



## APLICACIONES INDUSTRIALES

# La Codigestión de Residuos Orgánicos: una contribución energética, ambiental y de salud humana

## *The Organic Waste Codigestion: an energy, environmental and human health contribution*

Florentino Sánchez Portilla<sup>1</sup>  
Roberto Vizcón Toledo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Veracruzana, Campus de Coatzacoalcos, México

<sup>2</sup>Universidad de Matanzas, Cuba

### RESUMEN/ABSTRACT

En el mundo actualmente se desechan grandes cantidades de biomasa residual sin tratamiento alguno, generadas principalmente por las actividades naturales de los seres vivos. Lo que significa un grave problema de contaminación y de salud para el planeta; sin embargo, esos residuales, al utilizar un tratamiento adecuado como la digestión, ofrecen beneficios tales como la obtención de biogás, biofertilizantes inocuos y reducción de daños ambientales y a la salud humana. Mediante experimentos de codigestión a escala de laboratorio con estiércol bovino, restos de comida y lodos cloacales, se obtuvieron resultados que justifican el empleo de esta tecnología energética: un alto impacto ambiental benéfico (39,8 según Matriz de Leopold), una generación de energía, a partir del biogás referida a la masa seca utilizada de 1184,12 kJ/kg, la conversión de biomasa dada la reducción de la DQO entre 37,32-56,39 g/l, la eliminación de microorganismos patógenos y una producción de nitrógeno amoniacal entre 309-516 mg/l.

**Palabras clave:** biomasa residual, evaluación energética, impacto ambiental, tratamiento anaerobio.

*Today in the world large amounts of residual biomass are discarded without treatment, mainly generated by the natural activities of living beings. Which means a serious problem of pollution and health for the planet; however, these waste by using appropriate treatment such as digestion, offer benefits such as obtaining of biogas, safe bio-fertilizers and reduction of environmental and human health damage. The results were obtained through codigestion experiments in a laboratory scale with cattle manure, food waste and sewage sludge, justify the use of this energy technology with a high beneficial environmental impact (39,8 using Leopold's Matrix), energy generation from biogas based on the 1184,12 kJ/kg of dry mass used, the conversion of biomass given the COD reduction around 37,32 to 56,39 g/l, the elimination of pathogenic microorganisms and the production of ammonia nitrogen around 309 to 516 mg/l.*

**Key Words:** anaerobic treatment, energy assessment, environmental impact, residual biomass.

### INTRODUCCIÓN

Debido a la continua baja en las reservas probadas de combustible fósil, las naciones altamente demandantes de energéticos para su transporte e industria, han ideado que la única manera de obtenerlos es mediante la siembra de ciertas gramíneas y otros vegetales pequeños, que hace necesaria la deforestación para extender las áreas de cultivo, o en su defecto utilizar las existentes destinadas a los cultivos para alimentación. Además, la sobreexplotación del ambiente ha llegado a tal grado que hoy es una realidad que el entorno y toda la naturaleza del planeta se encuentran gravemente comprometidos; considerando que el consumo irrestricto de recursos no renovables genera grandes costos económicos y medioambientales, debido a la generación y dispersión de residuales.

Por ello, se hace imperativo volver la vista hacia tecnologías comprometidas y amigables con el medio ambiente; lo que significa hacer uso de las fuentes renovables de energía, que proporcionan energía a menor costo por consumo de energéticos y por consiguiente de impacto ambiental. En este sentido, el tratamiento de los residuales de la biomasa producidos por la actividad humana, son una oportunidad para obtener un energético (biogás), que no aporta gases de efecto invernadero, debido a que el dióxido de carbono que se produce con su quema, se encuentra dentro del inventario medio ambiental [1,2].

El tratamiento anaerobio de las biomásas residuales generadas por la actividad natural de los humanos permite eliminar, en primera instancia el riesgo sanitario que representa el confinar en tiraderos y lagunas de oxidación al aire libre de esos residuales, consistentes principalmente en restos de comida, lodos cloacales, excretas de ganado, de aves de corral, restos de podas y algunos residuales orgánicos industriales provenientes del ramo alimenticio y bebidas.

Por otra parte, los requerimientos de energía e impacto ambiental que representan otros tipos de tratamientos de esos residuales, tales como la producción de composta, el tratamiento aerobio y la quema de esos residuales, a partir que el tratamiento anaerobio elimina los organismos patógenos que habitan los residuales y remueve de manera natural la DQO produciendo biogás como combustible con potencial para utilizarse en la generación de energía térmica e incluso eléctrica. Además, se producen dos residuales (uno líquido rico en nitrógeno amoniacal y otro sólido rico en macro y micro nutrientes) con potencialidades como nutrientes en sembradíos, sin los requerimientos de energía, materia prima e impacto ambiental producidos por la industria de los fertilizantes.

En trabajos anteriores desarrollados sobre el tratamiento anaerobio para este tipo de residuales, se han estructurado temas donde se analizan por separado cada uno de ellos, tales como: (a) desarrollo de metodología para la optimización termoeconómica y ruta mejor para la obtención del balance entre el balance exergético, así como los costos de producción/generación de energía en sistemas para tratamiento de aguas residuales [3- 5], (b) estudios de factibilidad técnica y económica de un sistema para la transformación de residuos sólidos municipales en energía, mediante una planta híbrida de ciclo combinado considerando la producción de biogás con la parte orgánica y la combustión de la parte no reciclable [6], (c) determinaciones de costos asociados a la remediación medioambiental para aguas residuales municipales [7], (d) estudios de sostenibilidad medioambiental del proceso anaerobio mediante la comparación de producción de energía eléctrica utilizando residuales orgánicos domésticos y cultivos energéticos para diferentes posibilidades de alimentación al digestor en el contexto agrícola e influencia de la aplicación del digestato como fertilizante [8], (e) análisis de exergía y económico sobre un sistema para el tratamiento anaerobio del suero producido en una planta de elaboración de queso [9], (f) puntos de vista sobre el papel potencial de biogás en la atención de la demanda fluctuante de electricidad, y en las redes de energía inteligentes [10].

En lo referente a la codigestión, se han establecido estudios de factibilidad de la codigestión mesofílica en lodos de depuradora con vegetales como la *Egeria densa* [11].

Este trabajo se estructura con la perspectiva de una búsqueda sobre los parámetros óptimos de operación en los biorreactores para la codigestión con tres o más tipos de biomasa residuales, que permitan maximizar las producciones de biogás y efluentes ricos en nitrógeno y carbono, evaluar la sostenibilidad y daños a la salud por medio de la aplicación de la Matriz de Leopold, la aportación energética, de emisiones y el balance económico del proceso anaerobio de los residuales.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **La biomasa residual y el tratamiento anaerobio**

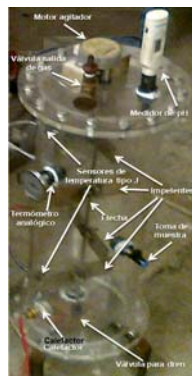
En México, en el municipio de Coatzacoalcos de Veracruz, gran parte de los residuales orgánicos municipales (biomasa residual) sólidos son depositados en vertederos al aire libre y las aguas residuales municipales son vertidas a los afluentes y playas; con la consiguiente contaminación ambiental y posibles daños a la salud por las bacterias y parásitos que contienen. Sin embargo, esos residuales pueden ser tratados mediante un proceso de descomposición anaerobia a través de su codigestión, llamado también tratamiento anaerobio.

El tratamiento anaerobio consiste en una serie de pasos donde los microorganismos descomponen la materia biodegradable con ausencia de oxígeno, lo que permite garantizar la eliminación de su impacto ambiental y los posibles daños a la salud que representan al eliminarse los microorganismos patógenos que contiene, además de obtener un energético (biogás) que puede emplearse en sustitución de los combustibles fósiles y lodos libres de microorganismos patógenos, ricos en nutrientes para el campo y un efluente líquido rico en amonio.

## Descripción del proceso

### *Instalación experimental*

El equipamiento para el desarrollo del experimento consta de 5 biorreactores de mezcla completa de forma cilíndrica con bridas ciegas en la parte superior e inferior, como el que se muestra en la figura 1, cuyos cilindros son de acrílico transparente de 13,97 cm de diámetro interno (5,5") y 48 cm de alto (18,9"). Cuyo volumen total es de 7,4 litros y un volumen de proceso de 6,74 litros. En la brida ciega superior se encuentran anclado el motor (CA 127 Volts, 6 rpm y 3 Watts) que mueve la flecha del agitador introducida por un orificio en la misma, al igual que la flecha del agitador, la válvula de salida del biogás producido y el sensor – medidor de pH. En la brida ciega inferior se encuentra colocado el soporte para la flecha del agitador e introducida una válvula para dren de los lodos.

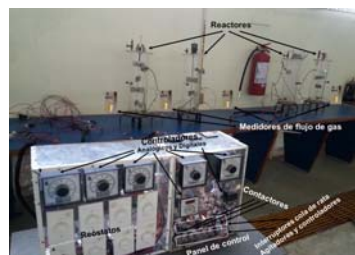


**Fig. 1 Biorreactor de mezcla completa.**

En el cuerpo cilíndrico se encuentran introducidos: 2 sensores de temperatura (termopares) tipo J uno en la parte superior y otro en la parte inferior, un termómetro analógico para visualizar la temperatura en campo, una resistencia de filamento de 5 Ohm y 10 metros que envuelve al reactor y que sirve como calefactor para obtener la temperatura de proceso, y una válvula para toma de muestra del efluente.

### *Sistemas de control y medición de los biorreactores*

Para el control de los procesos, se tienen dos cajas de control las que se muestran en la figura 2, en las que se muestran los interruptores del tipo cola de rata que permiten cerrar o abrir el flujo eléctrico hacia los motores de agitación y hacia los controladores de temperatura y calefactores de cada uno de los biorreactores, además de los controladores y los reóstatos que controlan la intensidad del fluido eléctrico hacia los calefactores para cada uno de los biorreactores, lo que evita variaciones bruscas de temperatura que dañen el proceso. Cada controlador controla la temperatura de un biorreactor



**Fig. 2 Cajas de control y proceso general.**

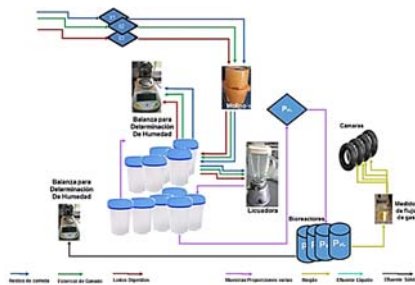
### *Sistema de medición del biogás producido*

Para la medición de la producción de biogás, se utiliza un medidor de flujo como el que se muestra en la figura 3, que permite

observar la producción por periodos determinados, en este caso, la producción total, visualizando directamente el contador al dar por terminado el proceso.  
 El biogás producido se almacena en cámaras de llanta para carretilla. Cada reactor posee un medidor de flujo de gas.

*Actividades y tareas del proceso*

Se prepara una mezcla de los residuales a tratar tal como se muestra en la figura 3, con la finalidad de obtener el tamaño y una relación adecuada de las biomazas residuales, acorde a las proporciones establecidas en la tabla 1, mediante las siguientes tareas:



**Fig. 3 Diagrama de bloques del proceso**

1. Se colectan en primera instancia residuos orgánicos de cocina (ROC)  $X_1$ .
2. Se acopia estiércol de ganado vacuno estabulado de un establo cercano  $X_2$ .
3. Se obtienen lodos de fosa séptica  $X_3$ .
4. Una vez recolectados los materiales, mediante una trituradora y una licuadora se reduce el tamaño de partículas de cada uno de ellos por separado, toda vez que las partículas muy pequeñas favorecen la compactación y aumenta la superficie de ataque microbiano.
5. Posteriormente, se determina la humedad de cada componente en la muestra mediante la balanza para determinación de humedad y así determinar la cantidad de sólidos totales presentes en cada una de ellas.

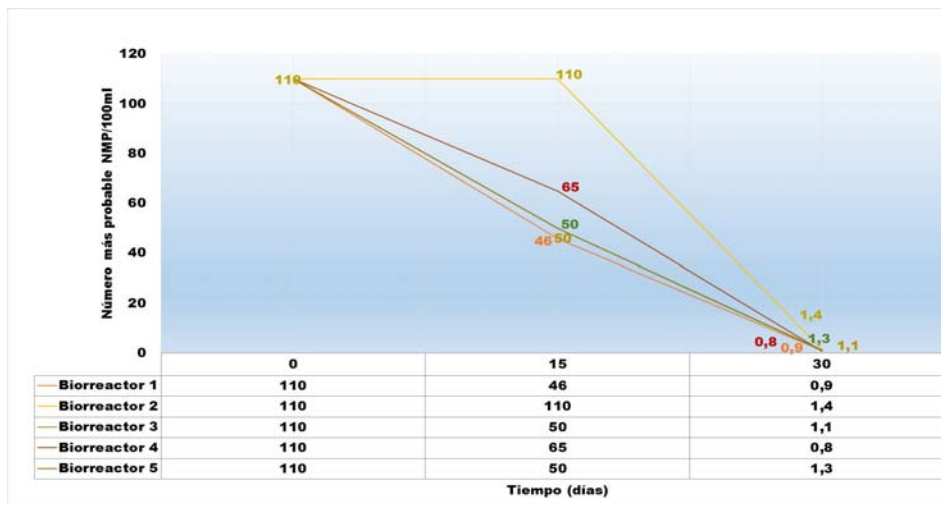
**RESULTADOS**

Las proporciones de carga de los reactores se muestran en la tabla 1

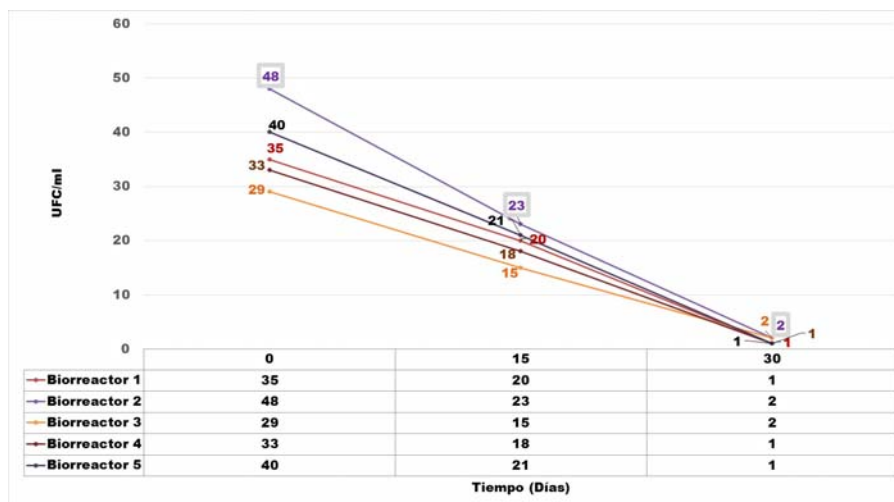
| Tabla 1. Composiciones de carga por Reactor |           |        |               |           |        |               |           |        |
|---|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|
| Biorreactor 1                               |           |        | Biorreactor 2 |           |        | Biorreactor 3 |           |        |
| Comida                                      | Estiércol | Lodos  | Comida        | Estiércol | Lodos  | Comida        | Estiércol | Lodos  |
| 0 g   | 2702 g    | 1327 g | 0 g           | 1332 g    | 2708 g | 1335 g        | 1327 g    | 1329 g |
| Agua  |           |        | Agua          |           |        | Agua          |           |        |
| 4850 ml (g)                                 |           |        | 4850 ml (g)   |           |        | 4850 ml (g)   |           |        |
| Biorreactor 4                               |           |        | Biorreactor 5 |           |        |               |           |        |
| Comida                                      | Estiércol | Lodos  | Comida        | Estiércol | Lodos  | Estiércol     | Lodos     |        |
| 2708 g                                      | 0 g       | 1326 g | 1330 gr       | 2703 g    | 0 g    |               |           |        |
| Agua  |           |        | Agua (g)      |           |        | 4850 ml (g)   |           |        |
| 4850 ml (g)                                 |           |        |               |           |        |               |           |        |

*Microorganismos presentes en el proceso*

Se determinan los microorganismos presentes durante el proceso, estos son básicamente los *Coliformes*, *Vibrio Cholerae*, cuyo número de colonias y concentración se muestra en la figura 4 y *Desulfovibrio*, cuyos resultados a las pruebas se muestran junto a los de *Vibrio Cholerae* en la tabla 2, no se encontró evidencia de *Salmonella*, posiblemente por enmascarse con *Vibrio Cholerae*.



a) Concentración de coliformes totales durante la fermentación.



b) Colonias de *Vibrio Cholerae* presentes en la fermentación

Fig. 4 Concentración de *Coliformes* y *Vibrio Cholerae* al inicio, a los 15 y a los 30 días de proceso

| Tabla 2. Resultados de las pruebas bioquímicas para <i>Vibrio Cholerae</i> y <i>Desulfovibrio</i> |  |               |               |               |               |
|---|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| a) Resultados de las pruebas bioquímicas para <i>Vibrio Cholerae</i>                              |  |               |               |               |               |
| Prueba  | Biorreactor 1                          | Biorreactor 2 | Biorreactor 3 | Biorreactor 4 | Biorreactor 5 |
| Indol   | Negativo                               | Negativo      | Negativo      | Negativo      | Negativo      |
| Ornitina descarboxilasa   | Positivo                               | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
| Motilidad   | Positivo                               | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
| Producción de sulfuro de hidrógeno  | Negativo                               | Negativo      | Negativo      | Negativo      | Negativo      |
| b) Resultados de las pruebas bioquímicas para <i>Desulfovibrio</i>                                |  |               |               |               |               |
| Muestra   | Biorreactor 1                          | Biorreactor 2 | Biorreactor 3 | Biorreactor 4 | Biorreactor 5 |
| Primera   | Turbidez en el medio                   | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
|   | Precipitado negro de sulfuro de hierro | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
| Segunda   | Turbidez en el medio                   | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
|   | Precipitado negro de sulfuro de hierro | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
| Tercera   | Turbidez en el medio                   | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |
|   | Precipitado negro de sulfuro de hierro | Positivo      | Positivo      | Positivo      | Positivo      |

El comportamiento del crecimiento mostrado por las bacterias anaerobias y el decaimiento de las bacterias aerobias, estas últimas principales causantes de problemas de salud, es semejante en los 5 reactores, tal como se puede observar en la tabla 3.

| Muestra | Biorreactor 1 |         | Biorreactor 2 |         | Biorreactor 3 |         | Biorreactor 4 |         | Biorreactor 5 |         |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
|         | Bacterias     |         | Bacterias     |         | Bacterias     |         | Bacterias     |         | Bacterias     |         |
|         | Anaerobia     | Aerobia | Anaerobia     | Aerobia | Anaerobia     | Aerobia | Anaerobia     | Aerobia | Anaerobia     | Aerobia |
| Primera | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   |
| Segunda | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   |
| Tercera | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   | +             | +++++   |
| Cuarta  | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   |
| Quinta  | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   | +++           | +++++   |
| Sexta   | ++++          | ++++    | ++++          | ++++    | ++++          | ++++    | ++++          | ++++    | ++++          | ++++    |
| Séptima | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      |
| Octava  | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      | ++++          | ++      |
| Novena  | +++++         | ++      | +++++         | ++      | +++++         | ++      | +++++         | ++      | +++++         | ++      |
| Decima  | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       |
| Onceava | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       |
| Doceava | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       | +++++         | +       |

Disminución de la demanda química de oxígeno (DQO) y concentración del nitrógeno amoniacal extraíble

En la tabla 4, se puede observar la disminución de la DQO en 28 días de proceso, considerando 4 periodos de 7 días cada uno; las temperaturas de operación se establecieron para los reactores 1, 3 y 5 en 45 °C y para los reactores 2 y 4 en 37 °C

|                      | Tiempo en días |        |        |        |        | Disminución total DQO (g/l) |
|----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------|
|                      | 0              | 7      | 14     | 21     | 28     |                             |
| <b>Biorreactor 1</b> | 123,00         | 111,25 | 92,46  | 77,30  | 66,61  | <b>56,39</b>                |
| <b>Biorreactor 2</b> | 145,50         | 131,56 | 126,35 | 110,23 | 108,00 | <b>37,50</b>                |
| <b>Biorreactor 3</b> | 123,76         | 119,25 | 107,22 | 93,40  | 82,10  | <b>41,66</b>                |
| <b>Biorreactor 4</b> | 155,80         | 153,52 | 135,74 | 127,16 | 118,48 | <b>37,32</b>                |
| <b>Biorreactor 5</b> | 131,50         | 128,43 | 113,06 | 100,78 | 91,06  | <b>40,44</b>                |

En lo referente al nitrógeno amoniacal extraíble, que significa el nitrógeno proteico contenido en los residuales, en la tabla 5, se muestran los resultados acumulativos que pueden influir en la obtención de biogás.

|                      | Tiempo en días |     |     |     |     | Nitrógeno amoniacal total producido (mg/l) |
|----------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|--|
|                      | 0              | 7   | 14  | 21  | 28  |  |
| <b>Biorreactor 1</b> | 335            | 350 | 393 | 428 | 495 | <b>160</b>                                 |
| <b>Biorreactor 2</b> | 387            | 478 | 542 | 640 | 790 | <b>403</b>                                 |
| <b>Biorreactor 3</b> | 411            | 490 | 540 | 630 | 720 | <b>309</b>                                 |
| <b>Biorreactor 4</b> | 304            | 390 | 420 | 690 | 820 | <b>516</b>                                 |
| <b>Biorreactor 5</b> | 260            | 456 | 530 | 610 | 680 | <b>420</b>                                 |

Biogás producido

En la figura 5, se puede observar la producción de biogás para cada uno de los reactores, con una composición del 60% de CH<sub>4</sub> y 40% de CO<sub>2</sub>, el biogás posee un poder calorífico de 5,335 Kcal/ m<sup>3</sup> de gas [12].

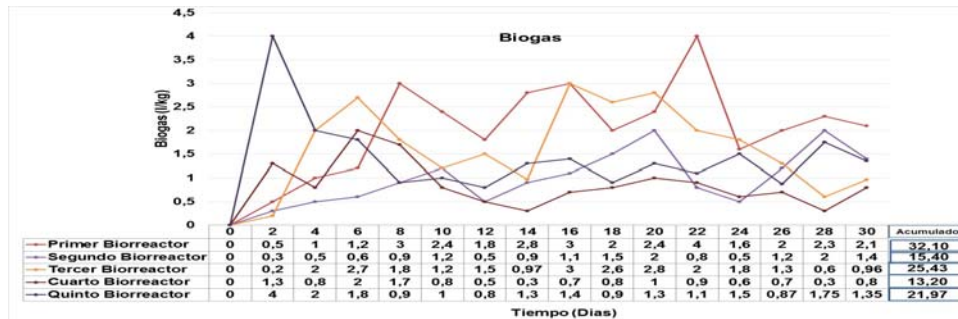


Fig. 5 Producción de biogás por reactor total en 30 días y por periodo de 2 días.

#### Evaluación de la sostenibilidad y daños a la salud

Se realizó una evaluación mediante la medición del impacto ambiental de los residuales en estudio utilizando la Matriz de Leopold [13 ,14], evitando el depósito de la parte sólida de esos residuales en tiraderos al aire libre y el depósito de las aguas residuales en lagunas de oxidación o afluentes; esto permite eliminar la contaminación del aire por emisiones de gases de efecto invernadero (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), del suelo y mantos freáticos (agua) por lixiviados y bacterias patógenas que contienen esos residuales. Para establecer los valores del impacto ambiental se utiliza un rango de -5 como el más severo y +5 como el más benéfico, estableciendo un factor en razón de la importancia del rubro en cuestión, en la tabla 6 se muestra el resultado con la Matriz de Leopold. Con el resultado se puede observar que con la eliminación de los residuos sólidos orgánicos y el estiércol de ganado y las aguas residuales municipales en los afluentes y lagunas de oxidación se obtiene un alto impacto ambiental benéfico. Vea tabla 6.

#### Resultados del balance de masa y energía en el proceso

Para efectos de este trabajo, los signos positivos representan efectos positivos y los negativos efectos negativos dentro de la ecuación (1), que significa la ecuación general del proceso.

Además, se establecieron como criterios que:

- 1 kg de materia orgánica ofrece 0,03 m<sup>3</sup> de biogás (40% CO<sub>2</sub> + 60% CH<sub>4</sub>); 0,06 kg de biofertilizante (con 79,7% de humedad)
- 1 m<sup>3</sup> de biogás ≈ 0,65 m<sup>3</sup> de gas natural ≈ 0,55 l de diésel ≈ 0,71 l de gasolina ≈ 0,45 l de gas licuado del petróleo ≈ 2,1 kWh de energía eléctrica renovable (potencial)
- 1 kg de materia orgánica ≈ 2,500 Kcal ≈ 2,9 kWh de generación eléctrica
- 1 kg de fertilizante requiere de 0,04364 kWh de electricidad para su producción

Las emisiones por transporte son:

- 1 litro de gasolina utilizado proporciona 2,3 kg de CO<sub>2</sub> densidad 1,98 kg/m<sup>3</sup> = 1,161 m<sup>3</sup>
- 1 litro de diesel utilizado proporciona 2,6 kg de CO<sub>2</sub> densidad 1,98 kg/m<sup>3</sup> = 1,313 m<sup>3</sup>

Emisiones por consumo eléctrico el consumo de 1 kWh proporciona 0,267 kg de emisiones de dióxido de carbono, es decir 0,135 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>. Se considera que no hay incremento en emisiones de gases de efecto invernadero con la quema del biogás obtenido de la biomasa debido a que el dióxido de carbono originado se encuentra dentro del balance natural (2) y los biofertilizantes, acorde a los resultados, se encuentran libres de patógenos. Se considera la producción del biorreactor 3 que corresponde a 25,43 l/kg de biogás y 309 mg/l de nitrógeno amoniacal, con una carga inicial de 1,335 kg de restos de cocina, 1,327 kg de estiércol de vaca, 1,329 kg de lodos digeridos y 4,850 kg de agua. La humedad de la biomasa introducida fue de 79,7 %, lo que significa el 20,3 % de sólidos totales, es decir 0,810 kg de materia orgánica seca. Al no existir recorrido de recolección, el valor del combustible utilizado en la recolección (combreco) se considera cero, por lo que la ecuación general del sistema que sirve de base para los cálculos está dada acorde a la ecuación (1):

$$\varepsilon = \text{combproc} + \text{bioftrat} + \text{biofnitr} - [\text{eutpro} + \text{aguaut}] \dots \text{ecuación (1)}$$

Utilizando las equivalencias consideradas, se establecen los valores de cada una de las variables de la ecuación (1), mismos que se muestran en la tabla 7. Sustituyendo en la ecuación 1 los valores obtenidos de cada una de las variables, se obtienen los

resultados (8) del aporte del sistema en lo referente a su potencial energético, su reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando que el metano tiene 21 veces el efecto del dióxido de carbono y su aporte económico utilizando el precio existente de la energía o energéticos y los biofertilizantes en el mercado mexicano, para el tiempo en que se calcula, para este caso se consideran los precios en pesos mexicanos del litro de diésel = \$13.77, del kWh de consumo básico de electricidad = \$0.583, el litro de fertilizante líquido = \$30.00, el kilogramo de biofertilizante sólido = \$40.00 y un costo del agua = \$10.00 por m<sup>3</sup>. En la tabla 7, se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 6 Matriz de Leopold con valoración del impacto ambiental por factor, tipología y total**

| FACTORES AMBIENTALES                     |                                    | Persistencia          |             | Efectos   |            | Acumulación | Reversibilidad | Recuperabilidad | Área de influencia | implic. Econ., Soc., cult., pol. | Valor del factor | Factor de peso para impacto | Valor total del impacto del factor |
|--|------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------|------------|-------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------------------------|
|  |                                    | Corto plazo           | Largo plazo | Directos  | Indirectos |             |                |                 |                    |                                  |                  |                             |                                    |
| MEDIO AMBIENTE Y PERCEPTUAL              | Calidad del Aire                   | -2                    | 4           | -1        | 4          | 4           | 2              | 3               | 2                  | 4                                | 20               | 0,13                        | 2,6                                |
|  | Ruido                              | -2                    | 3           | -1        | 2          | 2           | 2              | 2               | 2                  | 2                                | 12               | 0,1                         | 1,2                                |
|  | Visibilidad                        | -2                    | 4           | -1        | 3          | 4           | 0              | 3               | 2                  | 4                                | 17               | 0,1                         | 1,7                                |
|  | Características de Drenaje natural | -1                    | 3           | 1         | 3          | 0           | 1              | 3               | 2                  | 2                                | 14               | 0,1                         | 1,4                                |
|  | Calidad del Agua                   | 2                     | 3           | 3         | 2          | 2           | 2              | 3               | 2                  | 2                                | 21               | 0,13                        | 2,73                               |
|  | Uso del Suelo                      | 2                     | 3           | 1         | 1          | 1           | 0              | 1               | 2                  | 3                                | 14               | 0,11                        | 1,54                               |
|  | Calidad del Suelo                  | 2                     | 4           | 2         | 4          | 0           | 3              | 2               | 2                  | 3                                | 22               | 0,13                        | 2,86                               |
|  | Erosión                            | -1                    | 3           | 2         | 2          | 0           | 1              | 2               | 2                  | 1                                | 12               | 0,1                         | 1,2                                |
|  | Modificación del Relieve y Paisaje | 2                     | 3           | 2         | 1          | 0           | 1              | 2               | 2                  | 1                                | 14               | 0,1                         | 1,4                                |
|  | BIÓTICOS                           | Pérdida de Vegetación | -1          | 3         | 1          | 3           | 2              | 2               | 2                  | 2                                | 1                | 15                          | 0,3                                |
| Formación de hábitat                     |                                    | 1                     | 2           | 1         | 3          | 2           | 2              | 2               | 2                  | 2                                | 17               | 0,2                         | 3,4                                |
| Afectación a la Fauna                    |                                    | -1                    | 3           | 1         | 2          | 2           | 2              | 2               | 2                  | 2                                | 15               | 0,3                         | 4,5                                |
| Formación de hábitat                     |                                    | -1                    | 3           | 1         | 2          | 2           | 2              | 2               | 2                  | 2                                | 15               | 0,2                         | 3                                  |
| SOCIO ECONÓMICOS                         | Mano de Obra                       | 2                     | 4           | 4         | 2          | 2           | 0              | 1               | 2                  | 4                                | 21               | 0,1                         | 2,1                                |
|  | Cambio de Patrón de Vida           | 2                     | 4           | 4         | 2          | 2           | 0              | 1               | 2                  | 4                                | 21               | 0,2                         | 4,2                                |
|  | Salud Pública                      | 2                     | 4           | 4         | 3          | 3           | 0              | 2               | 2                  | 3                                | 23               | 0,3                         | 6,9                                |
|  | Economía Local                     | 2                     | 4           | 4         | 3          | 3           | 0              | 2               | 2                  | 3                                | 23               | 0,1                         | 2,3                                |
|  | Calidad de Vida                    | 2                     | 4           | 4         | 2          | 2           | 0              | 2               | 2                  | 3                                | 21               | 0,3                         | 6,3                                |
| <b>VALOR DE LA TIPOLOGÍA DE IMPACTOS</b> |                                    | <b>8</b>              | <b>61</b>   | <b>32</b> | <b>44</b>  | <b>33</b>   | <b>20</b>      | <b>37</b>       | <b>36</b>          | <b>46</b>                        | <b>317</b>       | <b>3</b>                    |                                    |
| <b>VALOR TOTAL DEL IMPACTO AMBIENTAL</b> |                                    |                       |             |           |            |             |                |                 |                    |                                  |                  |                             | <b>39,8</b>                        |



Evaluación energética, de emisiones y económica del proceso anaerobio de los residuales

Luego de evaluar la sostenibilidad y la mitigación de los daños a la salud con la utilización del proceso anaerobio, por medio del análisis sobre la producción de biogás, se efectúa el análisis energético, de emisiones y económico del proceso de los residuales considerados. Para ello, se realiza un balance de masa y energía en el proceso y se determinan los efectos positivos y negativos del proceso, que se muestran en la tabla 7.

| <b>Tabla 7. Valores de las variables para la evaluación del potencial energético, la reducción de emisiones y el aporte económico del proceso por cada 0,810 kg de masa seca</b> |                 |                           |  |                                     |
|--|-----------------|---------------------------|--|-------------------------------------|
| Efecto del proceso   | Variable        | Valores                   |  |                                     |
|  |                 | Potencial energético (kJ) | Reducción de emisiones (m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> ) | Balance económico (pesos mexicanos) |
| Combustible obtenido del proceso (biogás)  | <i>combprac</i> | <b>487,21</b>             | <b>0,30618</b>   | <b>0,18</b>                         |
| Composta libre de patógenos (biofertilizante)  | <i>bioftrat</i> | <b>7,64</b>               | <b>0,000515</b>  | <b>3,49</b>                         |
| Agua con nitrógeno amoniacal (biofertilizante)   | <i>biofutr</i>  | <b>788,60</b>             | <b>0,02954</b>   | <b>150,45</b>                       |
| Energía eléctrica utilizada en el proceso  | <i>eeutpra</i>  | <b>-324,31</b>            | <b>-0,01215</b>  | <b>-0,05</b>                        |
| Agua utilizada en el proceso   | <i>aguaut</i>   | <b>0,00</b>               | <b>0,00</b>  | <b>-0,05</b>                        |
| <b>Total (€)</b>   |                 | <b>959,14</b>             | <b>0,323856</b>  | <b>154,02</b>                       |

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la investigación revelan que, el proceso anaerobio de la codigestión de las biomásas residuales en estudio ofrece:

En primera instancia, desde el punto de vista cualitativo, un alto impacto positivo ambiental, según la Matriz de Leopold, con valor de +39,8 en la escala de -45 a +45, lo que se refleja en la salud al eliminar los microorganismos patógenos que poseen; en el nivel de vida de las personas por el incremento de la calidad del medio ambiente y la posibilidad de empleos que representa el proceso.

En segunda instancia, con un enfoque cuantitativo, se observa una considerable disminución de emisiones de gases de efecto invernadero de 0,323856 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> y \$154,02 pesos mexicanos por cada 0,810 kg de masa seca, lo que representa la obtención de una alta posibilidad energética y una considerable ganancia económica, considerando que, por un lado la producción de residuos sólidos orgánicos urbanos en Coatzacoalcos es del 41,4% del total de las 201.217 t/año de residuos sólidos urbanos, lo que hace un promedio diario (considerando 365 días) de 228,23 toneladas [13, 15], y por otro la producción de 21 t/día de estiércol en 2 lugares cercanos al Aeropuerto de Coatzacoalcos con 800 terneros y 200 vacas [14, 16] y, de 6.38 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales municipales no tratadas que representan el 53.2% del total del residual en el estado de Veracruz [17-18].

## CONCLUSIONES

El proceso de codigestión de las biomásas residuales propuesto, aún sin optimizar ni extrapolarlo con las cantidades que se generan en las diferentes localidades, ofrece una solución al problema que significan los residuales considerados en la investigación; con grandes beneficios en la calidad de vida, el medio ambiente, la sustitución en una parte del uso de combustibles fósiles y una alta posibilidad económica, además de reducir la presión sobre los rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, así como lagunas de oxidación al aire libre o vertederos en afluentes que solo causan erogaciones y afectaciones en el medio ambiente y la calidad de vida.

## REFERENCIAS

- [1] Starr, K.; Villalba, G.; Gabarrell, X. "Upgraded biogas from municipal solid waste for natural gas substitution and CO<sub>2</sub> reduction – A case study of Austria, Italy, and Spain". *Waste Management*, 2015, vol. 38, p. 105 - 116, [consulta: febrero 2016], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15000094](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15000094), ISSN 0956-053X.
- [2] Tian, Hailin; Duan, Na; Ling, Cong; Li, Xue; Zhong, Mingzhu. "Anaerobic Co-digestion of kitchen waste and pig manure with different mixing ratios". *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2015, vol 120, n.1, p. 51-57, [consulta: febrero 2016], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389172314004563](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389172314004563), ISSN 1389-1723.
- [3] Lamas, W. Q.; Silveira, J. L.; Giacaglia, G. E. O.; Reis, L. O. "Development of a methodology for cost determination of wastewater treatment based on functional diagram". *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol 29, n. 10, p. 2061-2071, [consulta: octubre 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108004353](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108004353), ISSN 1359-4311.
- [4] Abusoglu, Aysegul; Demir, Sinan; Kanoglu, Mehmet. "Thermoeconomic assessment of a sustainable municipal wastewater treatment system". *Renewable Energy*, 2012, vol 48, p. 424-435, [consulta: enero 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112003552](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112003552), ISSN 0960-1481.
- [5] Gnaneswar Gude, Veera "Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 45, n. 45, p. 52-68, [consulta: octubre 2015], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000659](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000659), ISSN 1364-0321.
- [6] Cerda Balcazar, Juan G.; Alves Dias, Rubens; Perrella Balestieri, José A. "Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities". *Energy*, 2013, vol 55, p. 728-741, [consulta: marzo 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213001047](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213001047), ISSN 0360-5442.
- [7] Seckin, Candenz; Bayulken, Ahmet R. "Extended Exergy Accounting (EEA) analysis of municipal wastewater treatment – Determination of environmental remediation cost for municipal wastewater". *Applied Energy*, 2013, vol 110, p. 55-64, [consulta: marzo 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913003371](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913003371), ISSN 0306-2619.
- [8] De Meester, Steven; Demeyer, Jens; Velghe, Filip; Peene, Andy; Van Langenhove, Herman; Dewulf, Jo. "The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology". *Bioresource Technology*, 2012, vol 121, p. 396-403, [consulta: marzo 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412010231](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412010231), ISSN 0960-8524.
- [9] Spachos, Thomas; Anastassios, Stamatis. "Thermal analysis and optimization of an anaerobic treatment system of whey". *Renewable Energy*, 2011, vol 36, n. 8, p. 2097-2105, [consulta: enero 2014], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000425](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000425), ISSN 0960-1481.
- [10] Ahern, Eoin P.; Deane, Paul; Persson, Tobias; Ó Gallachóir, Brian; Murphy, Jerry D. "A perspective on the potential role of biogas in smart energy grids". *Renewable Energy*, 2015, vol 78, p. 648-656, [consulta: mayo 2016], Disponible en [www.dbfz.de/fileadmin/user\\_upload/Referenzen/Studien/Smart\\_Grids\\_Final\\_web.pdf](http://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/Smart_Grids_Final_web.pdf), ISSN 0960-1481.
- [11] Zhen, Guangyin; Lu, Xueqin; Kobayashi, Takuro; Li, Yu-You; Xu, Kaiqin; Zhao, Youcai. "Mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge and *Egeria densa*: Performance assessment and kinetic analysis" *Applied Energy*, 2015, vol 148, p. 78-86, [consulta: mayo 2016], Disponible en [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915003220](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915003220), ISSN 0306-2619.
- [12] Gutiérrez García, Guadalupe de J.; Moncada Fernández, Iram; Mesa Montenegro, María M.; Félix Fuentes, Anacleto; Balderas Cortés, José de J.; Gortáres Moroyoqui, Pablo. "Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía". *Ide@s CONYTEG*, 2012, vol. 7, n. 85, p. 881 - 894 (890), [consulta: mayo 2016], Disponible en <http://www.semanaciencia.guanajuato.gob.mx/ideasConcyteg>, ISSN 2007-2716.
- [13] Cotán-Pinto Arroyo, Sergio. "Valoración de Impactos Ambientales". *Metodologías Valor Impacto Ambiental*. 2007, INERCO, Ed., Sevilla:, p. 1-22. [consulta: mayo 2016]. Disponible en [http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:48150/componente48148.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:48150/componente48148.pdf)
- [14] Dellavedova, María Gabriela. Taller Vertical Meda Altamirano: Programa de Investigaciones del taller "Guía Metodológica para la Elaboración de una Evaluación de Impacto Ambiental". [La Plata]: Universidad Nacional de la Plata, 2011, 1ª ed., No 17. 38 p. [consulta: mayo 2016]. Disponible en <http://www.kpesic.com/sites/default/files/Ficha-17-GUIA-METODOLOGICA-PARA-LA-ELABORACION-DE-UNA-EIA.pdf>

- [15] Carabias Lillo, Julia; Provencio Durazo, Enrique; Sánchez Gómez, Jorge. "Estadísticas e Indicadores de inversión sobre residuos sólidos municipales en los principales centros urbanos de México" [México]: Talleres de Desarrollo Gráfico Editorial, S.A. de C.V., 2010 (actualización 2015). 61 p. [consulta: mayo 2016]. Disponible en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/>
- [16] Arellano, Lucrecia; Cruz Rosales, Magdalena; Huerta, Carmen. "El Estiércol: material de desecho, de provecho y algo más". I. d. E. A. México, Ed., Primera Edición ed., 2014, p. 21-35 ISBN 978-607-7579-42-7. [consulta: mayo 2016]. Disponible en [http://www1.inecol.edu.mx/cv/CV\\_pdf/libros/](http://www1.inecol.edu.mx/cv/CV_pdf/libros/)
- [17] De la Peña, María E.; Ducci, Jorge; Zamora Plascencia, Viridiana. "Tratamiento de AGUAS RESIDUALES en México". [México]: Banco Interamericano de Desarrollo, 2013. 41 p. [consulta: mayo 2016]. Disponible en <http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/>
- [18] 2014 Informe "Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento" [México]: CONAGUA, 2014. 345 p. [consulta: mayo 2016]. Disponible en <http://www.gob.mx/conagua/documentos>

## AUTORES

### **Florentino Sánchez Portilla**

Ingeniero Químico, Master en Termoenergética Industrial, Universidad Veracruzana, Campus de Coatzacoalcos, México  
e-mail: [fportilla@hotmail.com](mailto:fportilla@hotmail.com)

### **Roberto Vizcón Toledo**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas, Cuba  
e-mail: [roberto.vizcon@umcc.cu](mailto:roberto.vizcon@umcc.cu)