datos obtenidos de los restos de comida como: %Humedad, %SV, %ST, %cenizas, materia seca, son datos experimentales obtenidos de estudios basados en la valoración del sustrato orgánico. Los hogares fueron congregados en 12 grupos, según el sector de origen, compuestos por 24 familias y un único grupo con 22 hogares. De las cuales, se determinó el análisis elemental, ecuaciones estequiométricas, Bt y % CH₄ que puede generar los biorresiduos domésticos intradomiciliarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A la luz de los resultados de las 286 viviendas se estratificaron los hogares en 12 grupos, en donde cada grupo está conformado por 24 familias voluntarias participantes. Es importante mencionar que cada grupo familiar cuenta con 4 y 12 miembros por hogar, lo que implica que la cantidad de desechos varía según el número de personas en cada vivienda. La producción de desechos orgánicos de las 286 viviendas fue de 72.675,17 kg, lo cual significa que cada hogar está generando 254,12 kilogramos por mes (kg/mes) de desechos orgánicos intradomiciliarios y que terminan en el vertedero sin ser aprovechados energéticamente. Esta modalidad de generación de desechos sin ser aprovechados sigue creciendo. Según el INEC (2019a), la tendencia está en el alza, es decir, las familias ecuatorianas están generando más basura cada año. En el 2016 eran 0,58 kg/día y para el 2017 la demanda aumentó a 0,86 kg/día. Los resultados de esta tasación de promedio de desechos por día de los 286 hogares son de 0,88 kg/día es del 2,32% de error. Jiménez (2023) destaca que según el nivel socioeconómico las familias de niveles bajo y medio bajo generan entre 0,43 a 0,81 kg/día de desechos, lo que representa 2 a 3,5 kg/día por hogar. Esto implica que Ecuador, está ahogándose en basura, y se aleja cada vez más de cumplir con los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) al 2030 (Coello Pisco, 2022).

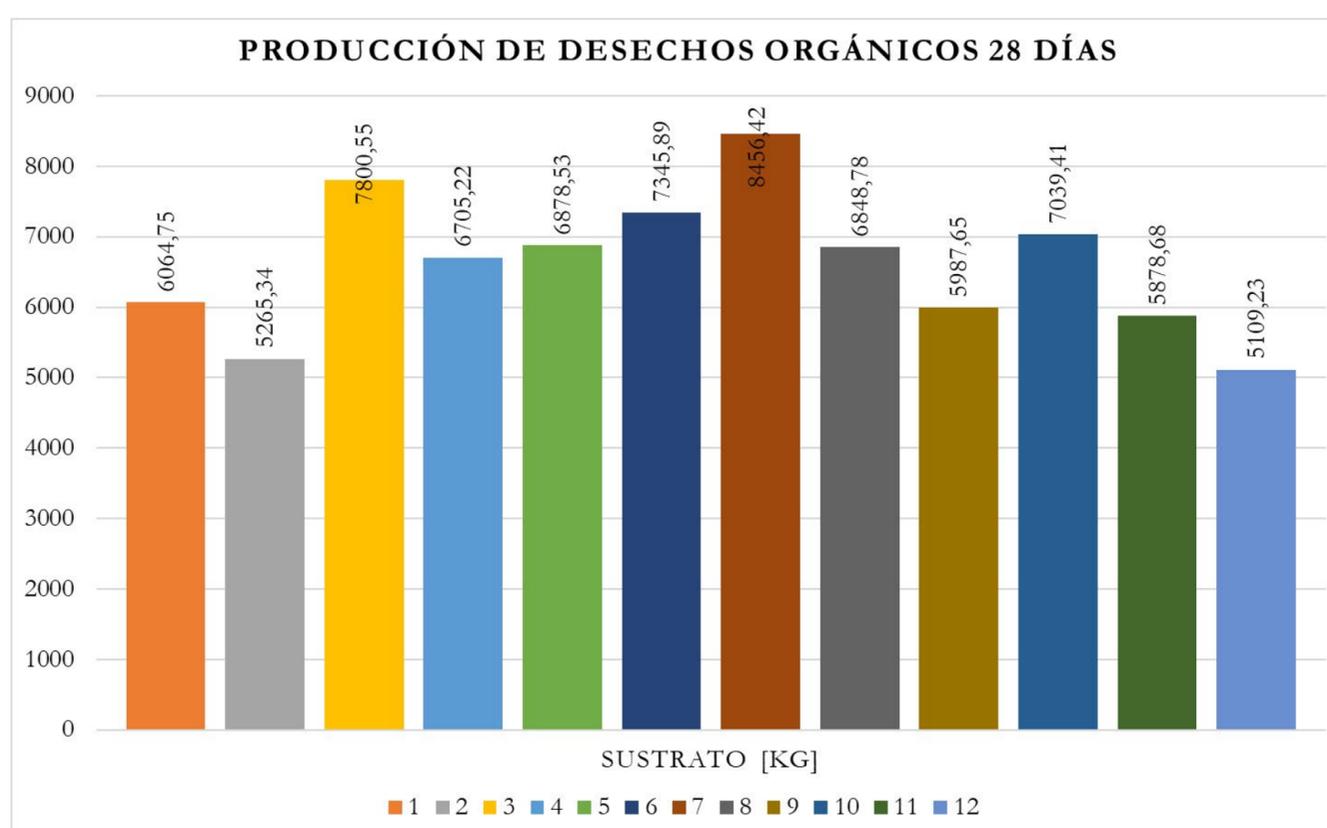


FIGURA 1

Producción de desechos orgánicos intradomiciliarios de los hogares participantes

Para determinar la viabilidad del uso de la biomasa urbana se procede a realizar el análisis elemental CHNO. A partir de los resultados obtenidos del análisis elemental, se han recopilado los siguientes datos experimentales (ver Tabla 5). De acuerdo con los métodos aplicados que se detallan en la Tabla 3 y 4 se obtiene la estimación de la cantidad máxima de gas o ecuación estequiométrica de los desechos orgánicos analizados de cada grupo.

TABLA 5
Análisis elemental y ecuaciones estequiométricas del sustrato orgánico intradomiciliario

| Grupo | C (%) | H (%) | O (%) | N (%) | S (%) | Estimación de la cantidad máxima de gas |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 1 | 47,15 | 6,40 | 44,53 | 1,54 | 0,38 | $C_{357}H_{559}O_{253}N_{10}S + 351H_2O \rightarrow 110CO_2 + 308CH_4 + 10NH_3$ |
| 2 | 46,78 | 6,04 | 44,97 | 1,89 | 0,32 | $C_{354}H_{528}O_{256}N_{12}S + 359H_2O \rightarrow 113CO_2 + 303CH_4 + 12NH_3$ |
| 3 | 47,45 | 6,23 | 44,10 | 1,86 | 0,36 | $C_{359}H_{545}O_{251}N_{12}S + 357H_2O \rightarrow 113CO_2 + 306CH_4 + 12NH_3$ |
| 4 | 46,75 | 6,04 | 45,30 | 1,55 | 0,33 | $C_{354}H_{528}O_{257}N_{10}S + 358H_2O \rightarrow 112CO_2 + 304CH_4 + 10NH_3$ |
| 5 | 47,15 | 6,40 | 44,53 | 1,54 | 0,38 | $C_{358}H_{558}O_{253}N_{16}S + 357H_2O \rightarrow 111CO_2 + 303CH_4 + 16NH_3$ |
| 6 | 40,30 | 7,80 | 50,16 | 1,34 | 0,40 | $C_{315}H_{705}O_{251}N_8S + 270H_2O \rightarrow 70CO_2 + 305CH_4 + 8NH_3$ |
| 7 | 49,97 | 5,85 | 41,91 | 1,97 | 0,30 | $C_{445}H_{601}O_{280}N_{15}S + 446H_2O \rightarrow 149CO_2 + 362CH_4 + 15NH_3$ |
| 8 | 35,74 | 6,02 | 50,99 | 1,11 | 0,34 | $C_{459}H_{845}O_{301}N_7S + 404H_2O \rightarrow 125CO_2 + 408CH_4 + 7NH_3$ |
| 9 | 51,54 | 7,54 | 39,23 | 1,36 | 0,33 | $C_{416}H_{704}O_{239}N_9S + 366H_2O \rightarrow 121CO_2 + 352CH_4 + 9NH_3$ |
| 10 | 53,56 | 6,92 | 36,98 | 2,16 | 0,39 | $C_{367}H_{546}O_{190}N_{15}S + 337H_2O \rightarrow 117CO_2 + 294CH_4 + 15NH_3$ |
| 11 | 51,15 | 6,11 | 41,23 | 1,23 | 0,28 | $C_{488}H_{673}O_{295}N_{10}S + 475H_2O \rightarrow 161CO_2 + 398CH_4 + 10NH_3$ |
| 12 | 42,34 | 5,89 | 49,46 | 2,02 | 0,29 | $C_{583}H_{937}O_{330}N_{15}S + 525H_2O \rightarrow 176CO_2 + 486CH_4 + 15NH_3$ |

De los 286 sustratos obtenidos de las familias urbanas, se obtuvieron los análisis elementales y las ecuaciones de cada grupo familiar (comprendido en 24 hogares), con los cuales se aplica las fórmulas dadas en la Tabla 4. Con los valores obtenidos de los parámetros "x", "y", "z"; y de sus coeficientes "a", "b" y "c" en función de la composición química del residuo se obtiene la producción teórica de metano y su producción porcentual (Tabla 6).

TABLA 6
Valores obtenidos de producción de CH₄ y H₂ de los sustratos intradomiciliarios

| Grupo | Bt [$\frac{mlCH_4}{gSV}$] | %CH ₄ [$\frac{CH_4}{vol}$] | Relación H ₂ /CH ₄ | Proporción sustituible |
|-------------|-----------------------------|---|--|------------------------|
| 1 | 449,91 | 49,44 | 0,16419 | 80,74 % |
| 2 | 432,70 | 47,65 | 0,17066 | |
| 3 | 447,59 | 48,62 | 0,16511 | |
| 4 | 433,48 | 48,04 | 0,17018 | |
| 5 | 449,91 | 49,44 | 0,16591 | |
| 6 | 405,19 | 52,03 | 0,16556 | |
| 7 | 467,65 | 48,26 | 0,13415 | |
| 8 | 331,46 | 45,34 | 0,11577 | |
| 9 | 541,77 | 54,75 | 0,12788 | |
| 10 | 547,19 | 52,58 | 0,14993 | |
| 11 | 492,56 | 50,31 | 0,11883 | |
| 12 | 370,24 | 44,80 | 0,09292 | |
| PROM | 440,7 | 48,37 | 0,14152 | |

Por otro lado, a la hora de proceder a determinar la viabilidad de producir hidrógeno (H₂) con biomasa urbana, conviene preguntarse previamente si se produce suficiente residuo orgánico para que mediante el proceso biológico basado en la tecnología del H₂ verde se obtenga la cantidad suficiente de CH₄ requerida para producción de energía eléctrica u otro uso según la necesidad de la matriz energética (Coloma, 2024, p. 11).

En cuanto a los valores obtenidos del % CH₄ hallado en los sustratos de los hogares participantes son entre 44,8 a 52,03 $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$. Estos valores nos muestran un gas inflamable o combustible que puede usarse para cocción de alimentos o producción de energía eléctrica. Tales valores están en correspondencia con el estudio de valoración y aprovechamiento energético de Coello (2023), donde los valores son entre 47 a 50 %CH₄ $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$. Mientras que Perdomo (2023), obtuvo valores de potencial de metano de aproximadamente 48 a 52 %CH₄ $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$. Los valores de B_t promedio de 331,46 a 547,19 $\frac{\text{mlCH}_4}{\text{gSV}}$ cuyo rango está en armonía con otros análisis elementales CHONS de otros estudios cuyos autores son: Atelge *et al.*, (2020) con producción de 49 %CH₄ $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$; Coello (2023, p. 110) con una producción de 48,9 a 50 %CH₄ $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$; Da Silva *et al.* (2022, p. 23) y De Souza *et al.* (2023, p. 8) con 48,7 a 49 %CH₄ $\frac{\text{CH}_4}{\text{vol}}$.

Por otro lado, la relación H₂/CH₄ de utilizar el sustrato orgánico para producción de H₂ verde a partir de un proceso biológico es del 80,74% de valor sustituible. Lo que nos indica que la biomasa urbana intradomiciliaria es apta para producción de energía (ver Tabla 6). En contraste con Perdomo (2023, p.94) que obtuvo un valor de 96% de proporción sustituible de ser utilizada la biomasa urbana con tecnología de fermentación oscura.

En relación con los resultados de las cinco principales ciudades de Ecuador, y basándonos en los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2021), en la Tabla 7 se presentan los resultados sobre la producción de H₂ teórico. La cantidad de desechos orgánicos a nivel nacional representa un 66,5%, calculada en función de la proyección de habitantes para el año 2023, con una generación de 0,87 kg/día por cada ciudadano ecuatoriano, según lo indica el INEC (2019 a, b, c) y Fuentes (2022, p. 78). La cantidad de energía producida en promedio de las cinco ciudades es de 41'575.298 TJ/año estaría representando 1.5·10⁴ TWh/año.

TABLA 7
Generación de H₂ en vertedero de las principales ciudades de Ecuador

| Ciudad | Habitantes (año 2023) | Desecho en vertedero | 66,5% sólo orgánico | Producción de energía H ₂ | |
|-----------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---|------------|
| | | Mensual [kg/mes] | Año [kg/año] | [TJ/mes] | [TJ/año] |
| Guayaquil | 2'723.000 | 71'070.300 | 17.250'538.568 | 1'155.650 | 13'867.794 |
| Quito | 2'827.106 | 73'787.467 | 17'910.062.830 | 1'585.042 | 19'020.501 |
| Cuenca | 533.89 | 13'93.453 | 338'225.855 | 12.880 | 154.555 |
| Machala | 576.772 | 15'053.749 | 3.653'921.275 | 459.936 | 5'519.230 |
| Ambato | 591.658 | 15'442.274 | 37'.48225.908 | 251.101 | 3'013.218 |

Con estos resultados, la tecnología más adecuada para producir H₂ a partir de la biomasa urbana sería la fermentación oscura o digestión anaerobia, ya que genera menores emisiones de CO₂ y es más eficiente en comparación con otras tecnologías de producción de H₂ (González Cubillo, 2021, p. 11; Perdomo, 2023, p. 96). Esta metodología permite el ahorro de energía y recursos energéticos, siendo más sostenible y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030 (Coello *et al.*, 2023, p. 3; Ortiz *et al.*, 2021, pp. 4-5).

CONCLUSIONES

La biomasa urbana es una materia prima energéticamente subestimada que, si se utiliza adecuadamente, puede generar tanto energía eléctrica como biocombustibles y sustituir el gas licuado de petróleo (GLP) de uso doméstico. Esto se ha evidenciado en los resultados de esta investigación, que indican un 81% de valor sustituible.

La valorización de los desechos urbanos para la producción de H₂ está en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 3, 7 y 12, que buscan garantizar el bienestar y la salud de los ecuatorianos, así como proponer modalidades

y tecnologías para una producción energética sostenible. Además, el uso de la biomasa también contribuye al ODS 6, que promueve la sostenibilidad del agua, ya que la producción de H₂ mediante hidrólisis requiere de este recurso, el cual no es inagotable.

Este estudio demuestra cómo la producción de H₂ a partir de la biomasa urbana ayuda a abordar dos problemas ambientales significativos en Ecuador, por un lado, la creciente acumulación de desechos en vertederos que no son aprovechados, y por otro, la necesidad de limitar la producción de H₂ con alto contenido de carbono (C).

REFERENCIAS

- Achinas, S. y Euverink, G.J.W. (2016) "Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural Waste", *Resource efficient Technologies*, 2(3), pp. 144 – 145. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.refit.2016.08.001>
- Alfonso Cardero, A. (2022) *Análisis multicriterio de alternativas de recuperación de materiales y energía de los residuos sólidos urbanos de La Habana*. Tesis de Maestría. La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. Doi:10.13140/RG.2.2.13992.85766
- Álvarez, F., Allub, L., Cont, W., Juncosa, F., Odriozola, J. y Alves, G. (2024) *Energías Renovadas: Transición energética justa para el desarrollo sostenible*. Caracas: CAF. Disponible en: <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2248>
- Arroyo, J. y Reina, W. (2016) "Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor", *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*, (16), pp. 20-29. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/ings.n16.2016.03>
- Atelge, M.R., Atabani, A.E., Banu, J.R., Krisa, D., Kaya, M., Eskicioglu, C. Gopalakrishnan, K., Lee, C., Yildiz, S., Unalan, S., Mohanasundaram, R., y Duman, F. (2020) "A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery", *Fuel*, 270, eid. 117494. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494>
- Caraballo, M. y García, J. (2017) "Energías renovables y desarrollo económico. Un análisis para España y las grandes economías europeas", *El Trimestre Económico*, 84 (335), pp. 571-609. Disponible en: <https://doi.org/10.20430/ete.v84i335.508>
- Carhuanco, F. (2015) *Valorización energética de la biomasa residual agrícola de banano y mango en la región de Piura-Perú*. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <https://oa.upm.es/51182/>
- Carvajal Romero, H., Teijeiro-Álvarez, M., García-Álvarez, M. T. y Vite Cevallos, H. (2022) "Modelo de gestión del manejo de residuos sólidos urbanos en la provincia de El Oro, Ecuador", *Revista Universidad y Sociedad*, 14(6), pp. 314-321. Disponible en: <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3379/3315>
- Coello Pisco, S.M., Hidalgo Crespo, J., Rodríguez, B., González, Y. y Banquera, L. (2023) "Perceptions of Domestic Gas Consumption: Effects on the Economy, Urbanization Process and Environmental Proposal", *9ª Conferencia Internacional sobre Investigación en Energía y Medio Ambiente. Ciencias e Ingeniería Ambiental ICEER 2022*. Springer, Cham: Caetano, N.S., Felgueiras, M.C. (eds). Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-43559-1_74
- Coello, S., González, Y., e Hidalgo, J. (2019) "Relación entre los factores sociodemográficos asociados al consumo de gas doméstico y la factibilidad de diseñar un dosificador a gas en áreas urbanas", *17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities*, 24-26 July 2019. Jamaica-Montego. Disponible en: <https://laccei.org/LACCEI2019-MontegoBay/meta/FP240.html>
- Coello, S., Rodríguez, B., González, Y., Banguera, L., e Hidalgo, J. (2022) "Validación de un instrumento para determinar las características técnicas de un biodigestor urbano mediante la técnica de segmentación de mercado", *20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Education, Research and Leadership in Post pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions"*. Boca Raton, Florida-USA, July 18 - 22, 2022. Disponible en: https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/full_papers/FP3.pdf

- Coello, S., Rodríguez, B., González, Y., e Hidalgo, J. (2021) "Aprovechamiento energético de la biomasa residual: caso de estudio de los restos de comida de familias de estudiantes de la Universidad de Guayaquil, para producción de biogás", *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 12(2), pp. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v12i2.3251>
- Coello Pisco, S. M. (2022) *Design of R+D+I Project in biomass through research based on design as a sustainable environmental energy resource*. Disponible en: <https://n9.cl/eafqr>
- Coloma, H. (2024) *Estudio de caso: tecnologías de producción de hidrógeno verde para Ecuador*. Trabajo de Integración Curricular. Guayaquil: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial. Disponible en: <https://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/74012>
- De Souza, L.F.C., Dos Santos, R.G., Guerra, E.D., Gonçalves, E.A.P., & Santos, S.M. (2023) III-037-Avaliação do potencial bioquímico de metano a partir da caracterização de resíduos sólidos orgânicos. Disponible en: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento46/TrabalhosCompletoPDF/III-037.pdf>
- Fuente Mora, G. (2022) *La economía circular y la industria 4.0 como modelo de producción para aprovechar la biomasa urbana*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/60758>
- Gómez, E. (2020) *Comparación del desempeño de estimadores de estado para la predicción de variables en un biodigestor*. Tesis de maestría en Ciencias de Automatización y control. México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Disponible en: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2646>
- González Cubillo, W. (2021) *Estudio de las tecnologías limpias para la gestión sostenible de residuos domésticos peligrosos en tiempos de pandemia COVID-19*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/56519>
- Herrera, D., y Reyes, R. (2024) *Impacto ambiental en la disposición final de dispositivos de almacenamiento y generación de energías renovables*. Tesis de maestría en Especialización en Gerencia de Proyectos. Bogotá: Universidad Ean. Disponible en: <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/13463>
- INEC (2019a) *Información ambiental en hogares ESPND 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Hogares/Hogares%202019/MOD_AMB_HOGAR_ESPND_2019_11.pdf
- INEC (2019b) *Proyecciones poblacionales cantonales*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec-presenta-sus-proyecciones-poblacionales-cantonales/>
- INEC (2019c) *Gobiernos autónomos descentralizados (GAD) y Asociación de Municipios Ecuatorianos. Estadísticas de información económica ambiental en los gobiernos municipales autónomos descentralizados*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>
- INEC (2021) *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) Gestión de residuos sólidos 2020*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2020/Residuos_solidos_2020/Presentacion_residuos_2020.pdf
- IRENA (2020) *Estadísticas de Energías Renovables*. Agencia Internacional de Energías Renovables. Abu Dabi. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2020/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2020-ES>
- Jaramillo, N. J. (2023) *Estudio de caso biogás como sistema complementario de combustibles fósiles*. Trabajo de Integración Curricular. Guayaquil: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/70100>
- Manrique, S.M., Mosconi, L., Subelza, C. y Honorato, M. (2023) 'Biocombustibles sólidos'. En: *Usos y Aplicaciones Energéticas de la Biomasa: Hacia una bioeconomía circular. Guía científico-técnica*. Madrid: Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T) CYTED Ediciones, pp. 252. ISBN: 978-84-15413-58-5. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/377241438_Biocombustibles_solidos

- Méndez-Zetina, F. D. Pintor-Ibarra, L., Rutiaga-Quiñones, J. y Alvarado-Flores, J. (2023) "Capítulo 6: Análisis elemental en la biomasa con fines energéticos". En: López, L. y Morales, M. Ed(s). *Aplicaciones Energéticas de la biomasa: perspectivas para la caracterización local de biocombustibles sólidos*. México: Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/376956362_Capitulo_6_Analisis_elemental_en_la_biomasa_con_fines_energeticos
- Mina Dávila, C. (2020) *Percepción social sobre el consumo de gas domiciliario en los barrios marginales de la ciudad de Guayaquil*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/52619>
- Moratorio, D., Rocco, I. y Castelli, M. (2012) "Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía", *Revista Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, (10), pp.115-126. Disponible en: <http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/370>
- Mörs, J., Colares, G.S., Junqueira, L.T., Oliveira, G.M. de, Dullius, A., Buffon, G. y Konrad, O. (2024) "Photosynthetic process for removing H₂S and CO₂ from biogas using the microalgae *Chlorella sorokiniana*", *Caderno Pedagógico*, 21 (4), e3723. Disponible en: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n4-078>
- Muñiz Arreaga, D. (2020) *Estudio de prefactibilidad para la implementación de un prototipo de digestor biológico basado en los criterios de segmentación de mercado con tecnología anaeróbica*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/53914>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015) "Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge", *Biotechnology Reports*, 5, pp.14-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Ortiz Arévalo, J. A. y Guerrero Guerrero, A. F., Sepúlveda Díaz, D. A., Murillo Padilla, B. H. y Bello Rodríguez, R. (2021) "Diseño de prototipo para la medición de potencial energético de los RSO de la plaza de mercado de Fusagasugá mediante digestión anaerobia", *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021*, sep. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1774>
- Perdomo, S.C. (2023) *Valorización del hidrógeno como alternativa de desarrollo sostenible para la producción de energía a partir de la biomasa urbana*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/67531>
- Ramos, D., Terry, A, Soto, F. y Cabrera, J. (2014) "Bocashi: abono orgánico elaborado a partir de residuos de la producción de plátanos en Bocas del Toro, Panamá", *Revista Cultivos Tropicales*, 35(2), pp. 90-97. Disponible en: <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/834>
- Segura Pin, C. (2023) *Diseño experimental de una miniplanta a partir de la biomasa urbana para la producción de ch₄ como sustituto de gas GLP*. Tesis de Ingeniería Industrial. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/67538>
- Tchobanoglous, G., y Theisen, S. (2002) *Handbook of Solid Waste Management*. Second Edition. New York: McGraw Hill Handbooks. ISBN: 9780071356237. Disponible en: <https://n9.cl/c8twf>
- Torres, W. (2020) *Gobierno analiza futuro de las cocinas de inducción en 2021*. Primicias. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gobierno-programa-cocina-induccion-ecuador/>