

Revisión bibliográfica

Emergía: generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad

Bruna Elena Torres-Verzagas^{1*}

Ángel Leyva-Galán²

Pedro Pablo Del Pozo-Rodríguez³

¹Dirección de Protección Fitosanitaria de Matanzas. Carretera central km 111 Gelpi Matanzas, Cuba

²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

³Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”, carretera a Tapaste y Autopista Nacional. San José de las Lajas. Mayabeque, Cuba. CP 32 700

*Autor para correspondencia. elenabt@atenas.inf.cu

RESUMEN

El hombre, a través de su historia, ha utilizado la emergía como una herramienta útil, para evaluar la eficiencia de los sistemas productivos, aunque por mucho tiempo y por el desconocimiento de las ventajas que proporciona el empleo del análisis emergético, no se le haya dado una mayor utilización. Los avances de la ciencia, han permitido profundizar en los estudios acerca de la implementación de la metodología síntesis emergética. Anualmente se consume y se genera, una considerable cantidad de diferentes tipos de energía en los disímiles procesos productivos, pero solo una cierta parte, se reconoce y contabiliza, ya que la mayoría se pierde por la ignorancia del beneficio que representa el poder utilizarla, o ponerla al servicio del ecosistema. Ante esta problemática, se intenta demostrar la importancia que reviste el estudio y la implementación de metodologías que conduzcan a un acercamiento a la sostenibilidad. En la presente revisión bibliográfica, se hace un abordaje sobre el tema de la emergía. Además, se resumen aspectos relacionados con la nomenclatura a utilizar, así como indicadores e índices más comunes a evaluar. Finalmente, se exponen algunos

ejemplos, en los que el empleo de dicha metodología ha sido exitoso, a la vez que se reflexiona sobre la importancia del tema, para futuras investigaciones.

Palabras clave: metodología, eficiencia, análisis emergético, ecosistema

Recibido: 11/01/2018

Aceptado: 26/03/2019

INTRODUCCIÓN

A principios del último siglo, el hombre comenzó a desarrollar toda una nueva base energética, sobre el uso del carbón, el petróleo y otras fuentes de energía, para complementar la energía solar. Grandes cantidades de energía, cuya acumulación era el resultado de cientos de millones de hectáreas de energía solar, de repente se convirtieron en fuentes de energía disponibles para el hombre ⁽¹⁾. Después de más de cinco décadas de trabajo en ecología y teoría general de sistemas, este autor ha propuesto un método biofísico, basado en el análisis de la energía con memoria, denominado Emergía, para llevar de una manera correcta, la contabilidad de los servicios, que proveen los ecosistemas de forma gratuita.

El primer enunciado formal de lo que posteriormente se daría en llamar emergía, se produjo a través de la siguiente reflexión “La energía se mide en calorías, btu, kWh y otras unidades incontrovertibles, pero la energía tiene una escala de calidad, que no es capturada por esas medidas. La capacidad para desarrollar trabajo para el hombre, depende de la calidad y la cantidad de energía y se mide mediante la cantidad de energía de una menor calidad necesaria, para desarrollar energía de un mayor grado de calidad. La escala de la energía va, desde la energía solar diluida destinada a la producción primaria, el carbón, del carbón al petróleo, a la electricidad, hasta los esfuerzos de procesamiento y computación humanos” ⁽²⁾. Entre 1986 y la actualidad, la metodología emergética ha venido desarrollándose, a la vez que la comunidad de investigadores se expandía y se presentaban nuevas aplicaciones de la metodología, en sistemas combinados hombre-naturaleza, lo que se ha convertido, a su vez, en nuevos desafíos. La madurez de la metodología, ha derivado en definiciones conceptuales y nomenclaturas más rigurosas, así como un refinado en los métodos de cálculo de las transformicidades.

El análisis emergético propuesto por Howard T. Odum, constituye una metodología válida, de la evaluación integral y sistémica de los ecosistemas, la cual estima los valores de emergías

incorporados en los productos, procesos y los servicios ambientales, así como el impacto de las actividades antrópicas en los ecosistemas ⁽³⁻⁷⁾. Países en Latinoamérica y el mundo, han logrado resultados satisfactorios al utilizar el análisis emergético, como vía para solucionar problemas en los que se entremezclan, los elementos, tanto naturales como socioeconómicos, para la evaluación integral y sistémica de los ecosistemas siendo Brasil, uno de los más fieles exponentes de estos estudios.

En la actualidad, el empleo de esta metodología, cobra una importancia trascendente; sin embargo, la investigación en Cuba es aún incipiente, ya que solo se cuenta con la experiencia acumulada de algunos autores ⁽⁸⁾, para el emprendimiento de trabajos de similar magnitud.

Generalidades y conceptualización

Indistintamente se han manejado los términos: Emergía, Metodología Emergética, Síntesis Emergética, Análisis Emergético o Metodología Síntesis Emergética. El concepto en sí, ha generado multitud de controversias, dentro de muchas comunidades académicas, entre ellas la Ecología, Termodinámica y Economía ⁽⁹⁻¹⁴⁾. Para evitar confusiones con otras formas de análisis y definir rigurosamente los conceptos, se ha desarrollado toda una nomenclatura energética, que define los términos, simbología, abreviaturas, unidades, indicadores e índices, usados en las evaluaciones emergéticas.

La emergía es una herramienta, que puede ser utilizada para comparar la obra de la naturaleza con la de los humanos, sobre una base justa y equitativa ⁽¹⁵⁾. Asevera este autor, que es la suma de toda la energía de una forma necesaria para desarrollar un flujo de energía de otra forma, en un período de tiempo dado ⁽¹⁵⁾; dicho de otra forma, es la energía útil de una determinada forma, usada directa o indirectamente para generar un determinado producto o servicio. Su unidad es el emjullo energético y al usarla se pueden poner sobre una base común, la luz solar, los combustibles, la electricidad y los servicios humanos, expresándolos en emjulos de energía solar, que cada uno de ellos requiere para ser producidos. Existen otras definiciones pero, en general, la emergía tiene en cuenta diferentes formas de energía y recursos (e.g. luz del sol, agua, combustibles fósiles, minerales, entre otros). Cada una de estas formas de energía, se produce a través de procesos de transformación en la naturaleza y tiene una determinada capacidad para realizar trabajo, tanto en sistemas ecológicos como humanos. El reconocimiento de esas diferencias en “calidad”, es un concepto clave en la metodología de la Emergía.

Expresando el valor de los productos en unidades de emergía, es posible comparar los diferentes tipos, usando la transformidad^(16,17). La emergía, expresa el costo de un proceso o un producto, en equivalentes de energía solar, considerando que es nuestra fuente de energía final.

La metodología síntesis de emergía evalúa los recursos y servicios en los sistemas ecológicos y económicos, sobre una base energética común y cuantifica el trabajo ambiental directo e indirecto, para generar un recurso o un servicio. Algunos autores^(18,19), nombraron así esta metodología por ser un enfoque que intenta el entendimiento del todo, de un sistema y su relación con los sistemas circundantes, en vez de la disección y fragmentación que se realiza en un análisis. Otros autores han podido constatar que la síntesis emergética da una imagen comprensible de las contribuciones ambientales a un producto o servicio⁽²⁰⁾, debido a que en una misma unidad es capaz de integrar el flujo de materia, energía y capital⁽¹⁸⁾.

La emergía solar, es la energía solar consumida directa o indirectamente, para hacer un producto o realizar un servicio y su unidad es el emjulio solar (“solar emjoule” o sej, en inglés). Para evaluar todos los flujos y almacenamientos sobre una referencia común, se usa la emergía solar^(21,22), que ha sido definida con anterioridad. El flujo de energía que soporta cada fuente de importancia, se expresa en unidades de emergía solar.

La evaluación en términos emergéticos del uso de insumos y recursos económicos, es relativamente fácil, aunque en el caso de los recursos naturales, se requiere un esfuerzo mayor para obtener los valores de los flujos de materia y energía y sus respectivos factores de conversión a flujos de emergía. En análisis emergéticos las variables ambientales, sociales y económicas son incluidas, así como los índices son calculados como herramientas de comparación para diferentes sistemas⁽²³⁾. A pesar de sus ventajas, el análisis emergético ha recibido algunas críticas, en particular de parte de los economistas, por el hecho de ignorar la valoración humana de los bienes y servicios⁽²⁴⁾; sin embargo, la cuantificación de emergía apunta a proveer un valor egocéntrico de los productos y procesos ecológicos⁽¹⁵⁾.

Las bases teóricas y conceptuales de la metodología emergética, se encuentran en la termodinámica, la ecología de sistemas⁽²⁵⁾ y la teoría general de sistemas⁽²⁶⁾. Existen dos publicaciones clave que sirven para entender la historia de esta teoría durante sus primeros 30 años: el libro de H.T Odum “Environmental Accounting”⁽¹⁸⁾ y el volumen editado por C.A.S. Hall titulado “Máximum Power”⁽²⁷⁾.

Al inicio de los años 50, Odum observó la calidad de la energía a partir de los resultados de sus investigaciones y modelos de simulación de los ecosistemas y la naturaleza⁽²⁸⁻³⁰⁾, entre

otros, en los que manejaba diferentes formas de energía a diferentes escalas. Sus investigaciones sobre los flujos de energía en los ecosistemas y las diferencias en el potencial de trabajo de la luz del sol, las corrientes de agua dulce, los vientos, las corrientes oceánicas, e incluso, los combustibles fósiles pusieron en evidencia que cuando dos o más fuentes de energía dirigen un sistema, estas no se pueden añadir sin convertirlas primero a una medida común, que tenga en cuenta no sólo su cantidad sino también su calidad. Este razonamiento conducía al concepto de “energía de un determinado tipo” con el nombre de “coste energético” ⁽³¹⁾.

Síntesis de energía: punto de partida como un nuevo campo de estudio

El punto de partida de la síntesis de energía como un nuevo campo de estudio, radica en que se pueden comparar diferentes tipos de energía, utilizando factores de conversión que muestran la cantidad de tipos de energía equivalentes. En base al principio de “flujo máximo de energía” ⁽³²⁾, se propuso una nueva ley de la termodinámica, en base al principio de empoder máximo, que es la velocidad de flujo de energía de forma análoga a poder, que es a su vez, la velocidad de variación de la energía ^(1,22).

Lenguaje emergético

Resultan de gran importancia el conocimiento y el dominio del lenguaje y la nomenclatura, referidos al tema objeto de estudio. En este empeño, es obligado apearse a la simbología utilizada por Odum, para lo cual se hace referencia, al artículo titulado, “Emergía (con “m” mismo) e o sistema embalagem idéias para modelagem utilizando a análise energética” ⁽³³⁾, en el cual se visualizan los principales símbolos del diagrama de energía (Figura 1) ^(18,34,35), aunque los mismos han sido utilizados desde 1965.

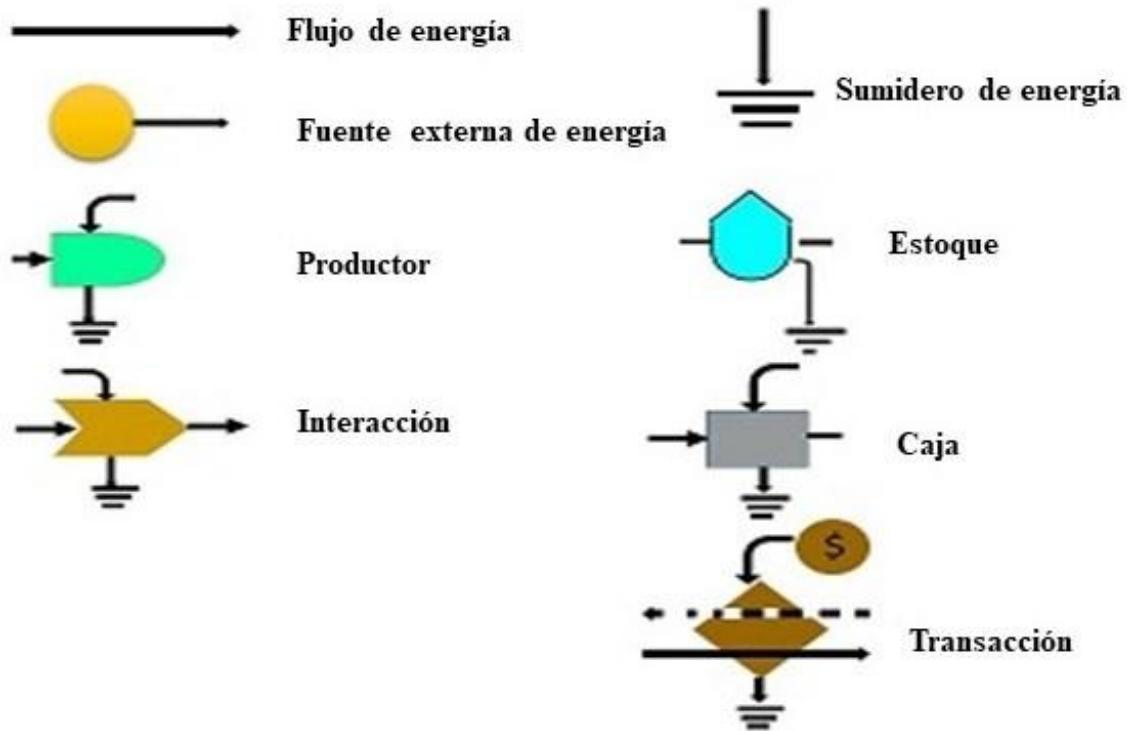


Figura 1. Principales símbolos del diagrama de energía ^(18,34,35)

Una vez adquirido el conocimiento acerca del lenguaje, se puede emplear esta herramienta en diferentes áreas de investigación.

Para transformar los flujos de materia, energía y capital, en emergía expresada en una moneda común (como los emjoules solares), se necesita información adicional. Este factor adicional es la transformidad, que se define como la emergía de un tipo requerida para hacer una unidad de emergía de otro tipo ⁽³⁶⁾.

Utilidad de la metodología emergética como herramienta para evaluar sostenibilidad

La síntesis emergética ha resultado ser una valiosa herramienta, para evaluar el desempeño de los ecosistemas agrícolas, en cuanto al consumo de recursos durante el proceso productivo y la eficiencia resultante ⁽¹⁴⁾.

A partir de las variaciones registradas de los indicadores emergéticos en el tiempo, se pueden ilustrar tendencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas. Se han llevado a cabo estudios basados en la síntesis emergética que exploran, desde una perspectiva histórica, el consumo de bienes ecológicos y económicos de ecosistemas agrícolas ⁽³⁷⁾.

Para la utilización y el análisis de esta metodología se siguen los siguientes pasos: (a) elaboración del diagrama sistémico; (b) elaboración de la tabla de evaluación energética; (c) cálculo de los índices emergéticos; (d) interpretación de los resultados ⁽¹⁸⁾.

El diagrama y los flujos de energía, pueden ser útiles para una mejor comprensión de las leyes de la termodinámica. Su propósito es desarrollar un inventario crítico de los procesos, reservas y flujos que son “impulsores” importantes del sistema y son, por tanto, necesarios para la evaluación. Cualquier porción del universo puede considerarse como un sistema o una entidad, formada por unidades o componentes interdependientes que interactúan entre sí y funcionan como una entidad integrada, usando los símbolos de la teoría general de sistemas ⁽³⁸⁾.

El diagrama debe estar siempre referido a un sistema superior (aproximación “menor detalle-mayor detalle”), ya que permite dar un panorama más claro de la organización del sistema y una vez elaborado podrá realizarse el cálculo energético de cada flujo para hallar su equivalente emergético.

Los datos de los flujos que entran a los límites del sistema se hallan en unidades energéticas (julios) o específicas (gramos) generalmente anuales (J/año o g/año). Estas unidades se multiplican por su respectiva transformidad para obtener su emergencia y, posteriormente se suman, para obtener la emergencia total y calcular los respectivos índices emergéticos ⁽³⁹⁾. El objetivo de la construcción del diagrama sistémico, es representar visualmente el sistema estudiado, con todas las entradas (sean ellas de los recursos de la naturaleza o de la economía), flujos internos, pérdidas y salidas (en la forma de energía, productos, dinero, etc.). Ello representará, lo más real posible, el sistema estudiado, expresando toda su complejidad y constituye la base para realizar el análisis emergético de los sistemas estudiados, para lo cual se utiliza la simbología propuesta por Odum ⁽¹⁸⁾.

Para la elaboración de este diagrama o modelo cualitativo de los sistemas se toman en consideración los recursos de la naturaleza (I), recursos renovables (R) y no-renovables (N), los recursos de la economía (F), materiales (M) y servicios (S), en la Figura 2 se muestra el modelo de diagrama a utilizar.

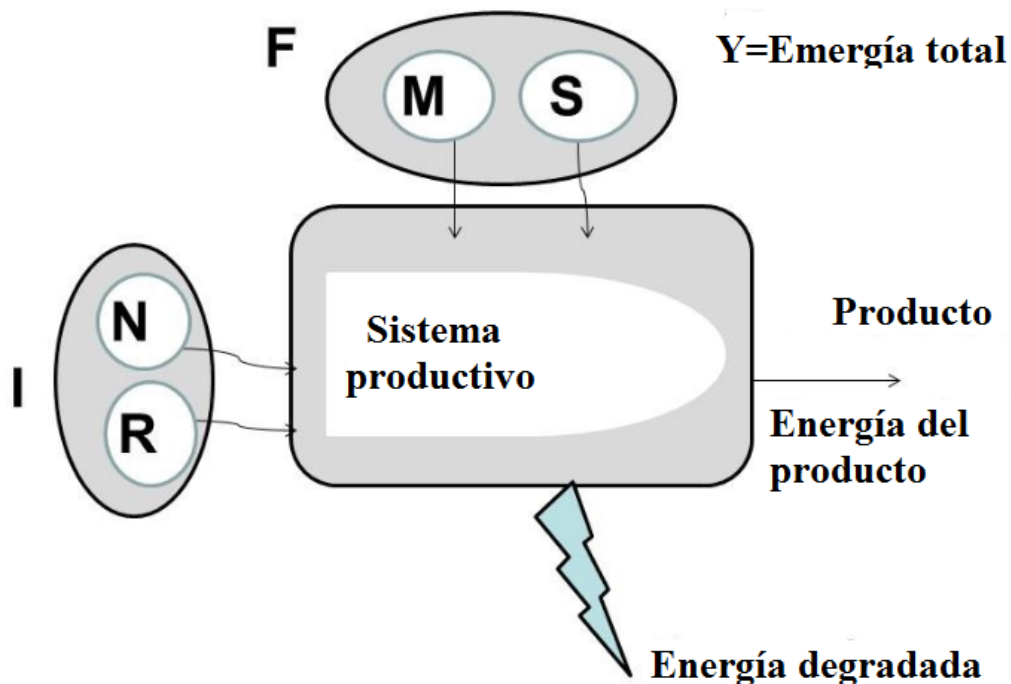


Figura 2. Modelo de un Diagrama Sistémico

Es posible presentar los diagramas sistémicos de los flujos de energía de los diferentes sistemas, pues a partir de ellos se analiza de forma cualitativa la totalidad de fuentes de energía que entran, las que salen y los flujos internos que confluyen en los mismos, al depender estos de los recursos de la naturaleza. Importante es lograr un buen aprovechamiento de la fijación biológica de nitrógeno, la captura de carbono y tener en cuenta la movilización de minerales en el sistema, pudiendo disponer de amplia diversidad y cantidad de biota en el suelo, así como poseer la cantidad de especies vegetales capaces de almacenar el recurso carbono (CO) de la naturaleza, a través de la fotosíntesis.

Es por ello que la inclusión de árboles y arbustos en los ecosistemas agrícolas constituye una opción válida y necesaria, que ha tomado interés e importancia para la producción y protección de los agroecosistemas en el trópico y en especial en los países latinoamericanos, cuyos resultados se sustentan en el incremento de la productividad y calidad de vida de los productores ⁽⁸⁾.

El segundo paso se refiere, a la preparación de una tabla de evaluación energética (Tabla 1) y para ello se tienen en cuenta los flujos de recursos, trabajo y energía, a partir del diagrama previamente elaborado. Los datos sobre los flujos de entrada que cruzan los límites, se convierten en unidades energéticas y entonces se suman para obtener la energía total que

dirige el sistema. Estos flujos por unidad de tiempo (habitualmente por año), se presentan en una tabla como elementos separados, realizando los cálculos de los componentes (energía solar, mareas, electricidad, lluvia, etc.) con la respectiva cantidad de emergía.

Tabla 1. Modelo de una tabla energética

| Nota | Contribuciones | Valor numérico | Unidad transformación | Flujos de energía |
|------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|
|------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|

Para la estimación de los índices también se utiliza el *software* Emtable, el cual posee diferentes módulos (hojas de cálculos), en los que introducen las informaciones básicas para los cálculos y estas serían las que se exponen a continuación:

- Informaciones generales de la unidad productiva estudiada
- Recursos renovables y los no-renovables de la naturaleza
- Materiales de la economía, con sus respectivas renovabilidades
- Financiamiento
- Infraestructura
- Servicios de la economía, sea de la familia o los contratados, con sus respectivas renovabilidades
- Productos de las labranzas, sea para la venta o para el autoabastecimiento
- Productos del Área de Preservación Permanente y Reserva Legal, bienes y servicios generados en las dos áreas
- Subproductos, salidas indeseadas de los sistemas
- Resultados: donde la planilla calcula los flujos de emergía
- Gráficos

En cuanto a los índices emergéticos, estos se calculan a partir de los flujos de energía y son utilizados para evaluar el grado de utilización de los recursos en los sistemas. Entre los índices más utilizados y sus respectivas ecuaciones se encuentran Transformicidad y Renovabilidad.

La Transformicidad, es la cantidad de emergía introducida por unidad de energía útil generada y se determina mediante la ecuación: $Tr = Y/Ep$, expresándose en sej/J.

La transformicidad de la luz solar absorbida por la Tierra es 1.0 por definición.

La Renovabilidad, es la relación entre la energía renovable y el uso total de energía, donde se expresa el porcentaje del total de energía usada que es renovable. Este índice, responde a la ecuación, $\% \text{ Ren} = 100 \times (R/Y)$, donde: [R] Insumos Renovables y [Y] Energía Total. A mayor porcentaje de Renovabilidad mayor sustentabilidad del sistema, lo que demuestra una menor dependencia de insumos externos.

Entre otros índices podemos mencionar, razón de rendimiento energético, razón de inversión energética, razón de carga ambiental y razón de intercambio energético

Ejemplos que demuestran la utilidad del empleo de la metodología del análisis energético

En la actualidad, algunos países utilizan esta herramienta para evaluar la sustentabilidad de sus sistemas con muy buenos resultados.

En Colombia, se investigaron modelos, que permiten una contabilidad ambiental, que integra ecosistemas naturales y urbanos, hallándose en la síntesis energética, la propuesta más novedosa, basada en los conceptos de la termodinámica ⁽³⁹⁾.

La experiencia demostró que es posible valorar sistemas urbanos con el método de la síntesis energética, permitiendo diferenciar entre economía ambiental y economía ecológica, dando valor a los recursos naturales en conjunto con todo el sistema económico y social en una sola contabilidad y así direccionar las áreas de sostenibilidad con el cálculo de índices energéticos para la toma de decisiones en políticas públicas.

En Argentina, la experiencia consistió, en un análisis histórico de un ecosistema agrícola, con el objetivo de evaluar el patrón de desempeño de las diferentes alternativas. El Indicador de sustentabilidad energética (ESI), el cual es una medida agregada de la contribución potencial al sistema económico (EYR) por unidad de presión ejercida en el sistema local (ELR), se calcula mediante la fórmula. $(ESI) = EYR/ELR$ reveló, que las alternativas realizaron contribuciones netas a través de la producción generada por los cultivos, sin producir grandes efectos sobre el ambiente. De este modo, el estudio realizado permitió conocer cómo se modificó el funcionamiento y el desempeño biofísico y económico del ecosistema agrícola, a través de un determinado período de años. A partir de las variaciones registradas de los indicadores energéticos en el tiempo, se pudieron ilustrar tendencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas

En caso de Brasil ⁽⁸⁾, se hace una valoración del grado de utilización de los recursos y sustentabilidad, en dos sistemas de producción. Los índices utilizados fueron: Transformidad, Renovabilidad, Razón de Rendimiento Emergético, Razón de Inversión Emergética, Razón de Carga Ambiental y Razón de Intercambio Emergético.

Estos ejemplos demuestran que el empleo de la metodología de análisis emergético, resultó ser una herramienta eficaz, para evaluar la sustentabilidad en agroecosistemas.

CONCLUSIONES

- Todo lo antes expuesto corrobora la importancia de utilizar herramientas metodológicas, que propician un mayor acercamiento al desarrollo sustentable.
- Es indiscutible el hecho de que muchos países ya utilizan la metodología de síntesis emergética, con el fin de la implementación de propuestas cada vez más cercanas a la realidad de un sistema de recursos naturales orientadas a una gestión integrada.
- A consideración de la autora, sería de gran utilidad la implementación en Cuba, de la metodología análisis emergético, como herramienta para contabilizar la utilización de los recursos y evaluar sustentabilidad en agroecosistemas, específicamente en aquellos que están insertados en el sector cooperativo y campesino, los cuales son más factibles de manejar por representar pequeñas y medianas empresas.

BIBLIOGRAFIA

1. Odum HT. Environment, power, and society. 1st ed. New York, NY: John Wiley & Sons Inc; 1971. 331 p.
2. Odum HT. Energy, ecology, and economics. *Ambio*. 1973;2(6):220–7.
3. Ortega E, Ulgiati S. Emergy life cycle assessment of fuel ethanol in Brazil. In: IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies.” Unicamp, Campinas, SP, Brazil; 2004. p. 389–99.
4. Cavalett O, Queiroz JF de, Ortega E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. *Ecological Modelling*. 2006;193(3):205–24. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.07.023
5. Campbell DE. Global transition to sustainable development. In: IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies.” Unicamp, Campinas, SP, Brazil; 2004. p. 11–28.

6. Albuquerque TC. Análise emergética de um sistema agroflorestal = Sítio Catavento, Indaiatuba, SP [Tesis de Doctorado]. [Campinas, Brasil]: Universidade Estadual de Campinas; 2012. 112 p.
7. Ortega R. El cambio climático y la cultura: una visión emergética. In: VI Jornadas de la Asociación Argentino Uruguaya de Economía Ecológica, Salta. Unicamp, Campinas, SP, Brasil; 2014. p. 60.
8. Del Pozo Rodríguez PP, Vallim de Melo C, Ortega Rodríguez E. El análisis emergético como herramienta para evaluar la sustentabilidad en dos sistemas productivos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2014;23(4):59–63.
9. Silvert W. The theory of power and efficiency in ecology. *Ecological Modelling*. 1982;15(2):159–64. doi:10.1016/0304-3800(82)90059-X
10. Spreng DT. Net energy analysis and the energy requirements of energy systems. Edición: Presumed First Edition. New York: Praeger; 1988. 301 p.
11. Månsson BÅ, McGlade JM. Ecology, thermodynamics and H.T. Odum's conjectures. *Oecologia*. 1993;93(4):582–96. doi:10.1007/BF00328969
12. Ayres RU. Ecology vs. economics: confusing production and consumption. Fontainebleau, France: Center of the Management of Environmental Resources, INSEAD; 1998.
13. Cleveland CJ, Kaufmann RK, Stern DI. Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*. 2000;32(2):301–17. doi:10.1016/S0921-8009(99)00113-5
14. Hau JL, Bakshi BR. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*. 2004;178(1–2):215–25. doi:10.1016/j.ecolmodel.2003.12.016
15. Izursa Azurduy JL. Emergía (con M), una herramienta nueva para estimar el valor de la madera en el bosque. *Ecología en Bolivia*. 2011;46(2):71–6.
16. Jørgensen SE, Nielsen SN, Mejer H. Emergy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecological Modelling*. 1995;77(2–3):99–109. doi:10.1016/0304-3800(93)E0080-M
17. Laganis J, Debeljak M. Sensitivity analysis of the emergy flows at the solar salt production process in Slovenia. *Ecological Modelling*. 2006;194(1–3):287–95. doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.10.025
18. Odum HT. Environmental accounting: emergy and environmental decision making. Edición: 1. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1995. 384 p.
19. Brown MT, Buranakarn V. Emergy evaluation of material cycles and recycle options. In: *Proceedings from the First Biennial Emergy Analysis Research Conference*. Emergy

- Synthesis: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Gainesville, Florida; 2000. p. 141–54.
20. Ulgiati S, Bargigli S, Raugi M. An emergy evaluation of complexity, information and technology, towards maximum power and zero emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2007;15(13–14):1359–72. doi:10.1016/j.jclepro.2006.07.008
21. Odum HT. Emergy in ecosystems. In: Polunin N, editor. *Ecosystem Theory and Application*. 1st ed. Chichester West Sussex ; New York: Wiley; 1986. p. 337–69.
22. Scienceman D. Energy and emergy. In: Pillet GJ, Murota T, editors. *Environmental economics: the analysis of a major interface*. Geneva: Roland Leimgruber; 1987. p. 257–76.
23. Guillén Trujillo HA. Contabilidad ambiental usando emergía: caso 2 sostenibilidad de sistemas agro-silvícolas y agro-industriales en Chiapas, México. In: *Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*, 13. México: FEMISCA; 2002. p. 1–12.
24. Kumar M, Kumar P. Valuation of the ecosystem services: A psycho-cultural perspective. *Ecological Economics*. 2008;64(4):808–19. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.05.008
25. Odum HT. Maximum power and efficiency: A rebuttal. *Ecological Modelling*. 1983;20(1):71–82. doi:10.1016/0304-3800(83)90032-7
26. von Bertalanffy L. *General system theory: foundations, development, applications*. 1st ed. New York: George Braziller; 1968. 289 p.
27. Odum HT, Brown MT, Whitefield LS, Woithe R, Doherty S. Zonal organization of cities and environment: a study of energy system basis for urban society [Internet]. Gainesville, Florida: Center for Environmental Policy, University of Florida; 1995 [cited 09/04/2019] p. 140. Available from: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Zonal+organization+of+cities+and+environment%3A+a+study+of+energy+system+basis+for+urban+society&btnG=
28. Odum HT. Trophic structure and productivity of Silver Springs, Florida. *Ecological Monographs*. 1957;27(1):55–112. doi:10.2307/1948571
29. Odum HT, Pinkerton RC. Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *American Scientist*. 1955;43(2):331–43.
30. Odum HT, Pigeon RF. *A tropical rain forest. division of technical information*. United States: United States Atomic Energy Commission; 1970. 1600 p.

31. Odum HT. Energetics of food production. In: The world food problem: a report of the President's Science Advisory Committee. Washington, D.C. United States: The White House; 1967. p. 55–94.
32. Lotka AJ. Contribution to the Energetics of Evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1922;8(6):147–51.
33. Costa A. Emergia (com “M” mesmo) e o sistema embalgemidéias para modelagem utilizando a análise emergéti parte ii–diagramas de energia. Revista Embanews. 2011;2.
34. Odum HT, Odum EC. A prosperous way down: principles and policies. New. United States of America: University Press of Colorado; 2008. 344 p.
35. Odum HT. Energy hierarchy law for biogeochemical cycles. In: Emergy Synthesis: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Gainesville, Florida; 2000. p. 235–48.
36. Brown MT, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. Ecological Modelling. 2004;178(1–2):201–13. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.03.002
37. Rydberg T, Haden A. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2006;117(2–3):145–58. doi:10.1016/j.agee.2006.03.025
38. Becht G. Systems theory, the key to holism and reductionism. BioScience. 1974;24(10):569–79. doi:10.2307/1296630
39. Villalobos IDL, Salcedo JR. Análisis energético de la sostenibilidad ambiental del municipio de Palmira (Colombia). Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2013;4(2):67–96. doi:10.22490/21456453.977

Bibliographic review

Energia: generalities, notes, and examples of utility, as a tool to evaluate sustainability

Bruna Elena Torres-Verzagas^{1*}

Ángel Leyva-Galán²

Pedro Pablo Del Pozo-Rodríguez³

¹Dirección de Protección Fitosanitaria de Matanzas. Carretera central km 111 Gelpi Matanzas, Cuba

²Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

³Universidad Agraria de La Habana “Fructuoso Rodríguez Pérez”, carretera a Tapaste y Autopista Nacional. San José de las Lajas. Mayabeque, Cuba. CP 32 700

* Author for correspondence. elenabt@atenas.inf.cu

ABSTRACT

Throughout its history, man has used *energía* as a useful tool to evaluate the efficiency of productive systems although for a long time, and because of the lack of knowledge of the advantages of using the energy analysis, he has not been given, greater utilization. The advances of science, have allowed deepening in the studies on the implementation of Methodology Emergent Synthesis. Every year a considerable number of different types of energy are in different production processes generated, but only a certain part is recognized and accounted, since most are lost because of the ignorance of the benefit it represents, the power to use it, on put it at the service of ecosystem. Faced with this problem, we try to demonstrate the importance of the study, and the implementation of methodologies, leading to a closer approach to sustainability. In the present bibliographic review, an approach is made on the subject of Emergence. In addition, it summarizes aspects related to the nomenclature to be used, as well as indicators and indexes more common to evaluate. Finally, some examples are presented, in which the use of this methodology has been, successful, while reflecting on the importance of the subject future research.

Key words: methodology, efficiency, emergetic analysis, ecosystem, sustainability

INTRODUCTION

At the beginning of the last century, man began to develop a completely new energy base, on the use of coal, oil, and other sources of energy, to complement solar energy. Large amounts of energy, whose accumulation was the result of hundreds of millions of hectares of solar energy, suddenly became sources of energy available to man ⁽¹⁾. After more than five decades of work in ecology, and general systems theory, this author has proposed a biophysical method, based on the analysis of energy with memory, called Emergia, correctly carry out the accounting of services, which provide ecosystems free.

The first formal statement of what would later be called emergetic, occurred through the following reflection, "The energy is measured in calories, btu, kWh, and other incontrovertible units, but energy has a scale of quality, which is not captured by these measures. The ability to develop work for man depends on the quality and quantity of energy, and it is measured by the amount of energy of a lower quality needed, to develop energy of a higher degree of quality. The energy scale is, since the diluted solar power for primary production, coal, coal oil, electricity, efforts to processing and human computing" ⁽²⁾. Between 1986 and today, the emergetic methodology has been developed, while the research community was expanding and new applications of the methodology were presented, in combined man-nature systems, which has become, in turn, new challenges. The maturity of the methodology has resulted in more rigorous conceptual definitions and nomenclatures, as well as a refinement in the methods of calculating the transformations.

The emergetic analysis proposed by Howard T. Odum constitutes a valid methodology for the integral and systemic evaluation of ecosystems, which estimates the values of emergencies incorporated in environmental products, processes and services, as well as the impact of activities Anthropic in ecosystems ⁽³⁻⁷⁾. Countries in Latin America and the world, have achieved satisfactory results when using the emergetic analysis, as a way to solve problems in which the natural and socioeconomic elements intermingle, for the integral and systemic evaluation of the ecosystems being Brazil, one of the more faithful exponents of these studies.

At present, the use of this methodology is of transcendent importance; however, research in Cuba is still incipient, since there is only the accumulated experience of some authors ⁽⁸⁾, for the undertaking of works of similar magnitude.

General and conceptualization

The terms have been handled indistinctly: Emerging, Methodology and Emergetics, Emerging Synthesis, Emerging Analysis or Emerging Synthesis Methodology. The concept itself has generated a multitude of controversies, within many communities there are academics including Ecology, Thermodynamics and Economics ⁽⁹⁻¹⁴⁾. To avoid confusion with other forms of analysis and to rigorously define the concepts, a whole energetic nomenclature has been developed which defines the terms, symbology, abbreviations, units, indicators and indices, used in the emergetic evaluations.

Emergia is a tool, which can be used to compare the work of nature with that of humans, on a fair and equitable basis ⁽¹⁵⁾. This author asserts, which is the sum of all the energy in one way, necessary to develop an energy flow in another way, in a given period of time ⁽¹⁵⁾; in other words, it is the useful energy in a certain way, used directly or indirectly to generate a certain product or service. Its unit is the energy emjoule, and when used it can be put on a common basis, sunlight, fuels, electricity, and human services, expressing them in solar energy emjoules, which each of them requires to be produced. There are other definitions but in general, the emergence takes into account different forms of energy and resources (eg sunlight, water, fossil fuels, and minerals, among others). Each of these forms of energy is produced through processes of transformation in nature and has a certain capacity to perform work, both in ecological and human systems. The recognition of these differences in "quality" is a key concept in the Emergia methodology.

Expressing the value of products emerging units is possible compares different types using transformity ^(16,17). Emergia expresses the cost of a process or product in equivalent of solar energy, considering it is our source of energy end.

The emergia synthesis methodology evaluates resources and services in ecological and economic systems, on a common energy basis and quantifies direct and indirect environmental work, to generate a resource or a service. Some authors ^(18,19), named so this methodology, being an approach that tries the understanding of the whole of a system and its relationship to surrounding systems, instead of dissection and fragmentation is carried out in

an analysis. Other authors have been able to verify that the emergent synthesis gives an understandable image of the environmental contributions to a product or service ⁽²⁰⁾, because in the same unit, it is able to integrate the flow of matter, energy, and capital ⁽¹⁸⁾.

Solar emergia, is the solar energy consumed directly or indirectly, to make a product or perform a service and its unit is the solar emjoule. To evaluate all the flows and storage on a common reference, solar emergia ^(21,22) is used, which has been defined previously. The flow of energy that supports each source of importance is expressed in solar emergency units.

The evaluation in emergetic terms of the use of inputs and economic resources is relatively easy, although in the case of natural resources; a greater effort is required to obtain the values of the flows of matter and energy and their respective conversion factors, to Emerging flows.

In emergetic analysis, the environmental, social and economic variables so n including s and the index s, so n calculated s com or tool s of comparison n couple to different s systems ⁽²³⁾.

Despite its advantages, the emergetic analysis has received some criticism, particularly from economists, for ignoring the human valuation of goods and services ⁽²⁴⁾; however, quantification of emerging, aims to provide an egocentric value or the products and ecological process ⁽¹⁵⁾.

The theoretical and conceptual bases of the emergent methodology are found in thermodynamics, systems ecology ⁽²⁵⁾ and general systems theory ⁽²⁶⁾. There are two key publications, which serve to understand the history of this theory during its first 30 years, the book by HT Odum “Environmental Accounting” ⁽¹⁸⁾ and the volume edited by C.A,S Hall entitled “ Máximum Power” ⁽²⁷⁾.

At the beginning of the 50s, Odum observed the quality of the energy, based on the results of its research and simulation models, of ecosystems and nature at ⁽²⁸⁻³⁰⁾, among others, in which it manages different forms of energy at different scales. His research on flows of energy in ecosystems and differences in working potential of sunlight, the freshwater currents, winds, ocean currents, and even fossil fuels have highlighted, that when two or more energy sources direct a system, these cannot be added without first converting them to a common measure, which takes into account not only their quantity but also their quality. This reasoning led to the concept of “energy of a certain type” with the name “cost and energy” ⁽³¹⁾.

Summary of emergia: point of departure as a new field study

The point of departure for the synthesis of emerged as a new field of study, lies in that compare different types of energy, using factors of conversion that show the amount of equivalent energy types. In based of the Principle of "Maximum flow of energy" ⁽³²⁾, it is proposed a new law of thermodynamics, in base of the principle of maximum empower, that is the speed of emergia flow in the manner analogous to power, which is in turn the speed of energy variation ^(1,22).

Emergetic language

It is very important knowledge and mastery of the language and nomenclature, referred to the subject under study. In this effort, it must adhere to the symbols used by Odum, for which reference is made to article entitled, "Emergy (with mesmo"m") e o sistema embalagem idéias para modelagem" ⁽³³⁾, in which main symbols diagram energy are visualized (Figure 1) ^(18,34,35), although they have been used since 1965.

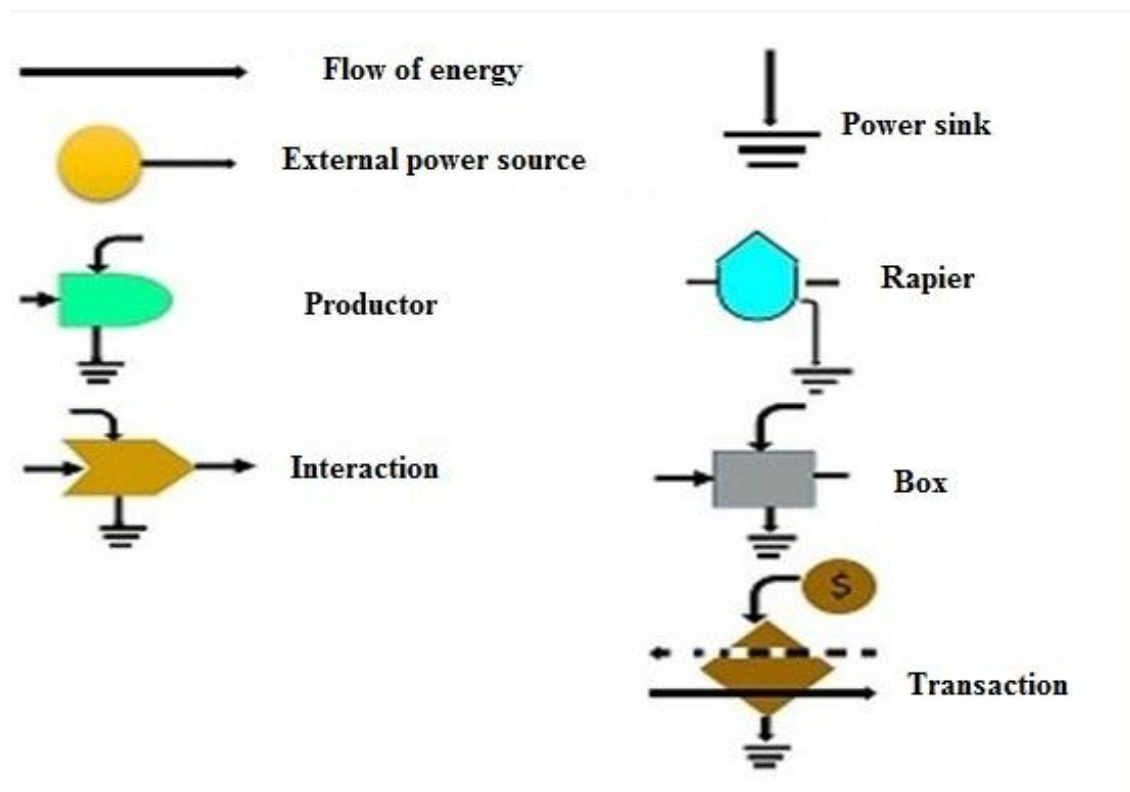


Figure 1. Main symbols of energy diagram ^(18,34,35)

Once the knowledge about this language has been acquired, this tool can be used in different research areas.

To transform the flows of matter, energy, and the capital, in emergia expressed in one common currency (as the solar emjoules), will need information further. This additional factor is the transformity, which is defined as the emerging of one kind required to make one unit energy of another type ⁽³⁶⁾.

Utility of emergetic methodology as a tool to evaluate sustainability

Emergent synthesis has proved to be a valuable tool, to evaluate the performance of agricultural ecosystems, in terms of resource consumption during the productive process and the resulting efficiency ⁽¹⁴⁾.

From the recorded variations of the emergent indicators over time, trends on the functioning of ecosystems can be illustrated. Studies based on emergent synthesis have been carried out, which explore from a historical perspective the consumption of ecological and economic goods of agricultural ecosystems ⁽³⁷⁾.

For the use and analysis of this methodology, the following steps are followed: (a) preparation of the systemic diagram; (b) preparation of the emergent evaluation table; (c) calculation of the emergent indexes; (d) interpretation of the results ⁽¹⁸⁾.

The diagram and energy flows can be useful for a better understanding of the laws of thermodynamics. Its purpose is to develop a critical inventory of the processes, reserves and flows that are important “drivers” of the system and are therefore necessary for evaluation. Any portion of the universe can be considered as a system, or an entity formed by interdependent units or components that interact with each other and function as an integrated entity, using the symbols of the general theory of systems ⁽³⁸⁾.

The diagram should always be referred to a higher system ("less detail-greater detail" approximation), since it allows a clearer picture of the organization of the system and once prepared, the energy calculation of each flow can be performed, to find its emergent equivalent.

The data of the flows that enter to the limits of the system are in energetic units (joules) or specific (grams) generally annual (j/year or g/year). These units are multiplied by their respective transformation, to obtain their emergence and subsequently added, to obtain the total emergence and calculate the respective emergent indexes ⁽³⁹⁾.

The goal of building the systemic diagram, is visually represent the studied system, with all inputs (be they of the resources of nature or economics), internal flows, losses and outputs (in the form of energy, products, money, etc.) This represents as real as possible the system studied, expressed all its complexity, and it is the basis for the emergetic analysis of the systems studied, for which is used the symbols proposed by Odum ⁽¹⁸⁾.

For the elaboration of this diagram or quantitative model of the systems, the resources of nature (I), renewable (R) and non-renewable resources (N), the resources of the economy (F), materials are taken into account (M) and services (S), in Figure 2 is shown the model diagram used.

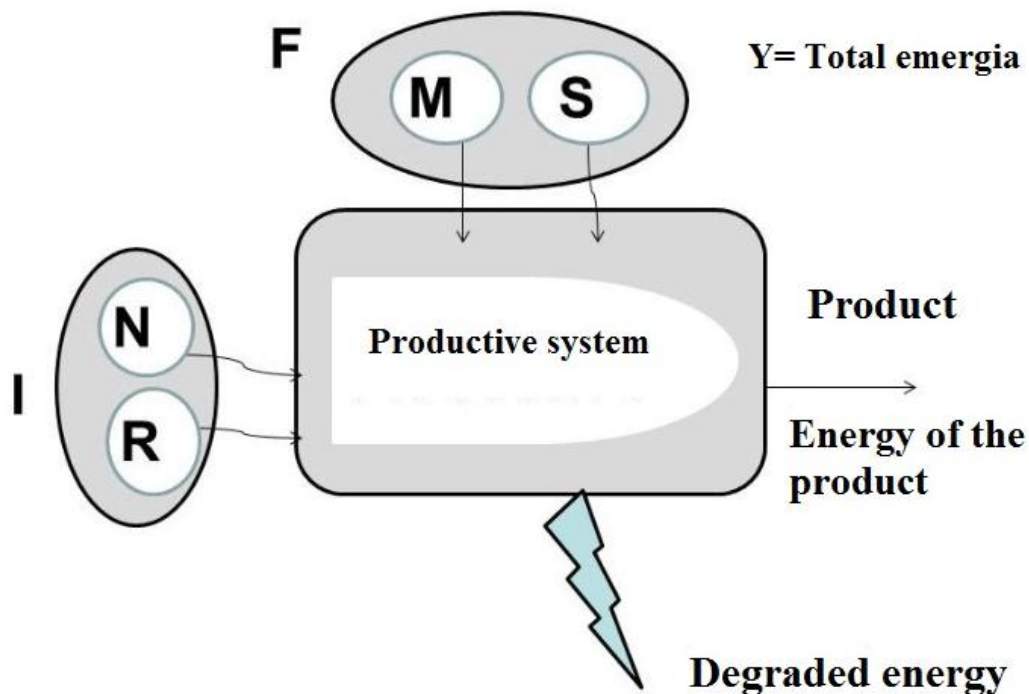


Figure 2. Model of a Systemic Diagram

It is possible to present the systemic diagram of the emergy flow of different system from them is analyzed the qualitative form, the totality of emergy sources that enter, the ones that go out the internal flow that converge in them, by relying these of nature resources. It is important to achieve a good use of biological nitrogen fixation, carbon sequestration, and take into account the mobilization of minerals in the system, being able to have a wide

diversity and amount of biota in the soil, as well as possess the amount of plant species capable of storing nature's carbon (CO) resource, through photosynthesis.

That is why the inclusion of trees and shrubs in agricultural ecosystems is a valid and necessary option, which has taken interest and importance for the production and protection of agroecosystems in the tropics and especially in Latin American countries, whose results are they sustain in the increase of the productivity and quality of life of the producers ⁽⁸⁾.

The second step refers to the preparation of an energy evaluation table (Table 1) and for this; the flows of resources, labor and energy are taken into account, based on the diagram previously prepared. The data on the inflows that cross the boundaries become emergent units and then add up, to obtain the total emergence that directs the system. These flows per unit of time (usually per year), are presented in a table as separate elements, making the calculations of the components (solar energy, tides, electricity, rain, etc.) with the respective amount of energia.

Table 1. Model of an emergetic table

| Note | Contributions | Numerical value | Transformation Unit | Energy flows |
|------|---------------|-----------------|---------------------|--------------|
|------|---------------|-----------------|---------------------|--------------|

The Emtable software is also used for estimating the indices, which has different modules (spreadsheets), in which they enter the basic information for the calculations, and these would be the ones set out below:

- General information of the productive unit studied
- Renewable and non-renewable resources of nature
- Materials of the economy, with their respective renewables
- Financing
- Infrastructure
- Economy services, whether family or contracted with their respective renewals.
- Products of the crops, either for sale or for self-supply
- Products of the Permanent Preservation and Legal Reserve Area³, goods and services generated in the two areas
- By-products, unwanted outputs of the systems
- Results: where the return calculates the emergency flows
- Graphics

As for the emergetic indexes, these are calculated from the energy flows and are used to evaluate the degree of use of the resources in the systems. Among the most used indexes and their respective equations are: Transformicity and Renewability.

The Transformity, is the amount of emerging introduced per unit of useful energy generated and determined by the equation: $Tr = Y/Ep$, expressed in sej/J.

The transformation of sunlight absorbed by the Earth is 1.0 by definition.

Renewability is the relationship between renewable energy and total emergency use, where the percentage of total emergency used that is renewable is expressed. This index responds to the equation, $\% Ren = 100 \times (R/Y)$, where: [R] Renewable intakes and [Y] Total Emergía. The greater % of Renewability, greater sustainability of the system, which shows a lower dependence on external inputs.

In other indices it can mention, reason of emergetic yield, reason of emergetic inversion, reason of environmental charge and reason emergetic exchange.

Examples that demonstrate the utility of employment method of emergetic analysis

Currently, some countries use this tool to assess the sustainability of their systems with very good results.

In Colombia, models were investigated, which allow an environmental accounting, which integrates natural and urban ecosystems, being in the emergent synthesis, the most novel proposal, based on the concepts of thermodynamics ⁽³⁹⁾.

Experience showed that it is possible to assess urban systems, with the method of emergent synthesis, allowing to differentiate between environmental economy and ecological economy, giving value to natural resources together with the entire economic and social system, in a single accounting and thus direct the areas of sustainability, with the calculation of emergetic indexes for decision making in public policies.

In Argentina, the experience consisted of a historical analysis of an agricultural ecosystem, with the objective of evaluating the performance pattern of the different alternatives. The Emergetic Sustainability Indicator (ESI), which is an aggregate measure of the potential contribution to the economic system (EYR) per unit of pressure exerted on the local system (ELR), is calculated using the formula. $(ESI) := EYR / ELR$ revealed that the alternatives

made net contributions through the production generated by the crops, without producing great effects on the environment. In this way, the study carried out allowed us to know how the biophysical and economic performance and performance of the agricultural ecosystem was modified, over a certain period of years. From the recorded variations of the emerging indicators over time, trends on ecosystem functioning could be illustrated.

In the case of Brazil ⁽⁸⁾, an assessment is made of the degree of resource utilization and sustainability, in two production systems. The indices used were: Transformity, Renewability, and Reason for Emerging Performance, Reason for Emerging Investment, Reason for Environmental Burden and Reason for Emerging Exchange.

These examples demonstrate that the use of the methodology of emergent analysis turned out to be an effective tool to evaluate sustainability in agroecosystems.

CONCLUSIONS

- All foregoing exposed, corroborates the importance of using methodological tools that favor closer to sustainable development.
- Is undeniable that many countries are already using the of emergent synthesis methodology, with the end of the proposal implementation to close to the reality of a system of natural resources to an integrated management.
- For the author's consideration, the implementation in Cuba of the emergent analysis methodology would be very useful, as a tool to account for the use of resources and evaluate sustainability in agroecosystems, specifically those that are in the cooperative and peasant sector inserted, which are more feasible to handle by representing small and medium enterprises.