

NOTAS Y COMENTARIOS

**EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS PRODUCTIVOS MEDIANTE ANÁLISIS EMERGÉTICO: CONCEPTOS BÁSICOS<sup>o</sup>**

*ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF PRODUCTION SYSTEMS THROUGH EMERGY ANALYSIS: BASIC CONCEPTS*

*Wilson Muñoz Valerio<sup>\*</sup>*  
*Ericka Gómez Alfaro<sup>\*\*</sup>*  
*Javier Paniagua Molina<sup>\*\*\*</sup>*  
*Johanna Solórzano Thompson<sup>¥</sup>*  
*David Barboza Navarro<sup>¥¥</sup>*

*enviado: 29 enero 2024 – aceptado: 12 marzo 2024*

---

**Resumen**

El objetivo de este estudio es conceptualizar el término “emergía” y el procedimiento metodológico utilizado para evaluar la utilización de recursos en la generación de bienes y servicios, conocido como síntesis emergética, junto con sus implicaciones

---

<sup>o</sup> Muñoz Valerio, W., Gómez Alfaro, E., Paniagua Molina, J., Solórzano Thompson, J., & Barboza Navarro, D. (2024). Evaluación de la sostenibilidad de sistemas productivos mediante análisis emergético: conceptos básicos. *Estudios económicos*, 41(83), pp. 240-260, DOI: 10.52292/j.estu-decon.2024.4628

<sup>\*</sup> Universidad de Costa Rica, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8627-3883>. Correo electrónico: [wilson.munoz@ucr.ac.cr](mailto:wilson.munoz@ucr.ac.cr)

<sup>\*\*</sup> Universidad de Costa Rica, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-0345>. Correo electrónico: [erickagomez@gmail.com](mailto:erickagomez@gmail.com)

<sup>\*\*\*</sup> Universidad de Costa Rica, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>. Correo electrónico: [javier.paniagua@ucr.ac.cr](mailto:javier.paniagua@ucr.ac.cr)

<sup>¥</sup> Universidad de Costa Rica, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0276-6849>. Correo electrónico: [johanna.solorzano@ucr.ac.cr](mailto:johanna.solorzano@ucr.ac.cr)

<sup>¥¥</sup> Universidad de Costa Rica, Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5444-3814>. Correo electrónico: [jose.barbozanavarro@ucr.ac.cr](mailto:jose.barbozanavarro@ucr.ac.cr)

en la agricultura. Se realizó una investigación documental mediante la recopilación de información fundacional para comprender este método. En conclusión, el análisis emergético en sistemas productivos proporciona un importante flujo de información para la toma de decisiones en el desarrollo de proyectos agrícolas. Esto permite estimar valores para diversos componentes de los sistemas ecológicos y productivos, así como definir condiciones de sostenibilidad para la formulación de políticas públicas.

*Clasificación JEL:* P51, P56, P57.

*Palabras clave:* energía, transformación, sistemas ecológicos, intensidad emergética, indicadores emergéticos.

### ABSTRACT

The aim of this study was to conceptualize the term “energy” and the methodological procedure used to assess resource utilization in the generation of goods and services, known as energy synthesis, along with its implications in agriculture. A documentary investigation was conducted by compiling foundational information to understand this method. In conclusion, energy analysis in productive systems provides a significant flow of data for decision-making in the development of agricultural projects. This enables estimating values for various components of ecological and productive systems, as well as defining sustainability conditions for formulating public policies.

*JEL codes:* P51, P56, P57.

*Keywords:* energy, transformation, ecological systems, energy intensity, energy indicators.

## INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad de los agroecosistemas enfrenta un desafío importante debido al desarrollo de sistemas de producción intensivos y la utilización excesiva de los recursos naturales. La necesaria integración de los aspectos económicos y ambientales en los procesos productivos debe ser analizada de manera integral para evaluar el uso de recursos y la degradación ambiental. Dentro de este marco, los registros ambientales se basan en unidades físicas como toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, kilogramos de desechos per cápita o emisiones de metano en la producción ganadera, mientras que las actividades económicas operan sobre una base monetaria dentro de un sistema de mercado tradicional. Esta dualidad de cuentas dificulta la conciliación de datos y complica la resolución de problemas ambientales complejos (Campbell et al., 2005), sin embargo, es posible utilizar una metodología de contabilidad emergética de forma paralela a la contabilidad financiera, con el fin de ampliar la información de la que disponen los tomadores de decisiones (Campbell et al., 2013). En este sentido, no solo conocerán indicadores financieros o movimientos de resultados en un período, sino también cambios en la economía ambiental y social, que afectan a los países y a las empresas. Por este motivo, se introduce el concepto de emergía como herramienta para evaluar la sostenibilidad en los agroecosistemas.

El concepto de contabilidad emergética fue introducido por Howard T. Odum para evaluar los diversos insumos empleados en la producción de alimentos, dando lugar al análisis de la “emergía” como medida cuantitativa de los recursos necesarios para el desarrollo de un producto o servicio. La emergía expresa los factores de producción utilizados en unidades de “emergía solar” (Odum, 1996; Rydberg & Jansén, 2002; Tilley & Martin, 2006), ya que, como indica Amaral et al. (2016), evalúa todos los recursos, bienes y servicios, e incluso se aplica en la creación de nueva información, todo bajo una sola unidad de medida.

En los sistemas de producción agrícola, además de la energía solar, la energía adicional procede de fuentes no renovables. Sin embargo, la utilización excesiva de esta energía supone una amenaza para la salud de los ecosistemas y pone en peligro la seguridad alimentaria. Esto se debe a la presencia de sociedades con necesidades insaciadas que no comprenden adecuadamente la escasez de recursos (Peniche Camps, 2021). En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo conceptualizar el término “emergía” y dilucidar el procedimiento metodológico empleado para evaluar la utilización de recursos en la producción de bienes y servicios, junto con sus implicaciones en la agricultura.

## I. ¿PARA QUÉ SIRVE LA EMERGÍA?

Ante el paulatino crecimiento de la población y el desafío de satisfacer sus necesidades de consumo de alimentos, es fundamental contar con herramientas para evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos. Los procesos naturales y económicos en todo el mundo dependen de un conjunto de flujos y almacenamiento de energía ambiental (Hlidkvist, 2005). La sociedad utiliza directa e indirectamente las energías ambientales, a partir de flujos de energía renovables y almacenamiento de materiales (Brown & Ulgiati, 1999; Torres Verzagas et al, 2019). En este contexto, el flujo de energía a través de un ecosistema se transmite desde el sol a los sistemas productivos, los consumidores y los organismos descomponedores; alcanzando posteriormente reservas de nutrientes a través de la red alimentaria (Verma et al., 2020).

El valor asignado a los servicios de los ecosistemas y los bienes naturales puede no reflejar con precisión su verdadero valor desde una perspectiva holística; esta es una de las razones por las que los ecosistemas se encuentran amenazados y en riesgo de extinción. Odum (1971) definió un ecosistema como una unidad que abarca todos los organismos de cada zona, interactuando con el entorno físico, creando estructuras tróficas, diversidad biótica y ciclos materiales (Armenteras et al., 2016). Cada uno de estos actores sufre transformaciones en sus procesos a través de la energía, por lo que es un elemento clave para este análisis.

El término “energía” se demarca como “la capacidad de realizar trabajo, que se define como cualquier transformación útil de energía” (Odum, 1996, citado en Izursa Azurduy, 2011, p. 71 y en Torres Verzagas et al., 2019). Un ejemplo de esto es la luminosidad proveniente del sol. Esta luz es capturada por las plantas y convertida en energía química que sirve como alimento. En consecuencia, numerosas actividades humanas dependen de la energía solar, siendo especialmente dependientes de ella la agricultura y la silvicultura (Pimentel & Pimentel, 2008).

Esta potencia ha sido el denominador común para evaluar los impactos de las actividades humanas, ya que siempre es necesaria para generar procesos; sin embargo, no existía ningún método que explicara las diferencias en la capacidad de trabajar con diversas fuentes de energía. En respuesta a este problema, en la década de 1980 surgieron los conceptos de “emergía” y “transformidad”, basados en los flujos de energía y materiales en los ecosistemas para crear un registro (Campbell et al., 2005). Estos métodos “utilizan la base termodinámica de todas las formas de energía, recursos y servicios humanos y los convierten en equivalentes de una forma de energía: la emergía solar” (Amarante et al., 2018, p. 78).

La emergía es la disponibilidad de un tipo específico de energía que se ha utilizado directa o indirectamente en la transformación requerida para producir un bien o servicio (Odum, 2007). Mide la calidad de diversas formas de energía, como la luz solar, el agua, los combustibles fósiles y los minerales (Amarante et al., 2018). Este método se convierte en una herramienta cuantitativa para determinar todos los insumos necesarios para generar un bien.

Los diferentes niveles de energía necesitan una variable común para comparar; para ello, en la jerarquía energética, se utiliza la emergía solar como medida estándar. Esta puede expresarse en julios solares (emJoule solar), emcalorías (secal) o emkilocalorías (sekal) y retiene la memoria de la energía utilizada en la transformación, incluso cuando ya no está presente en el producto o servicio final (Odum, 2007). En otras palabras, la emergía es la expresión de toda la energía empleada en los procesos de trabajo que generan un bien o servicio (Doherty et al., 1993; Torres Verzagas et al., 2019). Cabe señalar que la emergía, a diferencia de la energía, no se puede medir directamente, sino que se debe cuantificar mediante el análisis de sistemas.

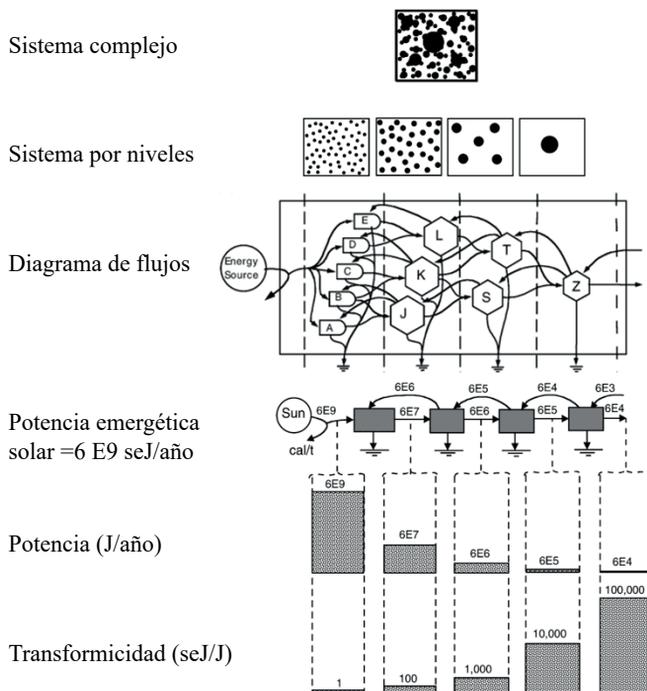
## II. MÉTODO DE SÍNTESIS EMERGÉTICA DE HOWARD T. ODUM

El método emergético enfatiza dos leyes de la termodinámica: la primera ley establece que la energía no se crea ni se destruye; solo sufre transformación (Cengel et al., 2019). Por ejemplo, la energía que ingresa a un bosque a partir de fuentes como la luz solar, el viento, la madera, el agua y los nutrientes se convierte en biomasa, que luego se emite en forma de respiración de las plantas (Izursa Azurduy, 2011; Podanuks, 2016). La segunda ley indica que las transformaciones de energía resultan en una pérdida de capacidad para realizar trabajo y, aunque no se pierde energía en sí, la pérdida de capacidad aumenta la entropía (Cengel et al., 2019). En este contexto, si un árbol muere y comienza su proceso de descomposición, una proporción considerable de su energía potencial queda fijada en el suelo y, parte de esa misma energía, queda como material genético que produjo cuando estaba vivo.

Esta segunda ley implica que la energía que pasa de un nivel trófico inferior a uno superior se reduce, pero la energía necesaria para la construcción de niveles superiores de autoorganización aumenta a medida que el sistema se vuelve más complejo. La figura 1 muestra que, basándose en la complejidad original del sistema, las unidades están separadas en niveles jerárquicos y en una red de flujo de energía, representada como una serie de transformaciones según la calidad y nivel de procesamiento del tipo de energía. Posteriormente, la energía útil fluye a través

de las transformaciones como una serie de interrelacione entre los flujos, mientras que la transformidad aumenta a medida que avanzan los niveles de complejidad (Doherty et al., 1993; Zhang et al., 2024).

Figura 1. Diagrama emergético de la jerarquía en la transformación de la energía



Fuente: Marrón y Ulgianti (2004).

El hecho de que la energía se concentre a medida que uno avanza, a través de los niveles de autoorganización del sistema, implica que un julio de energía solar, un julio de carbón o un julio de electricidad, aunque representen la misma cantidad, no representan la misma calidad de energía, en el sentido potencial que los distintos tipos de fuentes energéticas, en el mismo sistema (Lomas et al., 2007; Tilley, 2014). De esta manera, la incorporación del concepto “energía incorporada” se refiere a las diferencias de calidad energética en términos de costos de generación y declaraciones de calidad. Esta definición fue la base de la emergía sugerida por

David Scieceman en 1983, y las medidas de emjulios o emcalorías se convirtieron en el indicador para distinguir las unidades de energía (Brown & Ulgiati, 2004).

Existe una jerarquía de energías basada en su calidad para influir en el sistema, que va desde energías menos concentradas como el sol, hasta energías altamente concentradas como el petróleo. Considerando esto, un sistema complejo elige la energía solar como referencia, porque el análisis emergético supone que ella es el principal insumo de energía de baja concentración en la ecósfera (Prodanuks et al., 2015). Por tanto, la transformidad va a ser la medida de energía que se requiere para transformar un tipo de energía en otro; se mide en julios equivalentes a unidades solares por unidad de energía (Amarante et al., 2018; Tilley, 2014).

Por otro lado, las cuentas emergentes evalúan el trabajo de la biosfera como una energía directa e indirectamente solar, que convergen para sustentar la producción de bienes y servicios. Según este método, cuanto mayor sea el trabajo de la biosfera en la generación de recursos naturales y servicios ecosistémicos, mayor será su valor. En contraste, es posible dar un tamaño alternativo del valor del capital natural a los servicios ecosistémicos al momento de evaluar su costo de producción en términos de flujos biofísicos para respaldar la generación, extracción y uso (Brown & Ulgiati, 2004; Tilley, 2014; Franzese et al., 2015).

## II.1. Transformidad y tipos de intensidad de energía

La propia definición de energía y la existencia de una jerarquía de energías conducen a un problema práctico y teórico: transformar las diferentes calidades de energía o materia a la cualidad de energía referente (energía solar) y determinar qué posición ocupa cada elemento en la jerarquía energética. Se utiliza un factor de equivalencia o valor unitario de energía (UEV) para realizar la transformación y se denomina “intensidad de energía”. Este componente se utiliza para convertir los flujos de insumos (energía, materiales, dinero, información, etc.) en flujos emergéticos que impulsan un proceso (Amarante et al., 2018).

Existen diferentes procedimientos para calcular los valores unitarios de energía y muchos tipos de indicadores para energía, bienes, servicios y flujos de información. Sumado a esto, los UEV son específicos dependiendo de cada caso, lugar, tiempo o tecnología, y cada valor está estrictamente vinculado al proceso para el cual fue estimado (Ulgiati et al., 2010). Según Brown y Ulgiati (2004) existen al menos cinco categorías de intensidad de energía: transformidad, energía

específica, energía por unidad de dinero, energía por unidad de trabajo y potencia emergética.

La transformidad se expresa como la relación entre la energía total de una actividad y la energía producida por ella misma (exergía). La energía solar es la mayor, pero también es el aporte energético más disperso del mundo. La transformidad solar de la luz absorbida por la Tierra es 1.0, teóricamente. En este sentido, el álgebra emergente del factor de equivalencia de transformidad es la siguiente (Lomas, 2009):

$$E_i = Tr_i * Ex_i \quad (1)$$

Donde,  $E_i$  es la energía (seJ) del producto,  $Tr_i$  es la transformidad (seJ por unidad) y  $Ex_i$  es la energía útil o exergía (unidad de energía).

La energía específica se define como la energía por unidad de masa de producción y se expresa como energía solar por gramo (seJ/g) (Lomas, 2009). Los sólidos se podrían evaluar mucho mejor con datos de energía por unidad de masa debido a su concentración. En la misma línea, la ecuación de esta categoría es (Lomas, 2009):

$$E_i = tr_i * M_i \quad (2)$$

Donde,  $E_i$  es la energía (seJ) del producto,  $Tr_i$  la energía específica (seJ por unidad) y  $M_i$  es la masa (unidad de masa).

La energía por unidad de dinero es la energía que sustenta la generación de una unidad de producto económico expresado en efectivo nacional o moneda extranjera y se utiliza para convertir los flujos de dinero en energía, ya que a las personas se les paga con dinero y al medio ambiente no. El efectivo podría estimarse dividiendo el uso total de energía de un país por su producto interno bruto (PIB), que fluctúa con el tiempo y en ocasiones disminuye debido a la inflación (Lomas, 2009).

Por su parte, la energía por unidad de trabajo es la cantidad de energía soportada por una unidad de trabajo suministrada a un proceso. Cuando los empleados aplican su esfuerzo a una actividad, están invirtiendo indirectamente la energía que obtiene de su fuerza laboral (seJ por año o seJ por hora), o como energía por dinero ganado (seJ por dólar). En este caso, la mano de obra indirecta necesaria para producir y suministrar los flujos de materiales a un proceso se mide como un

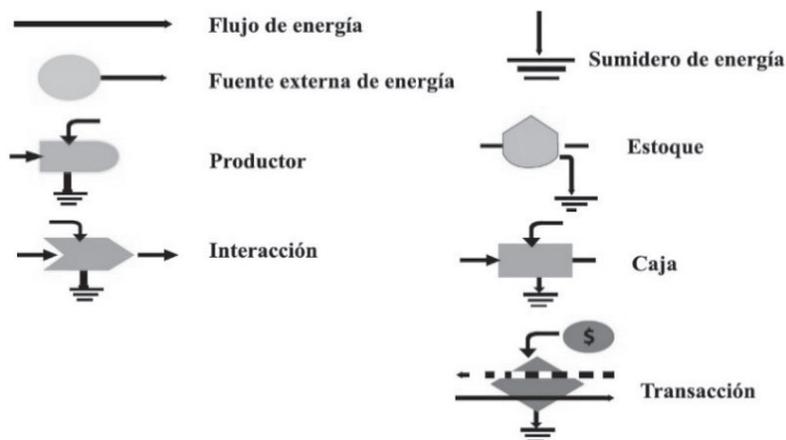
costo en dólares de servicios, por lo que la intensidad de emergencia se calcula como seJ por dólar (Vásquez Díaz, 2016).

Finalmente, la potencia emergética es un flujo de energía por unidad de tiempo y se expresa en unidades de potencial solar (seJ por solar o seJ por año) (Lomas, 2009). Esta categoría es un grado de potencia que indica el flujo de un recurso determinado. De acuerdo con Ulgiati et al. (2010), el flujo de recursos globales invertidos o captados por un proceso por unidad de tiempo afecta el índice de desarrollo de la actividad desde una gran escala como la biosfera hasta una escala corta como las economías, las granjas, las personas o las bacterias.

## II.2. Lenguaje emergético

La aplicación de símbolos emergéticos constituye una poderosa herramienta para el análisis de sistemas. En este sentido, el propósito de los flujos de energía es desarrollar un *stock* de actividades necesarias para la evaluación del medio (Álvarez et al., 2006; Torres Verzagas et al., 2019). Existen, entonces, varias nomenclaturas y vocabulario emergente que se describen a continuación (figura 2):

Figura 2. Principales símbolos del diagrama de energía empleados por Howard T. Odum



Fuente: Torres Verzagas et al. (2019).

### II.3. Procedimiento metodológico de la síntesis emergética

La metodología emergética de Odum (1996) se desarrolla en cuatro etapas: diseño del diagrama del sistema, cuadro de evaluación emergética, cálculo de índices emergéticos y la interpretación de los resultados (Álvarez Lima et al., 2020).

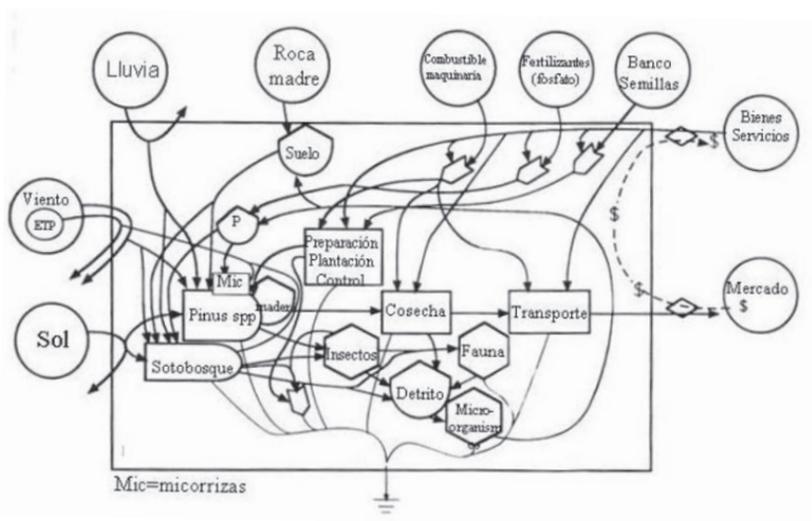
#### a) Etapa 1: diseño del diagrama sistémico

Esta etapa constituye una simplificación de la realidad, y muestra toda la energía que ingresa al sistema (fuentes renovables, fuentes no renovables, fuentes de importación o recursos económicos) a través de diagramas (Londoño et al., 2014). El diseño de flujo está precedido por la identificación de los límites del sistema, los componentes, las entradas y salidas, y cómo los materiales y la energía fluctúan. Con estos datos se crea el diagrama, para que pueda expresar toda la complejidad del sistema y representar cada elemento y símbolos de flujo establecidos por Odum (1996) (Álvarez Lima et al., 2020).

Por ejemplo, algunos diagramas de flujo pueden resultar tan robustos y complejos según sean las características del objeto de estudio, como en el caso de la explotación de la madera de pino (figura 3). La simbología de emergía denota círculos para las entradas de energía, mientras que las flechas indican orden y continuidad de procesos en el sistema. Asimismo, cada una de las energías puede ingresar en una o más etapas de crecimiento del cultivo, fijarse o volver a salir.

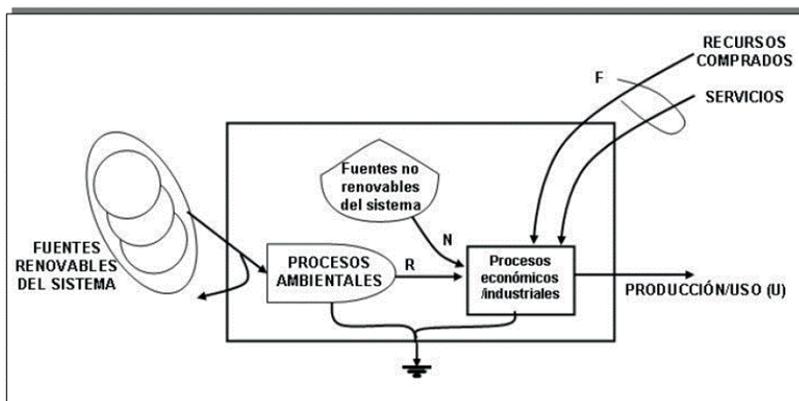
Sin embargo, para simplificar la contabilidad, los modelos complejos suelen resumirse para capturar las principales entradas y salidas del sistema, así como otros flujos clave para su funcionamiento, como el flujo de emergía renovable (R), el flujo de emergía local no renovable (N), importaciones de bienes y servicios (F), producción y utilización del sistema (U) (figura 4).

Figura 3. Diagrama de flujo para la explotación de madera de pino



Fuente: Lomas (2004).

Figura 4. Principales entradas y salidas del sistema de flujo para la exportación de madera de pino



Fuente: Lomas (2004).

## b) Etapa 2: tabla de evaluación emergética

En este paso se obtienen los datos y balances con la estimación efectiva del flujo, trabajo y energía del recurso a partir del diagrama final. Esto implica la construcción de una matriz donde los datos sobre los flujos entrantes, que cruzan los límites, se convierten en unidades emergéticas y se suman para encontrar la energía total del sistema (tabla 1) (Torres Verzagas et al., 2019).

Tabla 1. Principales campos integrados en una tabla de síntesis emergética

Nota	Ítem	Dato	Unidad	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (em\$/año)
1	$\acute{I}tem_1$	xx.x	J/año	xx.x	$Em_1$	$Em_1/EMR$
2	$\acute{I}tem_2$	xx.x	g/año	xx.x	$Em_2$	$Em_2/EMR$
...	...	...	...	...	...	...
n	$\acute{I}tem_n$	xx.x	J/año	xx.x	$Em_n$	$Em_n/EMR$
Y	Y-esim producto	xx.x	J o g/ año	$\frac{\sum_n^1 Em_i}{xx.x}$	$\sum_n^1 Em_i$	$EMR = \frac{\sum_n^1 Em_i}{PIB}$

Fuente: Lomas (2009) basado en Brown y Ulgiati (2004).

La columna “Nota” corresponde al orden consecutivo de flujos que pertenecen al sistema, mientras que la variable “Y” indica el dato original transformado a unidades emergéticas en las columnas “Dato” y “Unidad”. El rubro “Transformicidad”, se refiere a la energía por unidad que transforma las cifras de “Dato” en las cifras de “Energía solar (seJ/año)”. En este caso, la energía de cualquier producto del sistema es la energía total que se introdujo, aunque su transformicidad sea distinta (Odum, 1996; Brown & Herendeen, 1996, citado por Lomas, 2009; Bacic et al., 2020); es decir, la energía no cumple con la ley de la conservación de la masa y energía, sino que obedece a una memoria energética. El “Valor macroeconómico” se refiere al flujo o reserva de energía y se calcula dividiendo la energía entre la cantidad de actividad económica media movida por el total de energía del sistema (Lomas et al., 2007; Bacic et al., 2020).

## c) Etapa 3: cálculo de indicadores emergéticos

A partir de los flujos sistematizados en la tabla 1 de evaluación emergética (tabla 1), se calculan las relaciones para el objeto en estudio. Para lograr una integración de todas las relaciones humanas con la naturaleza en un socioecosistemas, el análisis emergético separa las fuentes renovables de las no renovables y de las entradas importadas a este (Amarante et al., 2018).

Los índices emergéticos ofrecen información sobre los sistemas de manera que permiten conocer su eficiencia en la utilización de las fuentes, evaluar la sostenibilidad y establecer comparaciones entre escenarios (Álvarez Lima et al., 2020). En la tabla 2, se puede observar los indicadores de mayor aprovechamiento para determinar la sostenibilidad de productos, operaciones y servicios a partir del método emergente propuesto por Amarante et al. (2018), aunque en la literatura se suelen encontrar otro tipo de índices tradicionalmente utilizados (anexo 1).

Tabla 2. Indicadores utilizados en la evaluación de socio-ecosistemas

Indicador	Nombre	Interpretación
$ELR = 1 \frac{N + F}{R}$	Razón de carga ambiental	Los valores bajos indican que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental. Cuando $ELR > 10$ hay una alta carga ambiental y cuando $3 < ELR < 10$ es considerado moderado.
$EYR = \frac{R + N + F}{F}$	Índice de rendimiento emergético	Relación entre la emergencia total del sistema sobre los recursos importados. Estima 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.

$ESI = \frac{EYR}{ELR}$	Índice de sostenibilidad energética	Indica la relación entre el índice de rendimiento energético 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.
$EIR = \frac{F}{R + N}$	Índice de inversión energética	Relaciona la entrada de recursos importados al sistema sobre la suma de los recursos renovables y no renovables.
	Transformicidad del producto o servicio final	Es la relación porcentual entre la emergía sobre la energía total del producto o servicios producido.
$R = \frac{R}{R + N + F} * 100$	Ratio de renovación	Es la relación entre las entradas de las fuentes renovables al sistema sobre la emergía total.
$T = \frac{R + N + F}{E}$	Costo emergético del suelo	Es la relación entre las entradas no renovables al sistema sobre la emergía total.
$SEC = \frac{N}{R + N + F}$	Tasa de cambio de emergético	Se calcula como el cociente entre el total de la emergía del producto por la emergía recibida de la venta, donde PP es el precio del producto y EMR es la relación emergía-dinero o canje energético. Representa la cantidad de emergía que se puede comparar en un determinado país por una unidad de dinero (un dólar) en un año específico.

Fuente: adaptado de Amarante et al. (2018).

#### d) Etapa 4: interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados aplica el “Principio de Máximo Poder Emergente” propuesto por Odum, el cual se basó en el principio de máxima poten-

cia de A. J. Lotka que considera la energía como parte del proceso evolutivo de las especies. A partir de este concepto, se propone que en la competencia entre procesos autoorganizativos prevalecen las relaciones y diseños que maximizan la potencia emergética (Odum, 1971; Tilley, 2004). Estos resultados se deben analizar como una tasa de adquisición de energía y no a la suma de las energías adquiridas por los componentes del sistema (Cai et al., 2004). En otras palabras, se trata de utilizar de manera eficiente la energía generada en el sistema (Lomas, 2009).

### III. ESTUDIOS DE CASO: SÍNTESIS EMERGÉTICA, VALORACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD Y AGRICULTURA

El análisis emergético de sistemas agrícolas se ha examinado en diversos estudios de caso. Del Pozo Rodríguez et al. (2014) describieron la metodología de análisis emergético aplicada a sistemas de producción bananera convencional y agroforestal. Para esto, se utilizó el protocolo propuesto por Odum (1996), evaluando los indicadores de transformidad, renovabilidad, razón de rendimiento emergético, razón de inversión emergética y razón de intercambio emergético. Como resultado, se valida que los sistemas agroforestales son una opción más atractiva en comparación con los convencionales, principalmente por la cantidad de servicios ecosistémicos que genera y el uso eficiente de recursos renovables.

Asimismo, Kuczuk et al. (2017) analizaron el impacto de sistemas de producción mixtos de ganado y cultivos bajo modalidades intensivas y orgánicas. En este caso, se utilizaron criterios como Pr para la razón de energía obtenida de recursos renovables, ELR para expresar la carga ambiental generada y EYR como parámetro de eficiencia y la cantidad de energía total por unidad obtenida en la producción. La razón con mayor representatividad es el de maquinaria y equipos; además, existe una proporción significativa por parte de los fertilizantes de origen mineral; mientras que la razón en el uso de combustibles es la más baja. El indicador de ELR es igual a 3.50, debido al uso de fertilizantes con minerales y su sustitución por parte de fertilizantes naturales, lo cual da como resultado una razón del 20% en relación con fuentes renovables.

Por otro lado, Totino (2016) evaluó las contribuciones del ambiente a las producciones de soja en dos localidades de Argentina: Pampa Ondulada y Chaco Seco, a través de la metodología de síntesis emergética. Una vez construida la tabla con los ingresos a los sistemas se utilizaron los índices EYR, ELR, %R, EIR y ED para medir para medir la entrada de energías al sistemas, capacidad ambiental, proporción de recursos renovables, relación de estos recursos y cantidad de energía

aplicada por unidad de tiempo, respectivamente. En este caso, se considera que las dos zonas poseen diferencias en la cantidad y tipos de recursos utilizados; no obstante, no se observan diferencias significativas en relación con la cantidad de emjoutes solares unitarios. Se presentan diferencias en la variable “exportación de granos” entre los dos sitios.

En relación con sistemas animales, Araujo Nascimento et al. (2020) estudiaron el impacto de la producción de pollos de engorde bajo técnicas sostenibles como respuesta a la producción creciente en Brasil y la preocupación con el nivel de explotación de recursos para el sistema. En esta línea, se construye el sistema emergético de engorde y se considera las fuentes de recursos renovables y no renovables, así como los costos de externalidades del proceso. El análisis emergético indica una alta dependencia de importación de recursos como concentrados a base de maíz y soya para la producción de pollos, lo cual implica una relación baja en el costo/beneficio del negocio y un impacto significativo en el ambiente.

De igual manera, Gonçalves & Ulfert (2012) compararon un sistema acuícola de camarón orgánico contra uno convencional en la localidad de Laguna Guaraira. En este sentido, se utilizó la síntesis emergética para expresar los costos totales relacionados con el proceso en unidades solares. El estudio involucró criterios de Transformicidad, Renovabilidad, EYR, EIR, ELR y Razón de Cambio de Emergía. Los resultados indican efectos positivos en el caso de la producción orgánica con alta cantidad de retorno de recursos, alto nivel de factores de producción locales y baja densidad en el flujo de energía. Sin embargo, es necesario mejorar el sistema en términos de la cantidad de transformicidad en energía para lo cual se recomienda el incremento de especies para mejorar la producción de biomasa por ciclo.

## CONCLUSIONES

La metodología de síntesis emergética de Howard T. Odum se basa en principios ecológicos y termodinámicos que reflejan la relación de interdependencia de los sistemas naturales. Esto permite analizar la sostenibilidad de cualquier socioecosistema mediante la interacción entre el ser humano y la naturaleza en cada escenario. Además, esto amplía el panorama de la injerencia humana en el medio ambiente y los recursos naturales terminando en evaluar la sostenibilidad de las operaciones productivas.

El análisis emergético de sistemas productivos genera un flujo de información esencial para la toma de decisiones, ya que permite estimar valores de diferentes componentes del sistema y definir condiciones de sostenibilidad para la elaboración de políticas públicas. De la misma manera, ayuda a identificar las prácticas inapropiadas y modificar aquellas que resultan insostenibles.

Es de suma importancia hacer un análisis crítico de los datos de transformación que se recopilan para la elaboración de los análisis sistémicos, debido a que en la mayoría de la literatura estudiada se toman en consideración valores de transformicidad propuestos por otros autores, quienes también consideraron apoyarse en los valores presentados en trabajos anteriores. Esto podría ser un problema con la selección de los números y, por ende, con la redacción de conclusiones imprecisas, por lo que se debe tomar como referencia para el análisis del sistema con las mismas condiciones ambientales del caso de estudio.

Para Costa Rica, los mecanismos para el diseño de políticas agroambientales deben girar en torno al análisis emergético, que es compatible con los sistemas de producción rural y puede fundamentar el uso de instrumentos como precios energéticos, figuras impositivas, proyectos de inversión enfocados en la eficiencia emergética y el potencial de transformación de sistemas existentes, entre otros. En este sentido, las prácticas orgánicas, el uso de recursos renovables y recursos de mínimo impacto conducen a un mejor desempeño ambiental que puede ser medido, aún más para reducir los costos y la dependencia de químicos importados. Lo anterior, requiere cambios en los paradigmas convencionales y la adopción disciplinada de nuevas formas de producción.

## REFERENCIAS

- Álvarez, S., Lomas, P. L., Martín, B., Rodríguez, M., & Montes, C. (2006). *La Síntesis Emergética ("Emergy Synthesis"): Integrando energía, ecología y economía*. (FUNGOBEM Documento de trabajo No. 2). Madrid.
- Álvarez-Lima, I. J., Morejón-Mesa, D. C., & Rodríguez, P. P. (2020). Fundamentals for the Implementation of the Emergetic Synthesis Methodology. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 29(2), 84-92. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93264060009>
- Amaral, L. P., Martins, N., & Gouveia, J. B. (2016). A review of emergy theory, its application, and latest developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 882-888

- Amarante, E. B., López Bastida, E., Romero Romero, O., Calvo, A. E., & Kiran Schulz, R. (2018). La emergía como indicador de Economía ecológica para medir sustentabilidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(5), 78-84. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1027>
- Araujo Nascimento, R., Rojas Moreno, D. A., Silva Alve, L. K., dos Santos, T. S., dos Reis, B. Q., & Gameiro, A. H. (30-31 de octubre de 2020). *Sustainability assessment of broiler production system in São José do Rio Preto/SP: uma abordagem da síntese emergética* [Discurso principal]. V Simpósio de Sustentabilidade & Ciência Animal, São Paulo, Brazil.
- Armenteras, D., González, T. M., Vergara, L. K., Luque, F. J., Rodríguez, N., & Bonilla, M. A. (2016). A review of the ecosystem concept as a “unit of nature” 80 years after its formulation. *Ecosistemas*, 25(1), 83-89. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.12>
- Bacic, M. J., Ortega, E., Gusman Ferraz, J. M., & Guimarães Ferreira Dos Santos, A.B. (2020). Contabilidad Ambiental Incorporando Análisis Emergético y Externalidades: Aplicación en la Producción de Soja. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, (17). <https://intercostos.org/ojs/index.php/riic/article/view/11>
- Brown, M., & Ulgiati, S. (1999). Emery Evaluation of the Biosphere and Natural Capital. *Ambio*, 28(6), 486-493. <https://doi.org/10.4324/9781315197715-8>
- Brown, M., & Ulgiati, S. (2004). Energy Quality, emery, and transformity: H.T. Odum’s contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002>
- Cai, T. T., Olsen, T. W., & Campbell, D. E. (2004). Maximum (em)power: A foundational principle linking man and nature, *Ecological modelling*, 178(1-2), 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.009>
- Campbell, D. E., Brandt Williams, S. L., & Meisch, M. E. (2005). *Environmental Accounting Using Emery: Evaluation of the State of West Virginia*. (United States Environmental Protection Agency, Report AED-03-10). [https://www.researchgate.net/publication/237034118\\_Environmental\\_Accounting\\_Using\\_Energy\\_Evaluaci3n\\_of\\_the\\_State\\_of\\_West\\_Virginia#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/237034118_Environmental_Accounting_Using_Energy_Evaluaci3n_of_the_State_of_West_Virginia#fullTextFileContent)
- Campbell, D. E. (2013). Keeping the books for the environment and society: the unification of emery and financial accounting Methods. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 1(1), 24-41. <http://dx.doi.org/10.5890/JEAM.2013.01.003>
- Cengel, Y., Boles, M., & Kanoglu, M. (2019). *Termodinámica*. México: McGraw Hill.

- Del Pozo Rodríguez, P. P., Vallim de Melo, C. & Ortega Rodríguez, E. (2014). El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(4), 59-63. <https://www.redalyc.org/pdf/932/93231641010.pdf>
- Doherty, S. J., Brown, M. T., Murphy, R. C., Odum, H. T., & Smith, G. A. (1993). *Emergy Synthesis Perspectives, Sustainable Development, and Public Policy Options for Papua New Guinea*. (The Center for Wetlands & Water Resources, Final Report No. 93-06). <https://original-ufdc.ufflib.ufl.edu/AA00004018/00001/1j>
- Franzese, P. P., Buonocore, E., Paoli, C., Massa, F., Stefano, D., Fanciulli, G., Miccio, A., Mollica, E., Navone, A., Russo, G. F., Povero, P., & Vassallo, P. (2015). Environmental Accounting in Marine Protected Areas: The EAMPA Project. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 3(4), 324-332. <https://doi.org/10.5890/JEAM.2015.11.002>
- Gonçalves Lima, J. S., & Ulfert Focken, E. C. (2012). Emergy evaluation of organic and conventional marine shrimp farms in Guaraira Lagoon, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 35, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.009>
- Hau, J. L., & Bakshi, B. R. (2004). Promise and Problems of Emergy Analysis. *Ecological Modelling*, 178(1-2), 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.016>
- Hlidkvist, B. H. (2005). *Primary Emergy Evaluation of Iceland: The question of a sustainable natural resource management* [Tesis de maestría, Lunds Universitet]. [https://www.lumes.lu.se/sites/lumes.lu.se/files/berghthora\\_skuladottir.pdf](https://www.lumes.lu.se/sites/lumes.lu.se/files/berghthora_skuladottir.pdf)
- Izurza Azurduy, J. L. (2011). Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*, 46(2), 71-76. <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v46n2/a01.pdf>
- Kuczuk, A., & Pospolita, J. (2020). Sustainable Agriculture – Energy and Emergy Aspects of Agricultural Production. *European Research Studies Journal*, 28(4), 1000-1018. <https://doi.org/10.35808/ersj/1728>
- Kuczuk, A., Pospolita, J., & Waclaw, S. (2017). Energy and emergy analysis of mixed crop-livestock farming. *International E3S Web of Conferences*, 19(4), 02033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171902033>
- Lomas, P. L. (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 doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/4124>

- Lomas, P. L., Donato, M. D., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética: Una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Ecosistemas*, 16(3), 37-45. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/91>
- Londoño, N. A., Suárez, D. G., & Iván, H. (2014). Emergy Evaluation: A Tool for the Assessment of Sustainability in Project Development. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(2), 172-178. [chrome-extension://efaidnbmninnkcbajpcjgclcfefindmkaj/https://www.ijera.com/papers/Vol4\\_issue2/Version%201/Z4201172178.pdf](chrome-extension://efaidnbmninnkcbajpcjgclcfefindmkaj/https://www.ijera.com/papers/Vol4_issue2/Version%201/Z4201172178.pdf)
- Odum, H. T. (1971). *Environment, Power, and Society*. John New York: Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/biuz.19740040308>
- Odum, H. T. (1996). *Environmental Accounting. Emery and Environmental Decision Making*. New York: Wiley & Sons Inc.
- Odum, H. T. (2007). *Environment, power, and Society for the twenty-first century: The hierarchy of energy*. New York: Columbia University Press.
- Peniche Campos, S. (2021). El nexo agua, energía y alimentación. Apuntes desde la perspectiva de la economía ecológica en el caso mexicano. *SaberEs*, 13(1), 57-72. <https://doi.org/10.35305/s.v13i1.243>
- Pimentel, D., & Pimentel, M. (2008). *Food, energy, and society*. Boca Raton; CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420046687>
- Prodanuks, T., Veidenbergs, I., Cimdina, G., Mohannad, S., & Blumberga, D. (2016). Emery Analysis of Biomass CHP. Case Study. *Energy Procedia*, 95, 366-371. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.024>
- Rydberg, T., & Jansén, J. (2002). Comparison of horse and tractor traction using emery analysis. *Ecological Engineering*, 19(1), 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)
- Tilley, D. R. (2004). Howard T. Odum's contribution to the laws of energy. *Ecological Modelling*, 178(1), 121-125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.12.032>
- Tilley, D. R., & Martin, J. F. (2006). Environmental Accounting of Agricultural Sustainability Using Emery Analysis. In K.C.Ting, David H. Fleisher, Luis F. Rodriguez (Eds.). *Systems Analysis and Modeling in Food and Agriculture*. (pp.69-95). Oxford: EOLSS/Unesco.
- Tilley, D. (2014). Transformity dynamics related to maximum power for improved emery yield estimations. *Ecological Modelling*, 315, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.10.035>
- Torres, E., & Siche, R. (2016). Sostenibilidad ambiental de dos sistemas de producción de café en Perú: orgánico y convencional. *Revista Ciencia y Tecnología*, 12(3), 51-65. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/1401>

- Torres Verzagas, B. E., Leyva Galán, Á., & Pozo Rodríguez, P. P. (2019). Emergía: Generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad. *Cultivos Tropicales*, 40(2), e10. <https://www.redalyc.org/journal/1932/193262825010/html/>
- Totino, M. (2016). Síntesis emergética como herramienta de comparación entre dos sistemas de producción agrícola argentinos: Chaco Seco y Pampa Ondulada. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 26, 123-139. <http://hdl.handle.net/11336/60189>
- Ulgiatei, S., Agostinho, F., Lomas, P., Ortega, E., Viglia, A., Zhang, P., & Zucaro, A. (14-16 de enero de 2010). *Criteria for Quality assessment of Unit Emergy Values* [Discurso principal]. 6th. Biennial Emergy Conferences. Gainesville, Florida, United States.
- Vázquez Díaz, S. A. (2016). *Análisis de la sustentabilidad de diferentes tipos de vivienda en el estado de Chiapas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chiapas]. <http://www.cecodes.net/files/AN%C3%81LISIS%20DE%20SUSTENTABILIDAD%20DE%20DIFERENTES%20TIPOS%20DE%20VIVIENDA%20EN%20EL%20ESTADO%20DE%20CHIAPAS.pdf>
- Verna, P., Singh, P., Singh, R., & Raghubanshi, A. S. (2020). *Urban ecology emerging patterns and social-ecological systems*. Ámsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-05562-0>
- Zhang, C., Su., B., Beckman, M., & Volk, M. (2024). Emergy-based evaluation of ecosystem services: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114201. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114201>

© 2024 por los autores; licencia no exclusiva otorgada a la revista *Estudios económicos*. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0) de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>