

ANÁLISIS EMERGÉTICO PARA LA REUTILIZACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SANTA CLARA-LIMA, PERÚ

Emergy analysis for the reuse of sewage sludge from the sewage plant Santa Clara-Lima, Peru

Connie Gálvez Durand¹

¹ Universidad Continental, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental
Correo electrónico: congadusayya@hotmail.com

Resumen— El presente trabajo tiene como objetivo determinar si el uso del análisis emergético permite la evaluación de la sostenibilidad del proceso de carbonización para la reutilización de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Santa Clara-Lima durante el año 2014 para la toma de decisiones ambientales. El método general utilizado fue el hipotético-deductivo, en el que, mediante la metodología del análisis emergético, se buscó valorizar cuantitativamente la sostenibilidad del proceso de carbonización para su reutilización. Como resultados se obtuvieron el Índice de Rendimiento Emergético (EYR) con un valor de 9,33; el Índice de Inversión Emergética (EIR) presentó un valor cerca al 0 (0,12); el Índice de Carga Ambiental (ELR) obtuvo un valor de 2,11, y, por último, el Índice de Sostenibilidad (ESI) con un valor de 4,4. Estos resultados indicaron que el proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara es sostenible, ya que hay un rendimiento económico-energético, es ambientalmente aceptable, dado que el proceso presenta un bajo estrés ambiental, y es económicamente viable (no genera pérdidas), esto debido a una mayor dependencia del proceso de recursos renovables (frente a los no renovables).

Palabras clave: Análisis emergético, emergía, sostenibilidad, lodos residuales, gestión ambiental, valorización ambiental, decisiones ambientales.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis emergético se presenta como una valiosa herramienta para conocer el desempeño energético, económico y ambiental de un sistema/proceso, por lo que valoriza la sostenibilidad mediante una serie de cálculos que resultan en índices emergéticos, los cuales se interpretan y dan alcances de los beneficios económicos, enérgicos y el comportamiento ambiental del proceso o sistema.

El método de análisis emergético presenta todo un marco conceptual, desde la perspectiva del trabajo que requiere el medio ambiente para dar soporte a la dinámica de un proceso/sistema. Esta metodología es considerada, en la actualidad, como uno de los pilares más fuertes en áreas afines a la economía ecológica y a la ingeniería ambiental. En el Perú esta herramienta no está muy difundida, a pesar de su potencial aplicación multidisciplinaria para valorar procesos, sistemas, productos, servicios, recursos, economías, etc. que comprometen la sostenibilidad.

Abstract— The present work has the objective to determine whether the use of Emergy Analysis allows the evaluation of the sustainability of the Carbonization Process, for the reuse of sewage sludge from the Wastewater Treatment Plant Santa Clara-Lima, during 2014, for environmental decision making. The general method used was deductive-hypothetical, through the application of the Emergy Analysis methodology, in order to quantitatively valorize the sustainability of the Carbonization Process for the sewage sludge reuse. The following results was obtained: the Emergy Yield Ratio (EYR) has a value of 9,33, the Emergy Investment Index (EIR) showed a value close to 0 (0,12), the Environmental Loading Ratio (ELR) obtained a value of 2,11, and finally, the Emergy Sustainable Index (ESI) has a value of 4,4. These results revealed that the Carbonization Process for the reuse of the sewage sludge from the Wastewater Treatment Plant Santa Clara is sustainable, indicating that the process has a low environmental impact, has an economic return and energy efficiency (without generating losses), since this process depends on more renewable resources.

Keywords: Emergy analysis, emergy, sustainability, sewage sludge, environmental management, environmental valorization, environmental decision making.

En otros países su aplicación se considera prioritaria en la etapa de diseño de cualquier proyecto de gran envergadura [1], pues evalúa de forma anticipada los impactos ambientales, promoviendo el principio de prevención porque se evita que éstos ocurran.

En la investigación se evalúa la aplicación del método del análisis emergético para conocer la sostenibilidad de la alternativa de reutilización de los lodos residuales, mediante el proceso de carbonización, de la PTAR Santa Clara (en la ciudad de Lima), con el objetivo de conocer si el método del análisis emergético se puede utilizar para evaluar estos proyectos y si la alternativa propuesta es sostenible. Cabe resaltar que hasta la fecha no se ha realizado la aplicación de esta metodología en el Perú para evaluar la alternativa de carbonización de los lodos residuales generados en una PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales). La presente investigación es pionera en el desarrollo y aplicación del análisis emergético en el Perú para este sistema.



Un factor adicional del que se quiso tener conocimiento es sobre la metodología adecuada para el cálculo de la emergencia de los lodos residuales. Debido a que éstos son un coproducto, junto con las aguas tratadas, del sistema de tratamiento de aguas residuales, es importante calcular de forma adecuada su valor de transformicidad, para conocer su emergencia contenida, ya que esta contribuye relevantemente a la contabilidad emergética total del proceso de carbonización (proceso en evaluación). Además, esta es la entrada principal y de mayor significancia al sistema, a razón de que es el material al que se le pretende dar una reutilización y tratamiento, así mismo, se pretende conocer la influencia que tiene en los resultados de los índices emergéticos.

En la literatura se encontraron dos autores que proponen diferentes metodologías para el cálculo del valor de transformicidad de coproductos [2, 3]. A partir de estos estudios, se proponen escenarios (cuatro) para calcular el valor de transformicidad de los lodos residuales y se discute su influencia en los resultados reflejados en los índices emergéticos.

Los resultados que se obtuvieron demostraron que la metodología propuesta por Kamp y Ostergard [2] no dan valores que puedan ser interpretados por los índices de la emergencia tradicional. Sin embargo, la metodología sugerida por Bala [3] arroja resultados interpretables por los índices emergéticos tradicionales, por ello es que se validó a esta metodología como la adecuada para el desarrollo del estudio y sus valores fueron tomados para interpretar los valores de sostenibilidad del proceso.

Al validar la metodología de Bala [3], se propuso el cuarto escenario (SW-4) para conocer la influencia de la sostenibilidad del proceso origen de un coproducto, el cual es una entrada para el proceso en evaluación, para ello se reemplazó la energía eléctrica (energía comprada) utilizada en el proceso de tratamiento de aguas residuales (proceso origen) por energía fotovoltaica (energía renovable), con el fin de conocer cuánto influye en el índice de sostenibilidad del proceso evaluado el uso de recursos renovables (energías más limpias).

Los resultados de este escenario evidenciaron que la sostenibilidad del proceso en evaluación depende de la sostenibilidad de los procesos que dieron origen a los recursos intervinientes. Esto representa un análisis profundo y confirma el enfoque sistémico del análisis emergético, lo que invita a analizar y mejorar las prácticas que anteceden al proceso en evaluación para incrementar la sostenibilidad de éste. Sobre este punto, la investigación busca valorar y hacer un llamado a la estandarización de la metodología utilizada para calcular la emergencia contenida de un coproducto que es entrada a un sistema/proceso, ya que éste es decisivo en los resultados finales y la adecuada interpretación de los índices emergéticos y la importancia de la sostenibilidad de los procesos aguas arriba para la sostenibilidad del proceso en evaluación.

Se corroboró la hipótesis planteada "El uso del análisis emergético permite la evaluación de la sostenibilidad de la alternativa planteada, el proceso de carbonización, para la reutilización de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Santa Clara, mediante una valoración cuantitativa de la sostenibilidad a través de los índices emergéticos, a través de la conversión a unidades comunes, de los flujos de energía, masa, y dinero, para la toma de decisiones sostenibles".

II. CONCEPTOS BÁSICOS

A. Calidad de energía

La calidad de la energía se basa en que los diferentes tipos de energía varían en su capacidad para realizar trabajo. Un ejemplo muy utilizado para explicar este fenómeno es que 1 joule de carbón y 1 joule de electricidad, aunque representan la misma cantidad de energía (1 joule), no representan la misma calidad de energía, ya que el potencial que tienen estos distintos tipos de fuentes de energía, actúan de forma distinta en un sistema al generar trabajo, por ejemplo algunos sistemas necesitarán recibir mayor o menor cantidad de energía, poco o mayor concentrada según sus necesidades para generar un trabajo específico [4], [5].

B. Emergencia

La emergencia se define como la energía solar usada directa o indirectamente para generar un producto o servicio. Es decir, es la cantidad de energía solar total que se invirtió o que es necesaria para generar ese bien o producto, las unidades de la emergencia son los joules equivalentes solares (sej) [1], [5]. Así la unidad de emergencia solar es la medida de las contribuciones ambientales (de materiales, recursos energéticos y sociales) que se invirtieron para la obtención del producto o servicio [5].

La emergencia se traduce como "memoria energética", pues se trata de calcular el costo en términos energéticos solares del conjunto de materiales y recursos usados en generar determinado producto o servicio (memoria de cuanto sol se invierte para la creación de ese producto o servicio). Se puede decir, entonces, que el valor emergético de un producto no es la energía que contiene el producto, sino la cantidad de energía que ha sido usada en la creación del producto o servicio [1].

C. Análisis (síntesis) emergético

En la década de los noventa surge una idea que integra la economía y la ecología, la síntesis emergética, lograda del trabajo de Howard. T. Odum, y Alfred J. Lotka en sus intentos de integrar sistemas ecológicos y económicos en términos cuantitativos, empleando la energía como lenguaje común. El análisis emergético o síntesis energética es una técnica de evaluación cuantitativa, de valoración ambiental, que determina la cantidad de emergencia directa o indirecta, de una clase, que ha sido usada durante cierto proceso para generar servicios y productos de diferentes calidades, basada en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero. Se puede considerar un sistema de contabilidad y de gestión ambiental; es decir, este método permite estimar el valor de los distintos componentes del sistema (contabilidad) y, de acuerdo al propio método, va a definir unas condiciones de sostenibilidad, proporcionando una serie de índices para evaluar esta última y realizar la toma de decisiones ambientales (gestión) [1], [5].

Es primordial hacer la aclaración sobre la selección de la energía solar como la energía de referencia, pues en el análisis emergético, ésta es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecósfera (ecosistema global de la Tierra), es decir, en la Tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero, debido a que fluye en el espacio y tiempo, tiene una baja calidad en comparación a otras formas de energía de la Tierra derivadas desde ésta [1].

El análisis emergético se ha aplicado para realizar diversas evaluaciones, como la evaluación de la emergencia proveniente del sistema terrestre, como recursos ambientales y comprados, de combustibles, de la electricidad, para evaluar servicios, emergencia entrante por área, alternativas de desarrollo, emergencia de estados y naciones, de información, importaciones, servicios humanos, entre otros. Gracias a estos estudios, se ha generado una gran base de datos de la emergencia de muchos recursos, sistemas, procesos, productos y servicios, lo que permite tener cada vez mayores alcances de investigación mediante la aplicación de la síntesis emergética.

D. Transformicidad

A más transformaciones de energía que contribuyan a un producto/servicio, mayor es su transformicidad. Esto gracias a que para cada transformación, se utiliza energía disponible para producir una pequeña cantidad de energía de otro tipo, por lo tanto, aquel producto ocupa una mayor posición correspondientemente en la jerarquía de la energía [5]. De esta manera, la transformicidad se puede utilizar como valor de relación en la jerarquía de energía para indicar la calidad de la energía y su posición jerárquica [5].

Para poder transformar las diferentes calidades de energía a la calidad de energía solar correspondiente (emergencia), se usa un factor de equivalencia, la transformicidad, la cual informa qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesaria para generar una unidad de energía de mayor calidad [5]. La transformicidad tiene unidades de seJ/ unidad de energía.

La transformicidad es un indicador de las contribuciones del pasado ambiental que se han combinado para crear un recurso, así como el efecto potencial de un sistema que será el resultado de la utilización de ese recurso. Entonces, cuando la emergencia es utilizada previamente para hacer un producto se divide por la energía en el producto y deriva la transformicidad de ese producto [4].

E. Indicadores emergéticos

Para la interpretación de los resultados se calculan índices que explican el estado del sistema y permitan compararlo con otro. El modelo de la síntesis emergética proporciona diversos índices que permiten evaluar el estado del sistema y su sostenibilidad y apoyan en la toma de decisiones de gran trascendencia, introduciendo una nueva perspectiva en los análisis. El cálculo de una serie de índices del estado del sistema nos da información sobre diversas características del sistema estudiado, permite establecer comparaciones entre varios escenarios del manejo de un sistema, así como entre diversos sistemas y, por tanto, sirven de apoyo a la gestión. Igualmente, ayuda a evaluar la sostenibilidad del sistema, siempre dentro de los criterios del método [6].

EIR (Emergy Investment Ratio): Es el índice de inversión energética; es la relación que hay entre la entrada de los recursos importados al sistema sobre la suma de los recursos renovables y no renovables.

$$EIR = F / (R + N)$$

Donde:

R: Recursos renovables.

N: Recursos no renovables.

F: Recursos comprados.

Cuanto menor sea este índice, más bajo será el costo económico del proceso. Así la alternativa que presente un menor índice tiende a ser más competitiva y a prosperar en el mercado. Generalmente cuanto mayor es la relación, mayor es el nivel de desarrollo económico del sistema.

EYR (Emergy Yield Ratio): Es el índice de rendimiento emergético; indica la relación que hay entre la emergencia total del sistema sobre los recursos importados. Este índice es usado para estimar la dependencia que tiene el proceso sobre los recursos importados o comprados y para mostrar la contribución del capital natural local en la economía de la región o el proceso.

$$EYR = 1 + 1/EIR$$

Bajos valores de EYR indican un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; por el contrario, altos valores de EYR indican la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico. Es decir, cuanto mayor es este índice, mayor será la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema. Este índice también muestra qué tan eficientemente el sistema usa los recursos locales que tiene disponible. Simultáneamente revela la capacidad de un proceso para explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior.

EYR < 5 indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios; materias primas como cemento, acero entre otros. EYR > 5 indica la utilización de recursos energéticos primarios y EYR < 2 indica que no hay contribución significativa de recursos locales y están asociados a procesos casi completamente manufacturados. Cuanto más alto es el índice de producción emergético, más energía está proporcionando un proceso al sistema frente a la que retira. ELR (Environmental Loading Ratio): Es el índice de carga ambiental, hace referencia a la relación que hay entre las entradas de los recursos no renovables al sistema y los recursos importados sobre los recursos renovables.

$$ELR = (F + N) / R$$

Los valores bajos de ELR indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental. Cuando el ELR > 10 hay una alta carga ambiental y cuando el 3 < ELR < 10 el impacto es considerado moderado. Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente y aquellos procesos muy tecnológicos.

ESI (Emergy Sustainable Indices): Es el índice de sostenibilidad; indica la relación que hay entre el índice de rendimiento emergético y el índice de carga ambiental. Este índice refleja la capacidad que tiene un sistema para suministrar productos o servicios con un mínimo estrés ambiental y un máximo beneficio económico.

$$ESI = EYR / ELR$$

Cuando el ESI < 1 el proceso no es sostenible a largo plazo, cuando el 1 > ESI > 5 se presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo. Con un ESI > 5 el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. Pero es incorrecto pensar que entre mayor sea este índice, mucho mayor es la sostenibilidad del proceso.



III. RESULTADOS DEL TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se muestran los resultados del análisis emergético del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara. En primer lugar, se presenta el Diagrama de Balance de Materia y Energía (Figura 1), los valores del balance permiten hacer los cálculos del análisis emergético, ya que proporcionan los requerimientos de los recursos que necesita el proceso (en unidades de joules, gramos o dinero por año).

Luego, se presenta el Diagrama de Análisis Emergético del Proceso de Carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara (Figura 2), que es la representación gráfica del funcionamiento del proceso, el cual permite conocer los componentes principales del sistema, los flujos y sus interacciones.

En seguida, se presenta la Tabla de Transformicidades (Tabla 1) asignadas a los recursos identificados en el Diagrama Emergético, que serán analizados y sus respectivas referencias, esto con el objetivo de facilitar la ubicación del estudio que desarrolló el valor, siguiendo las pautas recomendadas por la metodología del análisis emergético, para la estandarización de la presentación de resultados.

A fin de conocer la influencia de las metodologías en el análisis emergético, se plantean cuatro escenarios, con el objetivo de conocer la compatibilidad y las diferencias de las propuestas sugeridas (por los investigadores) con la teoría y las prácticas de la emergía tradicional y presentar una discusión de los valores reflejados en los índices emergéticos.

En la investigación, tenemos al Sistema de Tratamiento de Agua (de la PTAR Santa Clara), a partir del cual se generan dos principales coproductos: las aguas tratadas y los lodos residuales; el primero considerado como el producto final del proceso y el segundo, como un residuo, el cual hace de entrada para el proceso de carbonización (alternativa planteada para realizar el análisis emergético)

El escenario 1 (SW1) y el escenario 2 (SW2) se basan en las metodologías propuestas por Kamp y Ostergard [2]; mientras que el escenario 3 (SW3) se realiza de acuerdo a la metodología tradicional del análisis emergético (Bala y otros, 2015); para el escenario 4 (SW4) también se usó la metodología tradicional de Bala [3], lo que se varió en este escenario es la emergía atribuida por el recurso comprado de electricidad (recurso comprado), el cual se reemplazó por el recurso renovable de energía fotovoltaica, con el fin de conocer la medida en que la sostenibilidad varía cuando el proceso de origen del coproducto (s) evaluado depende de más recursos renovables.

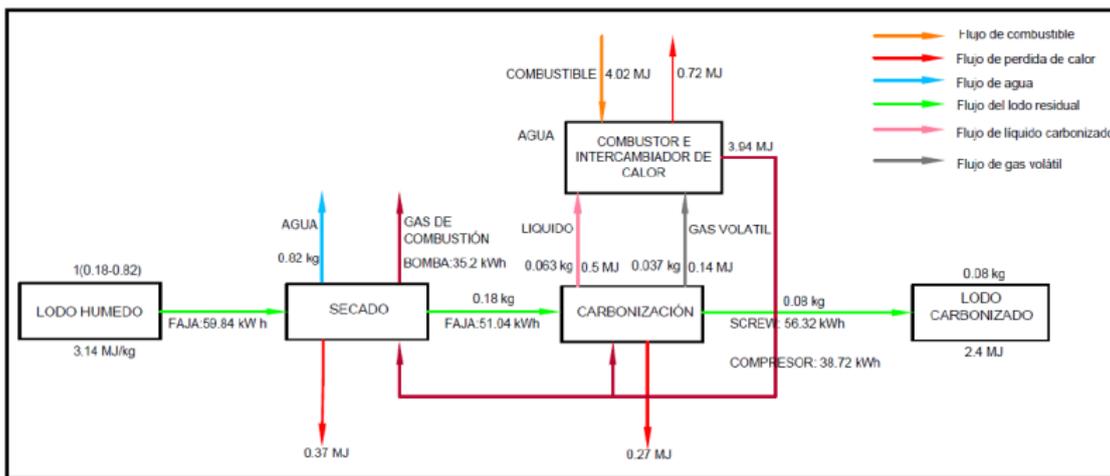


Figura 1. Diagrama de balance de materia y energía del proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara. Elaboración propia

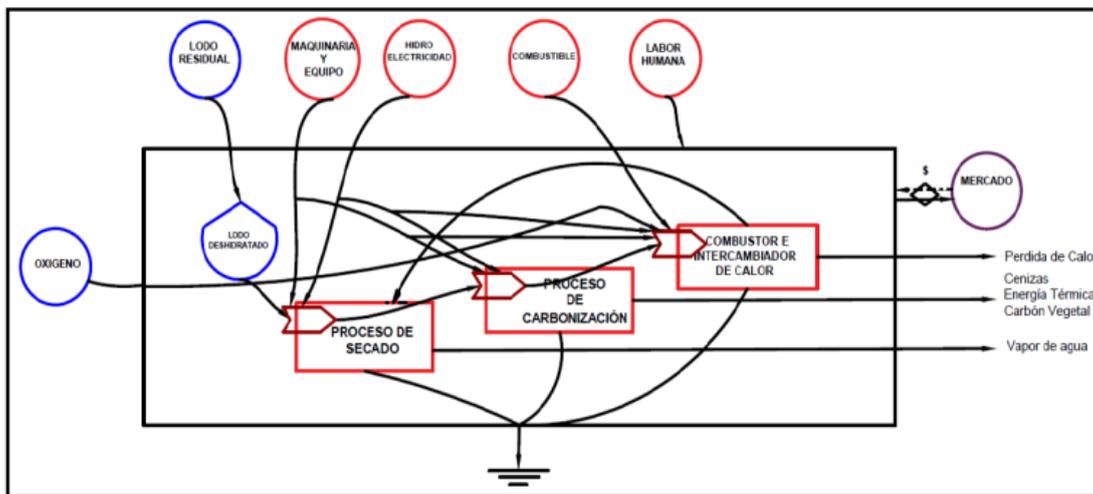


Figura 2. Diagrama de análisis emergético del proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara. Elaboración Propia



Tabla 1. Transformicidades usadas en el análisis emergético y referencias

Ítem	Transformicidad	Referencia
Lodo residual seco	2,30 E + 13	Ulgati y otros, 2014
Oxígeno	5,16E+07	Ulgati y Brown, 2002
Hidroelectricidad	2,67E+05	Siche y Ortega, 2007
Maquinaria y equipo	1,13E+10	Winfrey y Tilley, 2015
Labor humana	7,24E+06	Odum, 1996
Combustible (gas natural)	5,88E+04	Siche y Ortega, 2007

Elaboración propia.

A continuación, se encuentran las tablas 2 y 3 del análisis emergético para el proceso de carbonización, donde, a partir de los datos del balance de materia y energía, se convierten las unidades de los recursos, mediante sus valores de transformicidad respectivos, en unidades de emergía.

También se realiza el cálculo de la emergía de los lodos residuales según los cuatro escenarios (SW1, SW2, SW3, SW4) para el cálculo de su transformicidad, es por ello que es el único ítem cuyos valores varían.

IV. RESULTADOS FINALES

En la tabla 4 se observa el Índice de Rendimiento Emergético (EYR) para el proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara con un valor de 9,33 que supera el límite superior de 5. Mientras más alto sea este índice, más energía proporcionará al proceso frente a lo que se retira. Por lo tanto el proceso de carbonización es energéticamente rentable porque presenta un buen rendimiento emergético y, por ende, un buen rendimiento económico.

Tabla 2. Evaluación emergética del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara

Nota	Ítem	Recurso (R.N.F)	Unidades (J.go \$)	Data (Unidad/año)	Emergía solar / Unidad (sej/unidad)	Emergía solar (sej/año)	Em \$ (\$/año)
1	Escenario SW1 (lodo residual seco)	R	J	2,01 E+08	1,187 E+13	2386	2,36 E+8
	Escenario SW2 (lodo residual seco)	R	J	2,01 E+08	6,83 E+12	1373	1,36 E+8
	Escenario SW3 (lodo residual seco)	R	J	-	-	12,1	1,20 E+06
	Escenario SW4 (lodo residual seco)	R	J	-	-	13,4	1,34 E+06
2	Oxígeno	R	G	512474 2560	5,06 E+07	0,259	2,56 E+04
3	Hidroelectricidad	F	J	1,41 E+13	2,67 E+05	3,76	3,72 E+05
4	Maquinaria y equipo	F	g	266700 0	1,13 E+10	0,03	2,97 E+03
5	Labor humana	F	J	3,19 E+10	7,24 E+06	0,231	2,11 E+04
6	Combustible (gas natural)	NR	J	2,06 E+14	5,88 E+04	22,11	2,19 E+06

Elaboración propia.

Tabla 3. Cálculo de los índices emergéticos del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara (escenarios SW1; SW2; SW3; SW4)

Índice emergético	Valores				Intervalos
	SW1	SW2	SW3	SW4	
R	2386	1373	12,36	13,70	
N	22,11	22,11	22,11	22,11	
F	4,02	4,02	4,02	4,02	
U	2412	1399	38,49	39,79	
EYR (Energy Yield Ratio)	599,8	348,22	9,33	10,09	2 < 5
EIR (Energy Investment Ratio)	0,002	0,003	0,12	0,11	+ < -
ELR (Enviromental Loading Ratio)	0,01	0,02	2,11	1,91	3 < 10
ESI (Energy Sustainability Index)	59980	17410	4,42	5,28	1 < 5

Fuente: Elaboración propia.





Tabla 4. Cálculo del índice de rendimiento emergético (EYR) del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara

Índice emergético	Valores	Intervalo
R	12,359	
N	22,11	
F	4,02	
U	38,49	
EYR (Energy Yield Ratio)	9,33	2<>5

Elaboración propia

Tabla 5. Cálculo del índice de inversión emergética (EIR) del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara

Índice emergético	Valores	Intervalo
R	12,359	
N	22,11	
F	4,02	
U	38,49	
EIR (Energy Investment Ratio)	0,12	+<>-

Elaboración propia

Tabla 6. Cálculo del índice de carga ambiental (ELR) del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara

Índice emergético	Valores	Intervalo
R	12,359	
N	22,11	
F	4,02	
U	38,49	
ELR (Environmental Loadign Ratio)	2,11	3<>10

Elaboración propia

Tabla 7. Cálculo del índice de sostenibilidad (ESI) del proceso de carbonización para la reutilización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara

Índice emergético	Valores	Intervalo
R	12,359	
N	22,11	
F	4,02	
U	38,49	
ESI (Energy Sustainability Index)	4,42	1<>5

Elaboración propia

El índice de inversión emergética (EIR) (ver tabla 5) exhibe el valor que se encuentra cerca al 0. Esto indica que la alternativa de carbonización tiene un bajo costo económico, que lo hace competitivo.

Esto quiere decir que el proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara necesita poca inversión para llevarse a cabo; es decir, la energía atribuida a los recursos importados (F) respecto a la energía total es muy baja.

El índice de carga ambiental (ver tabla 6) para el proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara es bajo, con un valor de 2,11, menor al límite inferior del intervalo (3). El proceso de carbonización es ambientalmente aceptable, pues que tiene altas entradas renovables.

El índice de sostenibilidad (ver tabla 7), que permite relacionar el aspecto ambiental (ELR) con el rendimiento emergético (EYR), muestra un valor de 4,4, se acerca al valor superior (5) del intervalo, lo que hace al proceso de carbonización de los lodos residuales sostenible a mediano plazo y con potencialidad a largo plazo.

El proceso de carbonización de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara es sostenible, porque tiene un rendimiento económico-energético y es ambientalmente aceptable, pues el proceso presenta un bajo estrés ambiental y económicamente es viable (no genera pérdidas), esto debido a la mayor dependencia del proceso de los recursos renovables y no de los no renovables (a largo plazo, solo sistemas con un alto porcentaje de energía renovable son sostenibles).

El análisis emergético hizo posible la evaluación de la sostenibilidad de la alternativa de reutilización, mediante el proceso de carbonización, de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Santa Clara-Lima. Asimismo, presenta un enfoque sistémico, ya que incluyó los flujos aguas arriba de los coproductos generados. Para esto, se evaluó conjuntamente a todos los procesos de producción, para conocer el costo ambiental real de producción del producto. De hecho, integra los aspectos fundamentales de la sostenibilidad: el económico, el ambiental y el energético.

Mediante los índices emergéticos, se pudo conocer la relación de los recursos intervinientes para el funcionamiento del proceso de carbonización. De esta forma, se obtuvo valores cuantitativos relacionados al rendimiento energético-económico, ambiental y de sostenibilidad, lo que permite realizar comparaciones con otros sistemas e identificar los recursos con más intervención en el sistema, lo que es una herramienta útil para proponer soluciones y mejoras objetivas para el desarrollo sostenible del sistema en cuestión, facilitando y promoviendo la toma de decisiones ambientales responsables.

Los lodos residuales, que por mucho tiempo han sido percibidos como un desecho sin valor en el momento de su coproducción, vienen demostrando muchas potencialidades para su reutilización. Estos estudios necesitan usar herramientas útiles que anticipen, prueben y justifiquen estas potencialidades, además de que integren los temas de interés de los stakeholders, que generalmente son el aspecto económico-social, ambiental y energético. El análisis emergético, además de integrar estos aspectos en su análisis, presenta una métrica de la sostenibilidad, lo que ayuda a interpretar resultados y, a la hora de querer hacer cambios para mejorar la sostenibilidad, saber cómo hacerlo y el grado de esta mejora, además del beneficio de contar con datos cuantitativos, permite compararlos con otras alternativas y sistemas.

Para este estudio solo se tomó en análisis el proceso de carbonización, mas no se consideraron el transporte, la esta-



bilización y presecado de los lodos residuales, entre otros aspectos, los cuales deben ser tomados en cuenta para un análisis integral y de mayor detalle del subsistema de reutilización de los lodos residuales (sub ya que se considera como sistema general al tratamiento de aguas residuales).

V. CONCLUSIONES

El comportamiento sostenible del sistema de tratamiento de las aguas residuales de la PTAR Santa Clara queda incompleto si no se gestiona integralmente la disposición/reutilización de los lodos residuales. Para propiciar un desarrollo sostenible es importante que la gestión se oriente a la mitigación de los impactos ambientales asociados a todas las salidas del sistema (desechos), al rendimiento energético y al desarrollo económico. Por ello, es indispensable la aplicación de nuevas alternativas que ayuden a controlar los impactos ambientales, gestionen un mejor rendimiento energético y a la vez sean una oportunidad para el desarrollo económico. El estudio (mediante los resultados arrojados por el índice de sostenibilidad) demostró que la alternativa planteada, la carbonización de los lodos residuales, es sostenible desde el punto de vista ambiental, energético y económico, ya que tiene un impacto ambiental bajo, un rendimiento energético y económico a mediano y largo plazo, por lo que presenta un gran potencial para su desarrollo práctico. Se contribuye así con los desafíos del Sistema Nacional de Gestión Ambiental con respecto al desarrollo sostenible, mediante la gestión adecuada de los recursos de un proceso/sistema para un óptimo desempeño ambiental.

La investigación demuestra que la metodología del análisis emergético es una herramienta útil para la gestión ambiental, porque permite valorizar la sostenibilidad del proceso cuantitativamente (carbonización de los lodos residuales). Además, tiene una visión global e integradora del comportamiento del proceso, ya que evalúa los principales recursos de entrada empleados (directos e indirectos), y se evidenció la influencia en la sostenibilidad de los procesos aguas arriba en el proceso evaluado, lo que enfatiza la importancia de la gestión sistémica de los procesos. Así mismo, mediante el cálculo de los índices emergéticos, permitió obtener valores cuantitativos del comportamiento ambiental, energético y económico del proceso, lo que crea la oportunidad de poder hacer comparaciones con otros sistemas o alternativas, así como realizar mejoras o correcciones, lo que permite orientar la toma de decisiones multicriterio acertadas.

El estudio es una guía para mejorar la gestión de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales, así como para el desarrollo futuro de otros estudios relacionados.

VI. TRABAJOS FUTUROS

Se requiere un estudio actualizado de la sostenibilidad de la economía del Perú. El que está disponible, usado en esta investigación, data del año 2007. Es importante para no incurrir en un margen de error respecto a la valorización económica del proceso. Debido a que el cálculo de la sostenibilidad del proceso no requiere del EMR (Emergy Money Ratio), el cual se usa para conocer el EIR (Índice de Inversión Emergética) y no para calcular el ESI (Índice de Sostenibilidad), los resultados del estudio no han sido afectados.

Se debe alinear el álgebra de la metodología emergética con otras metodologías potencialmente compatibles, por ejemplo con el análisis de ciclo de vida, de forma que se obtenga un mayor alcance informativo de procesos y sistemas con la integración de estos enfoques.

Se deben realizar más estudios sobre índices emergéticos que reflejen el comportamiento de sistemas que reciclan entradas (como el caso de estudio), los que a su vez se encuentren alineados con la metodología de la emergía tradicional.

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Continental, por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales. Al laboratorio N.º 21 de Investigación y Química Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, por facilitar los resultados del análisis de la muestra correspondiente a la investigación. Al Centro para la Política Ambiental de la Universidad de Florida, por facilitar información imprescindible para el desarrollo de la investigación. Me complace agradecer a mi asesor de tesis, el Ing. Jacinto Arroyo, quien siempre promovió en mí la investigación y fue guía y amigo en el desarrollo de la tesis. Agradezco al Ing. Omar Bejarano por sus aportes y orientaciones, fundamentales para la culminación de la tesis.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. CANO, "Análisis mediante el método emergético de la disposición de lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales (Aplicación a una PTAR en el área metropolitana del valle de Aburra)", Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2012, pp. 178.
- [2] A. KAMP y H. OSTERGARD, "How to manage co-product inputs in emergy accounting exemplified by willow production for bioenergy", Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark, 2013.
- [3] A. BALA, M. RAUGER, M. RIPA, S. ULGIATI, "Dealing with waste products and flows in life cycle assessment and emergy accounting: methodological overview and synergies", thesis, Program in Environmental Science and Technology, Faculty of Technology, Design and Environment, Oxford Brookes University, Department of Science and Technology, 2015.
- [4] A. HADEN, "Emergy evaluations of denmark and danish agriculture. Centre for Sustainable Agriculture, Swedish University of Agricultural Sciences". Tesis, Suecia, 2003.
- [5] H. ODUM, "Emergy evaluation," International workshop, advances in energy flows in ecology and economy, Venere: s.n., 1998.
- [6] P. LOMAS, B. MARTIN, M. RODRIGUEZ y C. MONTES, "La síntesis emergética (emergy synthesis)", Integrando energía, ecología y economía, Madrid: Publicaciones de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Berzález, 2007, p. 77.

