

Fecha de presentación: febrero, 2019

Fecha de aceptación: mayo, 2019

Fecha de publicación: julio, 2019

## GESTIÓN

DE RESIDUOS INDUSTRIALES Y SOSTENIBILIDAD. NECESIDAD DE UN ENFOQUE DE ECONOMÍA ECOLÓGICA

### **INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY. NECESSITY OF AN ECOLOGICAL ECONOMICS APPROACH**

Alejandro Valdés López<sup>1</sup>

E-mail: [avlopez@ucf.edu.cu](mailto:avlopez@ucf.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>

Eduardo Julio López Bastida<sup>1</sup>

E-mail: [kuten@ucf.edu.cu](mailto:kuten@ucf.edu.cu)

Adriana Alonso Aguilera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" Cuba.

#### Cita sugerida (APA, sexta edición)

Valdés López, A., López Bastida, E. J., & Alonso Aguilera, A. (2019). Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. *Universidad y Sociedad*, 11(4), 424-435. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

#### RESUMEN

El presente trabajo se corresponde con una investigación de tipo explicativa que tiene como objetivo analizar la sostenibilidad de la gestión de los residuos industriales. Para su elaboración se empleó fundamentalmente el análisis documental permitiendo una valoración del estado del arte en la temática. Se sostiene que el análisis de la sostenibilidad debe ser abordado desde un enfoque de Economía Ecológica dado que los indicadores de la economía tradicional no son íntegramente adecuados para examinar la complejidad de este fenómeno. Se establecen los elementos conceptuales del análisis de ciclo de vida y el análisis energético como instrumentos de la Economía Ecológica para analizar los sistemas de gestión de residuos industriales pero justificado en sus limitaciones se propone su integración mediante el uso de los métodos de evaluación multicriterio. Como resultado final de la investigación se formuló un procedimiento metodológico para el análisis de la sostenibilidad en estos sistemas.

**Palabras clave:** Economía ecológica, gestión de residuos industriales, análisis multicriterio.

#### ABSTRACT

The present work fits to an explanatory investigation which aim at analyzing the sustainability of the industrial wastes management. The documental analysis was mainly used for its preparation allowing to value the state of the art of the subject. It is held that the sustainability analysis should be made from an Ecological Economics approach because of the indicators of traditional economy aren't entirely adequate to examine the complexity of this phenomena. The conceptual elements of life cycle analysis and energy analysis are established as Ecological Economics' instruments to analyze the industrial wastes management systems but justified in its limitations, it is proposed its integration using multi criteria evaluation methods. As a final result of the investigation, it was formulated a methodological procedure for the sustainability analysis of these systems.

**Keywords:** Ecological economics, industrial wastes management, multi criteria analysis.

## INTRODUCCIÓN

La complejidad y extensión de los problemas medioambientales contemporáneos ha evidenciado que no necesariamente un mayor desarrollo implica mayor calidad de vida lo que ha roto el mito de que siempre el beneficio que se obtiene de la industria es netamente mayor que los inconvenientes que esta puede ocasionar. La introducción del concepto de desarrollo sostenible constituyó un punto de inflexión en el análisis de esta problemática puesto que se ha creado una conciencia que el estrés al que se encuentra sometido el planeta no es viable para la preservación de la especie humana en el tiempo.

Lomas (2009), señala que en la actualidad las interacciones entre los colectivos humanos y la naturaleza se han hecho tan estrechas que es necesario recurrir a un enfoque ecológico-sociológico-económico para poder desarrollar, de una forma realista y segura, modelos de gestión de los sistemas naturales que sean verdaderamente viables a medio-largo plazo. Esto sirve como punto de partida para fundamentar la necesidad de abordar estos problemas desde la perspectiva de la Economía Ecológica que como ciencia estudia las relaciones entre el sistema natural y los subsistemas sociales y económicos, incluyendo los conflictos entre el crecimiento económico y los límites físicos y biológicos de los ecosistemas para disponer de información que nos permita comprender hasta que capacidad se pueden explotar los recursos materiales y energéticos sin causar alteraciones al medio ambiente (López, Pino & Sosa, 2013).

Si se analiza el modelo de producción contemporáneo se puede aproximar que el problema de la insostenibilidad desde un enfoque técnico está dado por un uso excesivo de materiales y energía extraídos de la corteza terrestre producto de la sobreexplotación de los ecosistemas lo que inevitablemente, por la segunda ley de la termodinámica, producirá residuos. Estos usos generan un deterioro ecológico por el espacio demandado para obtener los recursos y/o disponer los residuos lo que agudiza el problema de escasez de recursos y exceso de residuos. La problemática es tal que anualmente entre 7 y 10 billones de residuos son producidos en el mundo de los que más del 20 % aproximadamente corresponde a residuos industriales. Además, considerando que estos pueden ser divididos en biodegradables y no biodegradables, en numerosos químicos en estado de agregación sólido, líquido y gaseoso que pueden ser de naturaleza tóxica, inflamable, corrosiva, metales pesados, pesticidas, etc. y cuyo tratamiento depende de su complejidad y naturaleza no es de extrañar que las decisiones en cuanto a cómo gestionar los residuos sean muy complicadas.

Ante esta disyuntiva las primeras acciones se orientaron hacia la búsqueda de tecnologías más eficientes pero dados los patrones de consumo contemporáneos y la incorporación de muchos países en desarrollo a los modelos de producción industrial, mientras que los más desarrollados no han dejado de crecer, la coyuntura presente demanda moverse hacia la sensibilización, educación y participación de la sociedad en los aspectos ambientales y la valorización de los residuos cerrando ciclos materiales para de acuerdo a las limitaciones tecnológicas reconvertir los residuos en recursos. Ante esta dificultad se deben trazar políticas de desarrollo coherentes en las que se consideren factores de índole técnico-económico, social y ambiental en aras de lograr soluciones robustas donde se equilibren las necesidades humanas y naturales. Luego, aunque se han desarrollado diversos métodos para la modelación de los impactos de las actividades antrópicas cada uno tiene limitaciones por lo que la consideración de más de un indicador resulta adecuado para analizar la complejidad del fenómeno. Por ello, en su integración, las técnicas de decisión multicriterio han recibido especial atención dado que estas pueden abordar simultáneamente más de un objetivo y han probado ser eficientes para modelar objetivos conflictivos.

En concordancia con lo anterior en el presente trabajo se aborda la problemática asociada a los residuos industriales y la necesidad de que las alternativas de solución estén enfocadas en un ambiente multicriterio para lograr un compromiso entre las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (ecológica, social y técnica-económica). Se destaca como el empleo del análisis de ciclo de vida y el análisis emergético, herramientas de la Economía Ecológica, pueden influir efectivamente en la mejora de las políticas de gestión para reducir el impacto ambiental asociado a los residuos industriales y se describen las ventajas y desventajas de cada método.

## DESARROLLO

### *Problemática asociada a los residuos industriales*

La contaminación ambiental debido a los residuos sólidos es en uno de los problemas más graves de la actualidad, principalmente en los países en vías de desarrollo. La urbanización, industrialización y el progresivo crecimiento de la población son los principales responsables del incremento de la generación de residuos sólidos, además de un desafío en sí mismo para lograr un desarrollo sostenible. Actualmente el mundo genera anualmente alrededor de 1,3 billones de toneladas de residuos sólidos incluyendo los industriales, comerciales, residenciales, institucionales, municipales y se espera que se

incremente a aproximadamente 2,2 billones de toneladas por año hacia el 2025. Por otra parte, las aguas residuales son consideradas también un problema global, con experiencias diversas como en África y Asia donde son la causa de muchas enfermedades o en China y Europa donde la eutrofización ya es evidente. Según un reporte realizado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2014) se estima que en el 2010 el sector de residuos sólidos y aguas residuales aportó aproximadamente el 3 % de las emisiones globales de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), con la mayor contribución por emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) en los rellenos sanitarios, que representan la mayor fuente antropogénica y un importante contribuyente al calentamiento global.

Como en nuestros días la mayor parte de la economía se ha movido desde la agricultura hacia el sector industrial es evidente que gran parte de los impactos ambientales debido a factores antropogénicos estén dados por estas actividades. Estos se atribuyen a diversos factores entre los más importantes el consumo significativo de recursos naturales para la producción y a lo largo de la cadena de suministro, los efectos ecológicos de los productos y la contaminación por las descargas de residuos hacia el medioambiente. Sin embargo, en este punto se da un caso curioso y es la percepción en sí misma de residuos pues, aunque tradicionalmente se definen como aquellas sustancias, objetos y productos que ya no poseen valor para el usuario en términos de su propósito original su definición como no deseados es relativa y depende del usuario pues el residuo de una persona puede ser un material útil para otra. Esta característica permite la recuperación de materiales y/o energía mediante la integración de procesos dando lugar al enfoque de ecología industrial.

Ante el número oportunidades para recuperación de materiales a partir de los residuos dada la tecnología contemporánea y como base para la gestión integral de los residuos se ha establecido una jerarquía (Figura 1) para fomentar un examen individual de cada alternativa previo a la consideración de otra alternativa menos preferida en orden de importancia por su beneficio para el medioambiente. Las prácticas que disminuyen, evitan o eliminan la generación de residuos son consideradas preferibles y pueden incluir la implementación de procedimientos tan simples como buenas prácticas. Sigue el uso, reúso o recuperación de residuos y/o materiales, así como el reciclaje que puede llevarse a cabo en la misma instalación (on-site) o fuera de esta (off-site). El tratamiento para la recuperación de energía involucra la destrucción o detoxificación de los residuos mediante métodos físicos, químicos y biológicos o combinaciones de estos. Por último, la

disposición final ha sido incluida en la jerarquía porque es reconocido que existirán desechos que tendrán que ser finalmente dispuestos.

Con la jerarquía se reduce la generación de residuos y se optimiza la utilización de recursos. Sin embargo, en el caso particular de los residuos generados por las actividades productivas, con frecuencia es más simple y económico deshacerse de ellos, antes de ver cómo gestionarlos o evitar su generación. En otros casos existe una conciencia y la voluntad de hacer algo productivo con los residuos, pero a la hora de ponerlo en práctica la cantidad de ese material no resulta económicamente viable ni para quien lo produce ni para quien lo demanda, o no existe un mercado donde ofrecerlo ni la tecnología para tratarlos. Para la gestión adecuada de los residuos -desde su consideración como fuente de recursos para el proceso productivo en una economía circular- se requiere del compromiso de todas las partes y actores involucrados, trabajando en la implementación de estrategias de planificación, infraestructura, mecanismos de financiamiento y coordinación de autoridades de los gobiernos y la ciudadanía en general (Gudewort, 2016).

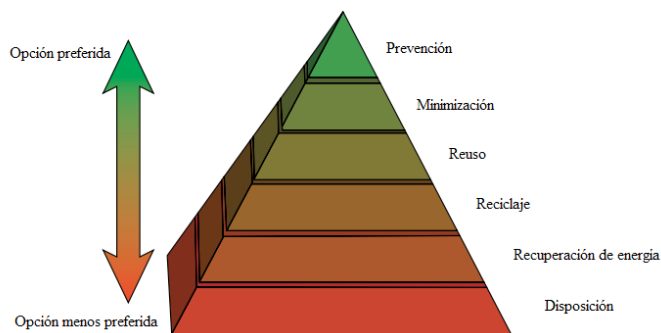


Figura 1. Jerarquía para el uso de residuos.

Luego si se asume que un componente esencial de la sostenibilidad es el cierre de los flujos de materiales, utilizando casi exclusivamente la energía solar, y que la emisión de residuos no debe superar la capacidad de carga de los ecosistemas entonces las políticas de gestión deben orientarse a la minimización de la generación de residuos y al uso de los recursos naturales a una razón que no afecte su renovabilidad. El ser humano debe lograr un uso más eficiente de la energía, del agua y materiales en general a la vez que previene la contaminación durante el proceso de producción logrando un equilibrio entre las necesidades antrópicas y ecológicas. Para esto la Economía Ecológica y sus herramientas constituye un baluarte una vez que abandona la posición antropocéntrica de la economía tradicional.

## Economía Ecológica

La economía ecológica fue fundada debido a la importancia de colocar a la economía dentro de sus límites biofísicos, al tiempo que se reconoce la necesidad de que la conducta de la sociedad humana respete a los demás. Las preocupaciones clave incluyeron las fallas de las políticas económicas para abordar los impactos ambientales, la estructura económica existente, sus instituciones y sus carencias para cumplir con los estándares mínimos de conducta ética (Spash, 2017).

La economía ecológica concibe la economía como un sistema abierto. En termodinámica, los sistemas se clasifican como 'abiertos' cuando existe entrada y salida de energía y materiales, 'cerrados' cuando no hay entrada y salida de materiales, aunque están abiertos a la entrada y salida de energía, como la Tierra, y finalmente sistemas 'aislados' (sin entrada ni salida de energía y materiales). La disponibilidad de energía y el ciclo de los materiales permiten que las formas de vida sean cada vez más organizadas y complejas; lo mismo se aplica a la economía. Si la escala de la economía es demasiado grande y su crecimiento es demasiado rápido, entonces los ciclos naturales no pueden producir los recursos de manera sostenible ni absorber o asimilar los desechos. La economía se topa con los límites de crecimiento o 'límites planetarios'. Es por eso que en la economía ecológica la economía se ve como parte del ecosistema (o, más precisamente, en la percepción social del ecosistema que cambia históricamente) (Martínez-Allier & Muradian, 2015).

Por ello, no es una rama de la economía teórica, sino un campo transdisciplinar, donde participan expertos en economía, sociedad, naturaleza o tecnología que practican la interdisciplinariedad, con la finalidad de comunicarse entre ellos y realizar una fusión de conocimientos, que permita enfrentar mejor los problemas, ya que los enfoques de la economía tradicional no resultan adecuados para la medición del desarrollo sostenible. No es una teoría basada en presunciones y teorías compartidas; representa un compromiso entre economistas, ecologistas y otros científicos, para aprender mutuamente, para explorar juntos nuevas pautas de pensamiento, y para facilitar la derivación y la realización de las nuevas políticas económicas y medioambientales (López, Pino & Sosa, 2013).

A menudo hay confusión sobre las diferencias entre la economía ecológica y la popular escuela de economía ambiental de los años 70 y 80. Aunque el enfoque principal de las dos disciplinas es similar, y uno comprende el valor del concepto de externalidad y gran parte del análisis de las herramientas de política ambiental como los impuestos ambientales y sus aplicaciones, que fue

prominente dentro de la comunidad de economía ambiental, la economía ecológica está más cerca al corazón de las personas por varias razones. En primer lugar, existe un enfoque explícito a largo plazo en la economía ecológica que prioriza la sostenibilidad lo que corresponde a la priorización de la eficiencia en la economía ambiental. El cumplimiento de las necesidades y la distribución equitativa en la economía ecológica se opone al bienestar óptimo y la eficiencia de Pareto en la economía ambiental. La economía ecológica se centra en los indicadores físicos y biológicos, mientras que la economía ambiental enfatiza las medidas monetarias. El principio de la evaluación multicriterio de la economía ecológica contrasta con la idea del análisis de costo-beneficio en la economía ambiental. La ética ambiental de la economía ecológica es una respuesta al utilitarismo y funcionalismo de la economía ambiental (Shmelev, 2012).

El cambio hacia indicadores físicos y biogeofísicos permite analizar factores a los que resulta casi imposible asignarle un valor económico o donde el dinero no es un estándar adecuado para describir las relaciones del sistema. Tal es el caso de la valoración de los impactos ambientales de las emisiones contaminantes, la capacidad de resiliencia de los ecosistemas naturales para soportar las actividades antrópicas o el costo ambiental para mantener el estándar de vida contemporáneo. Sin embargo, hasta nuestros días los decisores se sienten más unidos con los indicadores de la economía tradicional y ambiental lo que está dado en gran medida por el desconocimiento de otras herramientas, la falta de un enfoque proactivo y porque en un mundo complejo y dinámico como el contemporáneo los intereses económicos todavía prevalecen. No obstante, esta situación ha ido cambiando paulatinamente y tanto en el contexto académico como en políticas ambientales trazadas por los estados cada vez más se utilizan conceptos de la economía ecológica. Como se verá a continuación estas herramientas tienen mucho que ofrecer para conducir la economía y la sociedad a un desarrollo realmente sostenible.

### *Análisis de ciclo de vida*

De maneja general el análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta utilizada para realizar evaluaciones del impacto ambiental de productos y/o servicios desde la extracción de materiales hasta su gestión como residuo. La razón principal para adoptar esta perspectiva es que permite identificar y prevenir el cambio de carga entre las etapas o procesos del ciclo que suceden si los esfuerzos para reducir los impactos ambientales en un proceso o etapa crean involuntariamente (posiblemente mayores) impactos ambientales en otros procesos o etapas del



ciclo de vida (Hauschild, Rosenbaum & Olsen, 2018). Por su enfoque metodológico permite: a) una comprensión holística del flujo de materiales y/o energía a través de las interconexiones de los sistemas analizados, b) la identificación de los procesos con mayor consumo de recursos para de acuerdo con el principio de Pareto enfocar los mayores esfuerzos en mejorar las etapas más significativas, c) establecer una línea de base de desempeño ambiental para el análisis de mejoras, d) la evaluación y comparación de tecnologías con un mismo objetivo, e) el diseño de productos más amigables con el medioambiente, entre otras aplicaciones.

Para la ejecución de un análisis de ciclo de vida se sigue un proceso de cuatro etapas: (1) definición del objetivo y el alcance, (2) análisis del inventario de ciclo de vida, (3) evaluación del impacto del ciclo de vida, y (4) interpretación del ciclo de vida. En la definición del objetivo y el alcance se definen los límites espaciales y temporales del sistema analizado y la unidad funcional del sistema producto. Cuando se van a comparar los impactos de varias tecnologías todas deben ser escaladas a la misma unidad funcional para asegurar que la comparación se haga en una misma base. En el análisis de inventario se contabilizan todos los flujos de materiales y energía (materias primas, productos intermedios y emisiones) que fluyen en el sistema evaluado para lo que herramientas como la simulación y el análisis de flujo de materiales son gran valor. Luego, aunque algunos datos del inventario son medidos directamente muchos son adquiridos de diversas bases de datos. En la evaluación de impactos se modela la contribución de los flujos de la etapa anterior a determinadas categorías de impacto ambiental que varían de acuerdo al método de evaluación y finalmente en la interpretación se analizan los resultados y se revelan las insuficiencias de las etapas anteriores.

La metodología ha tenido una amplia difusión y aceptación lo que queda reflejado en el aumento significativo de publicaciones de artículos académicos con un marcado carácter exponencial (Figura 2). En el contexto de la gestión de residuos el análisis está enfocado en el final de la vida del producto que constituye la fase responsable de cerrar del ciclo. Esta puede servir para evaluar los impactos ambientales en la disposición final del producto y los posibles beneficios mediante el reúso, recuperación y/o reciclaje o para evaluar el servicio de gestión de residuos de manera general. El objetivo final de la herramienta aplicada a la gestión de residuos es apoyar los procesos de decisión para crear mejores estrategias, comparar tecnologías y proveer un desempeño ambiental de varios tipos de sistemas (Chang & Pires, 2015).

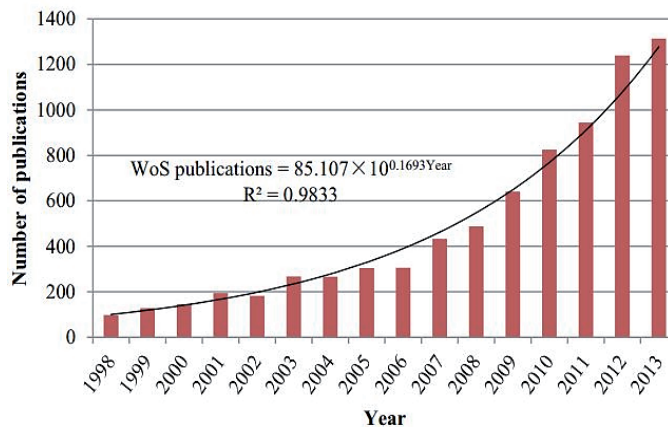


Figura 2. Distribución cronológica de artículos relacionados con el análisis de ciclo de vida en la *Web of Science* (1998-2013).

Fuente: Hauschild, et al. (2018).

Sin embargo, a pesar de las virtudes de la metodología se han señalado varias limitaciones. Vezzoli (2018), destaca que debido a la complejidad y las interrelaciones de los sistemas analizados en los estudios de ciclo de vida se pueden presentar algunas dificultades como: a) el carácter subjetivo de las consideraciones realizadas, b) que los modelos usados para el análisis de inventario y la evaluación de impactos no son suficientes para describir el espectro completo de problemas ambientales, c) los resultados y criterios pueden no ser adaptables para condiciones locales en todas las aplicaciones, d) la confiabilidad de los resultados pueden ser limitados debido a la carencia o inconsistencia de datos.

Respecto al análisis de la sostenibilidad la dimensión social presenta especiales dificultades. Según Hauschild, et al. (2018), la evaluación de la sostenibilidad mediante el ciclo de vida parece estar basado en la consideración que la sostenibilidad es un constructo que puede ser balanceado entre las dimensiones ambiental, social y económica lo que entra en conflicto con el concepto de capacidad de carga de acuerdo con el que la satisfacción de las necesidades humanas impone un mínimo nivel de protección ambiental. Una de las principales fortalezas del método también constituye una limitación. En la evaluación de ciclo de vida se sigue el principio del 'mejor estimado' lo que permite una comparación sin sesgo, pero al considerar el desempeño promedio de los procesos los factores de riesgo escapan a su análisis. Como consecuencia la energía nuclear, por ejemplo, se presenta con un buen desempeño ambiental pero los riesgos para la sociedad de desastres, como el de Chernobyl en Ucrania o Fukushima en Japón, no son considerados. Finalmente, aunque el método puede identificar cual sistema producto es mejor para el medioambiente no puede

decir si mejor es suficiente. Es por lo tanto erróneo concluir que un producto es sostenible en términos absolutos con referencia al análisis de ciclo de vida si tiene un menor impacto ambiental que otro producto (Hauschild et al., 2018). Dado que el método no es suficiente para una evaluación de sostenibilidad su integración con otros enfoques es necesario para un análisis más adecuado. Desde la perspectiva de los autores el análisis emergético representa una alternativa interesante una vez que incorpora a la evaluación la labor humana y la energía usada para proveer un bien y/o servicio.

### *Análisis Emergético*

#### *La emergía y la jerarquización energética*

El análisis emergético es una metodología ecológico-termodinámica de valoración ambiental basada en la conversión a unidades comunes de los flujos de energía, masa y dinero (Odum, 1996) utilizados en un sistema socio-ecológico. El objetivo de esta metodología es estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con su ambiente, a través del uso de una perspectiva sistémica y energética. El análisis emergético surge de la observación de Howard Thomas Odum que, en los procesos de auto-organización de sistemas complejos, la segunda ley de la termodinámica implica que la energía que pasa de un nivel a otro del sistema es menor en cada escalón; pero, la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de auto-organización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo. Es decir, la energía se concentra conforme se avanza en niveles de auto-organización y complejidad lo que implica que 1 joule de energía solar, 1 joule de carbón o 1 joule de electricidad, aunque representan la misma cantidad, no representan la misma calidad de energía, en el sentido del potencial que tienen para actuar sobre el sistema y en la necesidad que el sistema tiene de aportar mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas. Esto conduce a la conclusión que existe una jerarquía de energías según su calidad (Lomas, Di Donato, & Ulgiati, 2007).

Con esta premisa y basándose en los principios de la energética, teoría de sistemas y ecología se define la emergía como la disponibilidad de energía de un tipo que es usada en las transformaciones directas e indirectas para crear un producto o servicio (Odum, 1996). En concordancia con la jerarquización, Odum y colaboradores tomaron la energía solar como base común para evaluar otras formas de energía puesto que en principio esta es la principal fuente del planeta si se considera un sistema

termodinámico. La unidad de la emergía es entonces el emjoule solar (*seJ* por sus siglas en inglés) que como señalan Voora & Thrift (2010), a diferencia del joule que expresa la cantidad de energía disponible que puede ser usada en el presente, el emjoule expresa la energía usada directa e indirectamente para producir un bien o servicio. Nótese y esto es muy importante a la hora de diferenciar conceptos, que no se refiere a la cantidad de energía solar contenida en un determinado producto (que sería una aproximación particular de su energía incorporada), sino a la cantidad de energía (no sólo solar, sino cualquiera que sea su origen) con calidad referida a la de la energía solar que es necesaria para generarlo. Se trata de estimar el coste en términos de energía (de la misma calidad) movilizadas del conjunto de materiales y energía usados en generar un determinado producto (Lomas, 2009). Entonces la emergía puede ser considerada como la "memoria energética" de toda la energía solar necesaria para sostener un sistema, tomando en consideración el trabajo que ha sido realizado previamente por el medio ambiente para producir un bien o servicio (Saldini, et al., 2016).

Para transformar las diferentes formas de energía a la calidad de la energía solar se utiliza un factor de equivalencia llamado unidad de valor emergético (*UEV* por sus siglas en inglés). Este constituye una expresión intensiva de la emergía que expresa la cantidad de energía con calidad equivalente a la solar necesaria para generar 1 J (transformidad) o 1 g (emergía específica) de un producto o servicio. Las unidades de la transformidad y la emergía específica son  $seJ/J$  y  $seJ/g$  respectivamente e igualmente se define el valor emergético monetario expresado en  $seJ/\$$  para analizar la influencia de los flujos monetarios que entran y/o retroalimentan a los sistemas. Luego como las redes energéticas están interconectadas de manera tal que las salidas de unas son las entradas de otras estas unidades constituyen una medida de la localización del producto o servicio en la jerarquía energética o de la eficiencia de la conversión para generarlo. Como la segunda ley de la termodinámica establece que con cada transformación se degrada energía a menor unidad de valor emergético mayor eficiencia.

#### *Evaluación emergética. Críticas y aciertos*

El punto de partida del análisis emergético como un nuevo campo de estudio es que precisamente se pueden analizar los diferentes tipos de energía utilizando estos factores de conversión. Para la realización de una evaluación emergética se sigue un procedimiento de cuatro etapas: (1) definición espacio-temporal del sistema de estudio, (2) modelación del sistema usando la simbología

energética, (3) balance energético del sistema y (4) cálculo y análisis de indicadores energéticos. En la primera etapa se establece la región espacial y el tiempo determinado para el objeto a evaluar lo que determina los flujos materiales y/o energéticos que atraviesan el sistema. El no establecer adecuadamente estas variables conduce a errores en la interpretación de cualquier resultado debido a los errores en cuantificación de insumos que consume el sistema y productos que proporciona.

En la segunda etapa se representa a través de la simbología energética las interrelaciones y dinámica de los flujos materiales y/o energéticos de los procesos que componen el sistema. La simbología es similar a otros sistemas de modelación, con analogías a lenguajes de programación lo que permite aprovechar las similitudes de

los objetos de estudio, logrando una representación más estandarizada y comprensible de los mismos. De esta manera según Odum (1996), al conectar diferentes tipos de energía se pueden asociar varias partes y visualizar la complejidad de una manera sencilla. En el balance del sistema se contabilizan los flujos de materiales y energía para el período de tiempo investigado y se transforman a flujos energéticos a partir de las UEV de estos. Para facilitar este proceso usualmente se construye una tabla en la que se resumen los principales insumos y productos del sistema como se observa en la Tabla 1. En esta etapa herramientas como el análisis de flujo de materiales y/o la simulación son de especial relevancia a la vez que evitan el doble conteo y mantienen la relación de conservación de la energía y/o masa.

Tabla 1. Ejemplo típico de una tabla energética.

Nota	Item	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (em\$/año)
1	Item1	xx.x	J/año	xxx.x	$Em_1$	$Em_1/EMR$
2	Item2	xx.x	g/año	xxx.x	$Em_2$	$Em_2/EMR$
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
n.	Ene-ésimo Item	xx.x	J/año	xxx.x	$Em_n$	$Em_n/EMR$
Y	Y-ésimo Producto	xx.x	J ó g/año	$\frac{\sum_n Em_i}{xx.x}$	$\sum_n Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n Em_i}{PIB}$

Fuente: Lomas (2009).

Luego, aunque el sistema tenga características distintivas a razón a flujos energéticos, las entradas podrán ser agrupadas como recursos renovables (R), recursos no renovables (N) y procedentes de la economía, adquiridas como bienes o servicios comprados (F). A partir de esta clasificación se calculan indicadores energéticos que permiten caracterizar los sistemas y al compararlos determinar cuáles son más eficientes en el aprovechamiento de los recursos, siempre dentro de los criterios y limitaciones del método. El factor significativo de estos es que consideran no solo los recursos naturales de los ecosistemas sino también la labor humana y la retroalimentación de la economía. En la Tabla 2 se muestran las fórmulas para su cálculo y una breve descripción de su interpretación.

Tabla 2. Algunos indicadores energéticos.

INDICADOR	FÓRMULA	UNIDADES	INTERPRETACIÓN
Energía de fuentes renovables	R	seJ/año	Entrada de energía de fuentes renovables
Energía de fuentes no renovables	N	seJ/año	Entrada de energía de fuentes no renovables
Energía importada de la economía	F	seJ/año	Entrada de energía desde fuentes externas (usualmente con un intercambio monetario)
Energía usada por el sistema	$Y=R+N+F$	seJ/año	Costo energético del sistema
Transformidad (Transformity; Tr)	Y/E	seJ/J	Relación entre la energía total que ingresa en el sistema (Y) y la energía de los productos que salen (E). Expresa la cantidad de energía con calidad equivalente a la solar necesaria para generar 1 J del producto.

Razón de renovabilidad (Renewability Ratio; % R)	$R/Y$	-	Fracción de la energía renovable respecto a la energía total consumida
Razón de eficiencia energética (Energy Yield Ratio; EYR)	$(R+N+F)/F$	-	Medida de la ganancia de energía primaria del sistema debido a la explotación de los recursos locales
Razón de carga ambiental (Environmental Loading Ratio; ELR)	$(N+F)/R$	-	Medida de la perturbación medioambiental generada por el sistema
Índice de sostenibilidad energética (Environmental Sustainability Index; ESI)	$EYR/ELR$	-	Medida de la potencial contribución del sistema por unidad de carga impuesta al sistema local

Sin embargo, al igual que otras metodologías la energía ha sido cuestionada. La economía moderna que se concentra en el hombre y sus valores y no en el mundo biofísico, ha dudado sobre la habilidad de la teoría energética para capturar el valor de los productos para los humanos. Algunos argumentos comunes son que la energía de un galón de aceite de ballena no ha cambiado mientras su valor para los humanos sí. Además, dos pinturas con energías similares pueden tener valores considerablemente diferentes, especialmente si una de ellas fue hecha por un renombrado pintor. Consecuentemente, todas las teorías termodinámicas del valor han sido rechazadas por los economistas a través de las décadas. Lo que más se critica sobre la evaluación energética parece ser que adopta un valor ecocéntrico de los productos y procesos ecológicos e industriales. Esto está en contraste directo con la perspectiva economista, que es antropocéntrica (Hau & Bakshi, 2004).

Ante las críticas de los economistas los “energistas” alegan que el análisis energético difiere del análisis económico porque en vez de usar el valor monetario de los bienes y servicios utiliza una medida de la calidad de los recursos. No obstante, los practicantes de la metodología energética han tratado de comunicar la importancia del enfoque del método convirtiendo la energía en emdólares. Esta técnica ha sido recibida con mucho escepticismo por parte de los economistas que alegan que se introduce un doble conteo. Además, expresar la energía en emdólares entra en conflicto con el argumento que el dinero es una medida incompleta del bienestar, lo que es usado para reafirmar las críticas. Sin embargo, esta conversión provee una medida para comunicar la importancia de los flujos energéticos a los directores de políticas que basan sus decisiones en medidas monetarias (Voora & Thrift, 2010).

Ha sido discutido también que la relación entre energía y otras propiedades termodinámicas es cuando menos confusa y que la cuantificación de los flujos energéticos al combinar diferentes escalas de tiempo o espacios geográficos para determinar transformidades introduce cierta

incertidumbre en los resultados. Sin embargo, otras metodologías como el análisis de ciclo de vida (*LCA*), también son objetivo de ataques similares. Si bien hay que aceptar que ambos son métodos aproximados permiten abordar la problemática ambiental desde una perspectiva diferente buscando dar una explicación racional de los mecanismos que gobiernan la realidad y como hasta la actualidad no existe ningún procedimiento establecido que carezca de limitaciones la desestimación de estos tiende a ser hecha por preferencias personales o ignorancia más que por fundamentaciones científicas.

Entonces, a pesar de estas críticas el uso de la metodología energética ha permitido: (a) investigar sistemas fuera de las actividades humanas, (b) conocer el papel que los sistemas ecológicos tienen para el ser humano, (c) implementar una evaluación ligada a la aportación ambiental en lugar de la clásica evaluación desde el punto de vista del usuario, (d) evaluar procesos donde el soporte directo de materiales es pequeño pero el indirecto es grande, (e) tener en cuenta la escala temporal o memoria de los servicios usados, (f) evaluar la renovabilidad de los servicios, (g) evaluar la calidad de los servicios de un modo cuantitativo, (h) evaluar el impacto de procesos consistentes en unir flujos de baja y alta calidad, (i) incluir en la evaluación el trabajo humano y los servicios en bajo un marco común (Lomas, 2009).

#### *Vinculación a la gestión de residuos*

El análisis energético ha servido para evaluar el impacto ambiental de diferentes opciones para el tratamiento final de los residuos (Yuan, Shen & Li, 2011), las políticas de gestión (Cai, et al., 2018), aspectos relacionados a la sostenibilidad (Saldini, et al., 2016), etc. Su utilización ha sido tanto de manera independiente como de conjunto con otros métodos. Además de los indicadores tradicionales señalados anteriormente se han propuesto nuevos índices para evaluar los sistemas de tratamiento dado que para sistemas industriales la fracción de energía proveniente de recursos renovables (*R*) tiende a ser muy pequeña o cero lo que conduce a que los indicadores tradicionales sean irrazonablemente grandes o



pequeños. Además, como se observa en la Tabla 2 estos indicadores solo modelan el impacto ambiental debido al uso de materiales y/o energía por parte de los sistemas y aspectos relacionados a la contaminación por emisiones no están en su alcance. Algunas investigaciones como la de Winfrey & Tilley (2016), o más recientemente Wang, et al. (2018), abordan este tema no obstante el campo de estudio continúa abierto.

Por ello, pesar de los avances del método, este autor sostiene que hasta el momento no es suficiente para analizar la complejidad de los sistemas de gestión de residuos. Su integración con otros estudios es necesario para apoyar los procesos de decisión en aras de ejecutar políticas orientadas a lograr la sostenibilidad de estos sistemas. Para esto se proponen las técnicas de decisión multicriterio dado que estas pueden considerar simultáneamente más de un objetivo y han probado ser adecuadas para modelar criterios contrapuestos.

#### *Integrando métodos de evaluación. Análisis multicriterio*

Los modelos de decisión multicriterio son un conjunto de técnicas para apoyar el proceso de decisión considerando múltiples criterios de una manera flexible, por medio de un esquema estructurado y comprensible. Estos métodos de evaluación son integradores en el sentido que combinan la información sobre el desempeño de las alternativas respecto a los criterios con juicios subjetivos sobre la importancia relativa de estos en el contexto de evaluación.

Hwang & Yoon (1981), señalan que independientemente del problema o la técnica usada para analizarlo todos los modelos de decisión multicriterio tienen características comunes:

- Múltiples criterios: cada problema tiene múltiples criterios los que pueden ser objetivos o atributos.
- Conflictos entre criterios: generalmente la mejora obtenida en un criterio se hace en detrimento de otro criterio.
- Unidades inconmensurables: los criterios difieren en las unidades en que son medidos.
- Diseño/selección: la solución a los problemas de decisión multicriterio son para diseñar o seleccionar entre un conjunto definido la alternativa preferida.

El proceso de decisión es instintivo cuando se considera un solo criterio dado que se debe elegir la alternativa con el mejor desempeño, sin embargo, al evaluar estas con múltiples criterios surgen algunas complejidades como el peso de los criterios, la modelación de la preferencia y los conflictos entre criterios requiriendo técnicas más

sofisticadas para superar estas dificultades. Como consecuencia en los problemas multicriterio no existe la noción de mejor alternativa en el sentido clásico de la optimización, sino que el proceso determina la alternativa con mejor solución de compromiso.

Estos problemas pueden ser de tipo grupal (*group decision-making*) cuando más de un decisor tiene papel en el proceso de decisión. Como en estos métodos el resultado de la evaluación está condicionado por las preferencias y objetivos del decisor este autor sostiene que la selección de un grupo de trabajo resulta adecuada, y aunque el proceso de decisión en un grupo resulta más complicado porque las preferencias individuales no pueden ser satisfechas fácilmente la consideración del juicio de más de un sujeto estriba en una solución más imparcial y transparente, esencial para abordar el dilema de los residuos.

En concordancia con lo anteriormente manifestado el enfrentamiento de estos problemas requiere un procedimiento estructurado que permita a los decisores obtener una solución adecuada a sus intereses, con la suficiente robustez y rapidez de acuerdo a las exigencias del problema. Existe cierto consenso que este proceso puede ser dividido en una serie de pasos elementales que se dividen en:

- Identificación del problema y objetivos.
- Estructuración del problema, definiendo alternativas y criterios a ser usados.
- Modelación de la preferencia.
- Agregación y análisis de los resultados.
- Discusión de los resultados obtenidos.

La identificación de los problemas, objetivos y la definición de las alternativas pueden ser abordadas por disciplinas como la administración, la economía, la ingeniería y otras sin embargo para la selección de los criterios a utilizar en la evaluación es necesario que concurren todas estas. En el caso contrario el proceso de decisión se verá fragmentado dado que no existe un acuerdo común por lo que usualmente en esta etapa se usan equipos de trabajo multidisciplinarios. No obstante Chang & Pires (2015), afirman que independientemente de los criterios seleccionados estos deben cumplir una serie de requisitos para poder ser usados destacándose:

- Principio sistémico. Los criterios relevantes deben reflejar las principales características del desempeño del sistema.
- Principio de consistencia. Los criterios deben ser compatibles con los objetivos de los decisores.

- Principio de independencia. Los criterios no deben tener una relación igual inclusiva con otros criterios del mismo nivel. Los criterios deben reflejar el rendimiento de las alternativas desde aspectos versátiles.
- Principio de medición. Los criterios deben ser medibles como valores cuantitativos si es posible o expresados cualitativamente.
- Principio de comparabilidad. Cuanto mayor sea la racionalidad mayor será la comparabilidad con los criterios pertinentes. Los criterios deben normalizarse para comparar u operar con criterios de beneficios y criterios de costos.

Esto hace que usualmente la mayoría de los criterios de evaluación se dividan en cinco categorías o familia de criterios que representan los pilares de la sostenibilidad: técnico, regulatorio, económico, ambiental y social; sin embargo, los criterios asociados con cada categoría están diversificados debido a los requisitos propios del proceso de decisión relacionados con la confiabilidad, la exhaustividad, la comprensión y las limitaciones, como la disponibilidad de datos. Algunos criterios con implicaciones superpuestas podrían estar vinculados a aspectos socioeconómicos, socio-ambientales y económico-ambientales considerados integralmente en la interpretación final (Chang & Pires, 2015).

Para la modelación de la preferencia y la agregación y análisis de los resultados se han propuesto diversos métodos que difieren en términos de precisión, facilidad de uso, complejidad y fundaciones teóricas por lo que usualmente producen diferentes resultados. Esto puede resultar confuso para el decisor y ser motivo de la desestimación de estos métodos, pero como se mencionó anteriormente está dado debido a que no existe una delimitación clara de la superioridad de una alternativa en comparación a las demás en todos los criterios, por lo que lo que se busca es un compromiso que está en función del desempeño de las alternativas atendiendo a los criterios seleccionados para su evaluación, como del peso relativo de los criterios. Por eso la elección de métodos apropiados es un elemento crucial por lo que se requiere la capacitación de los actores vinculados en el proceso de decisión.

### Consideraciones finales

Entonces para la evaluación de la sostenibilidad en la gestión de los residuos industriales es necesario que se integren los factores de desempeño ambiental, sociales y técnicos-económicos en el proceso de decisión mediante los métodos multicriterio, sin embargo, con el aumento del número de alternativas y la cantidad de criterios a considerar el costo y tiempo para desarrollar la evaluación

umentan considerablemente. Para apaciguar esto se propone la metodología representada en la Figura 3 en la que en un primer momento se realiza un cribado de las propuestas que no cumplen con un estándar de desempeño ambiental comparándolas con la situación inicial del sistema.

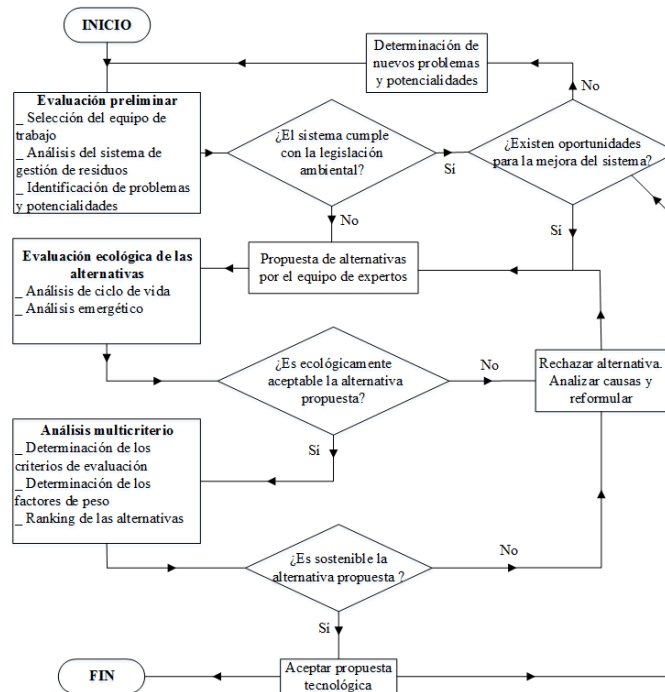


Figura 3. Metodología para la evaluación de la sostenibilidad de la gestión de residuos.

Aunque los indicadores de desempeño ambiental deben ser considerados también en la evaluación multicriterio su alcance no permite contabilizar los riesgos asociados de las tecnologías, factores éticos relacionados al ser humano, entre otros por lo que es necesario que criterios de esta índole estén representados en el análisis multicriterio si realmente se va a evaluar sostenibilidad. Luego del ranking de las alternativas se precisa analizar si las alternativas son adecuadas desde otros enfoques que no sean el ambiental, pues es posible que en otros factores como el económico no presenten un desempeño adecuado siendo necesario una negociación por las partes involucradas en el proceso de decisión para buscar una solución de compromiso. Finalmente, aunque sean aceptadas las propuestas tecnológicas el proceso no termina ahí dando espacio para la mejora continua. La metodología se encuentra sujeta a cierta subjetividad por lo que no es infalible mas es opinión de los autores que representa un buen punto de partida para abordar la complejidad de los sistemas de gestión de residuos industriales.

## CONCLUSIONES

Los problemas asociados a la contaminación ambiental imponen un reto a la sociedad contemporánea dada la necesidad de una ruptura con los patrones insostenibles de consumo, así como en un cambio de paradigma donde la gestión de residuos industriales esté naturalmente articulado a las actividades humanas con una visión de modelo circular de producción. Para esto las herramientas de la Economía Ecológica constituyen una alternativa interesante, aplicables a la práctica social para lograr la sostenibilidad.

Particularmente la evaluación de los impactos ambientales mediante la combinación del análisis de ciclo de vida y la síntesis emergética resulta adecuado una vez que los métodos modelan la dinámica de las interrelaciones hombre-naturaleza permitiendo comprender las formas más eficientes de explotar el capital natural y el impacto generado por estas actividades. No obstante, hay que señalar que estos no son suficientes por sí solos para evaluar la sostenibilidad y deben ser reforzados con indicadores de otros campos disciplinares.

Luego, como el análisis de la sostenibilidad es un fenómeno particularmente difícil dado que influyen muchos factores los métodos de decisión multicriterio constituyen un conjunto de técnicas interesantes para apoyar los procesos de decisión una vez que abordan de una manera flexible diversos objetivos conflictivos entre sí. De esta manera se abandona la posición antropocéntrica de la economía tradicional para buscar un equilibrio entre las necesidades antrópicas y ecológicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cai, W., et al. (2018). Developing the ecological compensation criterion of industrial solid waste based on emergy for sustainable development. *Energy*, **157**, 940-948. Recuperado de <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v157y2018icp940-948.html>
- Chang, N. B., & Pires, A. (2015). *Sustainable Solid Waste Management: A Systems Engineering Approach*. Hoboken: IEEE Wiley.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*: Cambridge University Press.
- Gudewort, A. (2016). El gasto de tirar *El valor de los residuos. Distintos modos de reducir, reutilizar, reciclar y revalorizar residuos industriales*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Hau, J. L., & Bakshi, B. R. (2004). Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, **178**, 215-225. Recuperado de [https://www.academia.edu/2613861/Promise\\_and\\_problems\\_of\\_emergy\\_analysis](https://www.academia.edu/2613861/Promise_and_problems_of_emergy_analysis)
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. Amsterdam: Springer.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer.
- Lomas, P. (2009). *Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio*. (Tesis de Doctorado). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Lomas, P., Di Donato, M., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Ecosistemas*, **16**(3), 37-45. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/16361078.pdf>
- López Bastida, E. J., Pino Alonso, J. R., & Sosa González, M. (2013). La necesidad de medir el desarrollo local con indicadores de economía ecológica. *Universidad y Sociedad*, **5**(2). Recuperado de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/download/127/125/>
- Martínez-Allier, J., & Muradian, R. (2015). *Handbook of ecological economics*. London: Edward Elgar Publishing.
- Odum, H. T. (1996). *Environmental accounting. Emergy and environmental decision making*. New York: John Wiley & Sons.
- Saldini, F., et al. (2016). Sustainability assessment of selected biowastes as feedstocks for biofuel and biomaterial production by emergy evaluation in five African countries. *Biomass and Bioenergy*, **85**, 100-108. Recuperado de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201600271637>
- Shmelev, S. E. (2012). *Ecological economics: sustainability in practice*. Amsterdam: Springer Science & Business Media.
- Spash, C. L. (2017). Social Ecological Economics. In, C. L. Spash (Ed.), *Routledge Handbook of Ecological Economics: Nature and Society* (pp. 3-16). New York: Routledge.
- Vezzoli, C. (2018). *Design for Environmental Sustainability: Life Cycle Design of Products* (2 ed.). London: Springer-Verlag.

- Voora, V., & Thrift, C. (2010). Using emergy to Value ecosystem Goods and Services. Canada: Winnipeg: Alberta Environment.
- Wang, Y., et al. (2018). Investigating impact of waste reuse on the sustainability of municipal solid waste (MSW) incineration industry using emergy approach: A case study from Sichuan province, China. *Waste Management*, 77, 252-267. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29705047>
- Winfrey, B. K., & Tilley, D. R. (2016). An emergy-based treatment sustainability index for evaluating waste treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4485-4496. Recuperado de <https://research.monash.edu/en/publications/an-emergy-based-treatment-sustainability-index-for-evaluating-was>
- Yuan, F., Shen, L.-Y., & Li, Q. M. (2011). Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste. *Waste Management*, 31(12), 2503-2511. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21820302>