

**UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “José Martí”  
CENTRO DE ESTUDIOS ENERGÉTICOS Y PROCESOS INDUSTRIALES**

*Tesis en opción al grado Científico de Máster en Eficiencia Energética*

*Sostenibilidad Energética de la valorización energética del residuo  
agrícola durante la producción arrocerá en la Empresa  
Agroindustrial de Granos “Sur Del Jibaro”*

*Aspirante: Jorge Pérez Gómez  
Tutor: Edeloy Bravo Amarante*

*Sancti Spíritus  
2016*

“El desarrollo sostenible, si no ha de ser despojado de contenido analítico, significa algo más que la concertación del compromiso entre el ambiente natural y la búsqueda del crecimiento económico. Esto significa una definición del desarrollo que reconozca que los límites de la sostenibilidad tienen origen tanto estructurales (económicos) como naturales”.

Redclift.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi tutor Edelvy Bravo Amarante, por haberme sugerido el tema.

A Janet Jiménez, por su asesoría y ayuda incondicional.

A mi familia, por el apoyo que me han brindado.

A todos los compañeros de estudio, por el tiempo que hemos compartido.

A todos los profesores del claustro, por los conocimientos comunicados y transmitidos.

A mis amigos Antonio, Brito y Carlitos ...

A todos aquellos que en algún momento me han ayudado a cumplir con este desafío.

Y, en especial, a mi hijo, para enseñarle sacrificio.

## Síntesis

A partir de la necesidad de evaluar la sostenibilidad de la gestión de la paja de arroz durante la producción arrocerá en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro, en este trabajo se propuso como objetivo: Determinar la sostenibilidad de la disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia en la Empresa Agroindustrial de granos "Sur del Jibaro" mediante un análisis emergético con enfoque de ACV. Para ellos se realizó una caracterización inicial de la producción arrocerá y la disposición actual de la paja de arroz. Se aplicó la metodología de Síntesis emergética, dentro de la cual se determinaron los flujos y diagramas emergéticos y se calcularon los índices de sostenibilidad. Como resultado se obtuvo que en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jíbaro, la paja de arroz que se genera no tenga una disposición adecuada. Actualmente se deja en el campo como abono orgánico, pero realmente es incinerada o tapada con el laboreo, lo que provoca mayores daños ambientales. Estudios recientes demostraron que el tratamiento anaerobio de esta puede ser una alternativa ambiental y económicamente viable dado a la producción de biogás y biofertilizante. La determinación de los flujos y diagramas emergéticos permitió definir las entradas renovables, no renovables e importadas del sistema producción arrocerá con y sin valorización de la paja de arroz. Con esta última crecen las entradas renovables y los recursos importados. Además permitió calcular la transformicidad y emergía específica del arroz consumo y por tanto demostrar que la emergía total anual en la alternativa de valorización de la paja de arroz es mayor 1.92 veces que la emergía total de alternativa actual. El cálculo de los índices emergéticos permitió determinar que ambas alternativas (disposición actual y valorización de la paja de arroz) son sustentables energética y ambientalmente. Sin embargo el valor de sostenibilidad obtenido (10.1) en la alternativa actual muestra que este ecosistema productivo tiene la posibilidad de ser explotado desde el aspecto económico, pues el ambiente tiene la capacidad de asimilar más impactos sin degradar su calidad. Por su parte la alternativa de valorización de la paja, con valor de 23,3 muestra ser un ecosistema productivo que tiene la posibilidad de ser mucho más explotado y es más sostenible económicamente.

## **Synthesis**

Due to the need to assess the sustainability of the management of rice straw in rice production in the Agroindustrial grain "Sur del Jibaro", this study was proposed as objective: To determine the sustainability of the current process and / or appraisal of rice straw residue in Agroindustrial grain "Sur del Jibaro" using an emergy analysis. For them an initial characterization of rice production and the current disposition of rice straw was performed. Synthesis emergy methodology was applied, within which flows and emergy diagrams were determined and the sustainability indexes were calculated. As a result it was found that in Agroindustrial grain "Sur del Jibaro", rice straw that is generated does not have a suitable arrangement. Currently it is left in the field as organic fertilizer, but it really is incinerated or restricted with tillage, causing further environmental damage. Recent studies showed that the anaerobic treatment of this may be an environmental and economically viable alternative given to the production of biogas and bio-fertilizer. The determination of flows and emergy diagrams allowed to define renewable, nonrenewable and imported inputs in rice production ecosystem with or without appraisal of rice straw residue. Also allowed to calculate the transformity and specific emergy of rice consumption and therefore show that the total annual emergy in the appraisal of rice straw residue alternative is higher 1,92 times than the total emergy in current alternative. The calculation of emergy indexes allowed to determine that both alternatives (current and appraisal of rice straw residue) are energy and environmentally sustainable. The value of sustainability obtained (10,1) in the current alternative shows that this system has the potential to be exploited from the economic aspect, because the environment has the ability to absorb more impact without degrading its quality. The appraisal of rice straw residue alternative, with value (23,3), proves to be a productive ecosystem that has the ability of being much more economically exploited and it is more economically sustainable than current alternative.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1. Marco teórico referencial</b>	5
1.1 La problemática de la producción arrocerca en el mundo y en Cuba	5
1.1.1 Estrategias para el tratamiento de los residuos de la producción arrocerca	6
1.1.2 Digestión anaerobia de la paja de arroz para la producción de biogás	7
1.1.3 Efecto ambiental de la digestión anaerobia y producción de biogás	10
1.1.4 Potencialidades energéticas y efecto ambiental de la paja de arroz. Propuesta de su digestión anaerobia en el CAI arrocerca “Sur del Jíbaro”	11
1.2 Emergía y sostenibilidad	13
1.3 Método de la contabilidad energética	17
1.3.1 Calidad de energía	17
1.3.2 Transformicidad, energía específica y jerarquía de energías	19
1.3.3 La metodología: la Síntesis Emergética	20
1.3.4 Índices emergéticos	25
1.4 Características del método emergético	28
1.5 Ventajas y Desventajas del Método de La Contabilidad Emergética	29
<b>CAPÍTULO 2. Materiales y métodos.</b>	32
2.1 Caracterización de la producción arrocerca en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jíbaro”	32
2.2. Análisis emergético	34
2.2.1 Definición de fronteras	34
2.2.2. Determinación de flujos de masa y energía. Diagrama emergético	35
2.2.3. Obtención de datos y balances del ecosistema productivo. Tabla resumen	42
2.2.4. Índices emergéticos. Comparación de las alternativas	45
2.2.5. Comparación de la Alternativa I con la producción de arroz de estudios similares	46
<b>CAPÍTULO 3. Resultados y discusión</b>	47
3.1 Producción arrocerca en la empresa de granos “Sur del Jíbaro”. Caracterización de la empresa	47
3.1.1 Descripción general de la empresa.	47
3.2. Análisis emergético	48
3.2.1. Definición de fronteras. Límites del ecosistema productivo	48
3.2.2. Determinación de flujos y diagramas emergéticos	49
3.2.3. Obtención de datos y balances del ecosistema productivo	53

3.2.4. Índices energéticos. Comparación de las alternativas	71
3.2.5 Comparación de la Alternativa actual con la producción de arroz en Guadalquivir, España, 2006	73
<b>CONCLUSIONES</b>	77
<b>RECOMENDACIONES</b>	78
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	79
<b>ANEXOS</b>	

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de manejar los desechos agroindustriales ha cobrado importancia durante los últimos años debido al crecimiento de la producción agrícola en América Latina, la apertura de mercados y mejoras en las técnicas de producción existentes (Intriago, 2000), el desarrollo de la agroecología, la reutilización de los residuos orgánicos como fuentes energéticas y las políticas ambientales y económicas (Saxena *et al.*, 2009). Con respecto a la producción arroceras a nivel mundial, las actuales políticas ambientales y económicas han impuesto nuevas exigencias para los productores y exportadores. Esto se debe principalmente al alto uso de plaguicidas, fertilizantes químicos y la generación de desechos agrícolas.

La paja de arroz es uno de los subproductos más problemáticos de eliminar durante la cosecha del arroz. A nivel mundial se producen más de 730 millones de toneladas de paja de arroz por año (Zhao *et al.*, 2010). Ante la dificultad, elevado costo de su retirada y bajo aprovechamiento, la práctica más frecuente es quemarla en el campo en períodos de 15 a 20 días, lo que genera una gran concentración de emisiones al aire de partículas y gases resultantes de la combustión (Abril *et al.*, 2009). La quema de la paja de arroz, ha sido una práctica generalizada por los agricultores en los arrozales de todo el mundo, quienes consideran que, favorece la destrucción de las esporas de los hongos, como las de *Pyricularia oryzae*, bacterias, y semillas de malas hierbas, aunque por otro lado facilita la reincorporación del Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Sílice al suelo (Navarro, 2008).

Otros prefieren evitar la quema y aprovechar el cultivo del arroz como un elemento natural de mitigación del cambio climático, a través de la fijación de carbono en su biomasa, en este caso, la paja y la cascarilla del arroz. Entonces, si la paja no se quema, existen principalmente dos opciones de eliminación: mediante triturado e incorporación con el suelo, y retirándola del lote para su aprovechamiento. De esta manera, la valorización energética de la paja de arroz mediante la tecnología de digestión anaerobia ha resultado muy atractiva en las últimas décadas (Wang *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2012), no solo porque permite su gestión ecológica, sino porque se aprovecha el biogás y digestato que resulta del proceso, lo que convierte a la paja de arroz en una fuente de energía renovable y de biofertilizante para la propia producción del grano.

Los beneficios ambientales de la tecnología de digestión anaerobia se deben principalmente a la recuperación del biogás (fuente de energía renovable) y a la mitigación de las emisiones que ocurren en el sistema de referencia. Pues al quemarse la paja de arroz, los gases producidos (dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOxNox), y óxidos de azufre (SOx)), son gases contaminantes y de efecto invernadero. Pero por otro lado, la alternativa de enterrar la paja, genera entre 2,5 y 4,5 veces más metano que la de quemarla, por lo que esta alternativa tampoco es recomendable (Abril *et al.*, 2009).

A pesar de ello, es necesario hacer un estudio profundo de los impactos a largo plazo, sobre la reserva natural en particular y el medio ambiente en general. También es necesaria una valoración económica de todos los elementos que intervienen en cada caso, para determinar cuáles son los costos reales de una eventual retirada masiva de paja de los campos. Su eventual aprovechamiento en la obtención de subproductos debe compensar estos costos (Navarro, 2008). Ante la posibilidad de una retirada masiva y continuada de paja de los arrozales es necesario un análisis de los posibles impactos sobre el contenido de nutrientes del suelo, y su incidencia en los cultivos y las plagas. Además, los productores de arroz, no facilitan la retirada de la paja, debido a que, el trasiego de maquinaria pesada sobre el suelo fangoso desnivela el terreno, ocasiona daños en canales y márgenes y genera retrasos en los laboreos (Doberman & Fairhurst, 2002).

En tal sentido, aunque varios estudios fundamentan la sostenibilidad de la tecnología de digestión anaerobia para la mitigación de gases de efecto invernadero (Meyer-Ulrich *et al.*, 2012), en base a la aplicación del análisis del ciclo de vida; especial atención se ha dedicado al análisis de la variabilidad del potencial de mitigación debido a las incertidumbres asociadas a los procesos tecnológicos y medioambientales, los cuales son difíciles de controlar. Por esta razón se han aplicado varias metodologías que permiten evaluar y contabilizar los impactos ambientales de un determinado proceso, permitiendo la comparación de dos o más alternativas, con el fin de establecer criterios cuantitativos para seleccionar aquella alternativa con el menor impacto posible. Entre las metodologías más utilizadas, para dicho fin, se encuentra el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), el Análisis Exergético y el Análisis del Método Emergético.

Así, tomando como base el concepto de sostenibilidad como “la compatibilidad entre el aspecto energético, económico (máximo rendimiento) y ambiental” (Redclif, 1987), estos métodos que se han venido empleando durante años para la disposición de la paja de arroz, deben estar enfocados en ser una alternativa de aprovechamiento que brinden un rendimiento energético y económico con una carga ambiental aceptable; es decir, se les debe dar una disposición que armonice lo económico con lo energético y ambiental; debido a que estos tres factores no se pueden evaluar de manera independiente, sino que se tienen que analizar de manera conjunta e interrelacionada.

Se crea entonces la necesidad de establecer entre las metodologías disponibles, una que permita evaluar la sostenibilidad de la gestión de la paja de arroz que coincida de manera soportable y equitativa a nivel económico, energético y ambiental con la producción arroceras en la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jibaro. Entendiendo como gestión al conjunto de operaciones encaminadas con el fin de proporcionar a los residuos producidos el destino global más adecuado desde el punto de vista medioambiental, de acuerdo con sus características, volumen, procedencia, costo de tratamiento, posibilidades de recuperación, comercialización y normas jurídicas (Vélez, 2007).

Hace varios años se ha venido estudiando la posibilidad de cuantificar la sostenibilidad de un sistema mediante el Método de la Contabilidad Emergética que permite no solo cuantificar parámetros, sino también analizar las consecuencias e interrelaciones de los aspectos económicos y ambientales de dichos procesos a largo plazo. Es decir, dicha metodología contabiliza el uso de todos los recursos requeridos para la generación de un producto o servicio (producción de energía), al mismo tiempo que evalúa la degradación ambiental causada por los residuos (sumideros), y la gestión que se les puede dar a estos, para que sean económicamente y socialmente viables (Brown *et al.*, 2012).

Teniendo en cuenta estos antecedentes acerca de la necesidad de la gestión adecuada del residuo de paja de arroz en el contexto cubano, se plantea el siguiente **Problema científico**: ¿Cómo determinar la sostenibilidad de la disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro”?

## **Hipótesis**

Si se realiza un análisis emergético con enfoque de ACV de la producción arrocerá en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro”, será posible determinar la sostenibilidad de la disposición y/o valorización del residuo paja de arroz.

## **Objetivo general:**

Determinar la sostenibilidad de la disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro” mediante un análisis emergético con enfoque de ACV.

## **Objetivos específicos:**

1. Examinar las alternativas de disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro”.
2. Construir el diagrama emergético del proceso de producción arrocerá que incluya las alternativas de disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia.
3. Determinar la sostenibilidad de las alternativas de disposición y/o valorización de la paja de arroz con fines energéticos a través de la digestión anaerobia mediante el cálculo de los índices emergéticos.

## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL**

### **1.1 La problemática de la producción arroceras en el mundo y en Cuba**

La producción arroceras se lleva a cabo en más de 100 países, pues el arroz constituye el alimento básico para más de la mitad de la población mundial (Chandra *et al.*, 2012). Se considera el tercer cultivo agrícola de importancia mundial en términos de área total cultivada y de producción, y se estima que para el año 2025, la producción de arroz será de 760 millones de toneladas (Gadde *et al.*, 2009), con lo cual se generarían, aproximadamente, 1 140 millones de toneladas de residuos de cosecha. Por ello, una de las problemáticas de las producciones arroceras a gran escala, es la generación de residuos muchas veces no aprovechada adecuadamente o que resultan contaminantes.

Cuba no queda exenta de este fenómeno, pues la producción arroceras gana cada vez más importancia, ya que es un alimento básico para la población con una producción anual de cerca de 1 086 000 t. En Sancti Spíritus existe una elevada producción de arroz concentrada en la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” del municipio La Sierpe. Esta cuenta con un total de 83 875 ha de tierra, de las que 27 217 ha, son dedicadas al cultivo del arroz y 23 000 ha, aproximadamente, a la ganadería. En el año 2011 la producción fue de 112 592 t de arroz cáscara húmedo y se estima un crecimiento prospectivo de 5 000 t anuales hasta el 2016 (Contreras, 2013). En este contexto se espera entonces un crecimiento en la generación de residuos por parte de la industria arroceras que deberá asumir el tratamiento adecuado para los mismos.

Los tipos de residuos generados en la producción arroceras son por ejemplo: los restos de la cosecha (paja de arroz), la cascarilla o cáscara de arroz y las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano. La paja de arroz es uno de los subproductos más problemáticos de eliminar durante la cosecha del arroz y aunque existen métodos para su reúso como alimento animal, combustible para la cocina, fibras para pulpas de papel (He *et al.*, 2008), permanecen significativas cantidades inutilizadas. Esto se debe muchas veces al elevado costo de su retirada, por lo que una práctica frecuente es quemarla en el campo en períodos de 15 a 20 días, lo que genera una gran concentración de emisiones al aire, provocando la contaminación del lugar y zonas aledañas, con partículas y gases resultantes de la combustión (Abril *et al.*, 2009, Lei *et al.*, 2010).

La quema de la paja de arroz, ha sido una práctica generalizada por los agricultores en los arrozales de todo el mundo, quienes consideran que favorece la destrucción de las esporas de los hongos, como las de *Pyricularia oryzae*, bacterias, y semillas de malas hierbas, aunque por otro lado facilita la reincorporación del Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Sílice al suelo (Navarro, 2008).

Existe la idea de evitar la quema y aprovechar el cultivo del arroz como un elemento natural de mitigación del cambio climático, a través de la fijación de carbono en su biomasa, en este caso, la paja y la cascarilla del arroz. Si la paja no se puede quemar, existen principalmente dos opciones de eliminación: mediante triturado e incorporación con el suelo, y retirándola del lote para su aprovechamiento

Por otro lado, cuando la paja de arroz se queda en el campo para su incorporación posterior al suelo, con el tiempo puede reducir el rendimiento de la cosecha por el deterioro de las condiciones de este e influir en el incremento de las enfermedades foliares (Zhang R. y Zhang Z., 1999), además de las emisiones de metano a la atmósfera debido a la degradación natural (Watanable *et al.*, 1995; Abril, *et al.*, 2009).

En la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro”, objeto de estudio de este trabajo, estos residuos actualmente no cuentan con una disposición final ambientalmente adecuada (García, 2010; Contreras, 2006). Además, durante muchos años en estos suelos arroceros se han aplicado las recetas del Instructivo Técnico del cultivo del arroz sin tener en cuenta las particularidades de la zona. Los suelos pese a tener un estado avanzado de degradación se someten al pastoreo del ganado vacuno con altas cargas por superficie. La tecnología de preparación de suelos se realiza con grada provocando más degradación y no se da el tiempo de proceso necesario entre labores. Impera el monocultivo del arroz, generalmente con la variedad (J-104) que es altamente susceptible a la salinidad, la rotación de cultivos prácticamente no existe y no se cuenta con un plan estructurado para el mejoramiento de los suelos, por lo cual se requiere la aplicación intensiva de fertilizantes orgánicos y químicos para cada cosecha.

### **1.1.1 Estrategias para el tratamiento de los residuos de la producción arroceras**

Dentro de las estrategias para el tratamiento de residuos agroindustriales, se destacan el compostaje, la fermentación en estado sólido y la digestión anaerobia. A pesar de la gran difusión que a nivel mundial ha tenido el empleo del compostaje como alternativa de

tratamiento de los residuos sólidos (dado fundamentalmente por su fácil operación y menor costo de inversión), las tecnologías de digestión anaerobia están tomando un lugar importante, enmarcándose este incremento en los últimos ocho años. Esta tendencia es atribuida a la posibilidad de recuperar metano, al hecho de que el material digerido es similar al compost producido aerobiamente y al incremento en el cuidado y la protección del medio ambiente, puesta en práctica con la valorización de los residuos (Valentina, 2010).

La digestión anaerobia es el proceso de fermentación de sustancias orgánicas en ausencia de aire. Se consideran 4 etapas fundamentales en este proceso de biodigestión, siendo responsables de cada una de ellas un grupo de bacterias y archaeas diferentes: etapa hidrolítica, etapa acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica.

La etapa de hidrólisis es la etapa limitante para residuos sólidos complejos como la cachaza, bagazo, paja de arroz y en general los residuos agrícolas. López-Dávila, (2013) realizó estudios a nivel de laboratorio con paja de arroz, proponiendo una tecnología basada en una fase previa de pretratamiento biológico, lo que garantiza la reducción de los tiempos de retención y el aumento de la calidad del biogás obtenido en la etapa subsiguiente de tratamiento anaerobio.

Los principales subproductos del proceso de digestión lo constituyen el lodo digerido (con propiedades biofertilizante), también llamado digestato y la mezcla de gases resultante de la descomposición anaerobia de la materia orgánica (*biogás*).

El digestato ha sido empleado como abono orgánico en la agricultura en diversos cultivos con resultados alentadores. Con la necesidad de una agricultura sostenible y ecológica, sin deterioro del medio ambiente, el empleo de este digestato ha cobrado una mayor importancia, no solo como bioabono sino también, como sustrato para la germinación y crecimiento de posturas en las conocidas casas destinadas para estos fines.

### **1.1.2 Digestión anaerobia de la paja de arroz para la producción de biogás**

La paja de arroz contiene de 32 a 47 % de celulosa, de 19 a 27 % de hemicelulosa y de 5 a 24 % de lignina entre otros macro y micronutrientes (Karimi, Kheradmandinia *et al.* 2006; Contreras 2013). Esto hace que sea una biomasa prometedora como sustrato de la digestión anaerobia, dado por su alto contenido de carbono y nutrientes (Wang, Gavala *et al.* 2009; Contreras, Pereda-Reyes *et al.* 2012). Su biodegradación anaerobia ha sido

experimentada por varios autores, utilizándola como monosustrato o como cosustrato de estiércoles, sobre todo de vacuno (Yu, Park *et al.* 2004; Mussatto, Fernandes *et al.* 2008; Yanfeng, Pang *et al.* 2008; Contreras, Pereda-Reyes *et al.* 2012).

Estos autores obtuvieron un efecto positivo en la producción de CH<sub>4</sub> con valores de rendimiento de 200-250 L·kg<sup>-1</sup>. No obstante, destacan la necesidad del tratamiento previo de la paja para mejorar la disponibilidad de la celulosa y la hemicelulosa, pues la lignina ha demostrado ser resistente a la digestión anaerobia (Mussatto *et al.*, 2008; Yanfeng *et al.*, 2008).

Los primeros estudios sobre la degradación anaerobia de la paja y la cáscara de arroz, trataron estos materiales en mezclas con excretas (Hill y Robert, 1981; Kalra *et al.*, 1986; Somayaji y Khanna, 1994) o con lodos de plantas depuradoras de aguas residuales (Komatsu *et al.*, 2010), con el fin de variar la relación C/N y aumentar el rendimiento de biogás. Estudios posteriores abordaron diferentes pretratamientos de estas biomásas o la adición de suplementos químicos para mejorar su biodegradabilidad (Zhang y Zhang, 1999; He *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010 y Lei *et al.*, 2010).

Un estudio sobre la viabilidad de la codigestión de paja de arroz (pretratada) con lodos de alcantarillado y lodos primarios de una planta de tratamiento de aguas residuales, fue realizado por Komatsu *et al.* (2010) en condiciones mesofílicas (36°C) y termofílicas (55°C). Se emplearon reactores de laboratorio de 2,4 L y 1,8 L de volumen efectivo, operados en semicontinuo. La relación de mezcla lodo: paja de arroz fue de 1:0,5 sobre la base de los sólidos totales con una baja concentración de sólidos totales (5,3%) en la alimentación.

Adicionalmente, analizaron el efecto del pretratamiento de la paja de arroz (5mm) y humedecimiento en agua o en una solución enzimática. La adición de paja de arroz pretratada incrementó la producción de metano de 66 a 82% en los digestores en mesofílico y de un 37 a 63% en los digestores termofílico. El máximo rendimiento específico de metano se logró en los digestores mesofílico con pretratamiento enzimático de la paja para un valor de 0,311 m<sup>3</sup>kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup>.

La digestión anaerobia de la paja de arroz, también fue analizada por Zhao *et al.* (2009), mediante un ensayo de fermentación en discontinuo a 35 °C. La paja de arroz fue mezclada con una solución de ácido acético y propiónico en relaciones sólido-líquido de 1:10, 1:15 y 1:20, respectivamente. Posteriormente fueron calentadas a 121 °C (con 0,1

MPa) a diferentes intervalos de tiempo desde 30 hasta 120 minutos. Se logró una productividad de metano final con la paja sin tratar de  $0,25 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}\text{d}^{-1}$ , mientras que con el pretratamiento se logró  $0,28 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}\text{d}^{-1}$ , en los doce primeros días. Lei *et al.* (2010) evaluaron el efecto sobre la digestión de la paja de arroz del uso de un inóculo aclimatado al sustrato así como suplementación de diferentes niveles de fosfato  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (0,05 M) al sistema. En este caso la paja de arroz fue troceada manualmente a un tamaño de 3-5 mm. El pH se ajustó a 7,1-7,2 y la relación C/N fue de 22, aproximadamente, en cada reactor. Para evaluar el funcionamiento de los reactores operados bajo diferentes niveles de fosfato aplicaron un modelo cinético de primer orden. Valores de la constante de velocidad de producción de biogás  $k$  de  $0,027\text{--}0,031 \text{ d}^{-1}$  demostró que en el reactor con  $465 \text{ mgL}^{-1}$  de fósforo se obtuvo una rápida producción de metano, entre un 15-18% mayor comparado con el control. Los valores de producción de biogás promedio alcanzados fueron de  $0,33\text{--}0,35 \text{ m}^3_{\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}}$ .

A pesar de que en regiones donde existe grandes acumulaciones de este residuo y sin posibilidad de otra fuente adicional, el tratamiento de la paja como único sustrato podría ser una solución energética y ambiental adecuada, la mayor parte de las investigaciones que se llevan a cabo sobre la paja de arroz, van dirigidas al pretratamiento de la misma, que si bien mejoran la biodegradabilidad conlleva a un aumento en los costos por el uso de agentes químicos e insumos energéticos, con la consiguiente repercusión en el balance económico total del proceso a escala industrial.

En resumen, se puede decir que las prácticas actuales del manejo de la paja de arroz en la Empresa Arrocería “Sur del Jibaro”, no son viables ambientalmente, pues la quema de la paja de arroz, provoca problemas de contaminación ambiental al generar partículas que se suspenden en la atmósfera como dióxido de fósforo y azufre, monóxido de carbono y nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), compuestos policlorados, dioxinas y furanos, las cuales son altamente cancerígenas, quedándose en las cenizas y en el suelo. La práctica de enterrar la paja, aunque evita los problemas que provoca la quema, genera entre 2,5 y 4,5 veces más metano que al quemarla (gas de efecto invernadero), por lo que esta alternativa tampoco es recomendable (Abril, 2009).

Para lograr el aprovechamiento de la paja de arroz en la generación de energía de forma eficiente y la obtención de productos de alto valor agregado como los biofertilizantes, es

necesario desarrollar una industria de recogida, transporte y almacenamiento, así como resolver las dificultades provocadas por su alto contenido de sílice. La producción de celulosa y papel a partir de la paja de arroz, incluyendo la restitución del potasio y sílice al suelo, es viable desde el punto de vista técnico y económico, sin embargo, aún no están solucionados todos los aspectos tecnológicos que aseguren una operación totalmente amigable con el ambiente (Abril, 2009).

El desarrollo de una industria que aproveche los componentes químicos de la paja de arroz, celulosa, hemicelulosa, lignina y silicio (biorefinería) parece ser la alternativa más interesante, teniendo en cuenta la gran cantidad de productos de alto valor agregado que pueden obtenerse, gracias a la flexibilidad del proceso, además de crear empleos de alta calificación. El retorno al suelo de los elementos esenciales (N, P y K) mediante la producción de biofertilizante constituye una alternativa atractiva para los productores y además una práctica agroecológica importante dentro de las formas de producción de cultivo intensivo, como es el caso de la empresa que se estudia.

### **1.1.3 Efecto ambiental de la digestión anaerobia y producción de biogás**

La producción de biogás como una fuente renovable ha emergido rápidamente en varios países, principalmente europeos, con la expectativa de mitigar sustancialmente los gases de efecto invernadero (GEI) y reducir la energía a partir de combustibles fósiles. Para ello han creado diferentes regulaciones o incentivos a favor de la energía renovable (Meyer-Ulrich *et al.*, 2012). Los beneficios ambientales de la tecnología de digestión anaerobia se deben principalmente a la sustitución de energía fósil por la del biogás y a la mitigación de las emisiones que ocurren en el sistema de referencia. Tal es el caso de las plantas de biogás que tratan estiércol de animal que mitigan emisiones debido al almacenamiento de ese estiércol, sin embargo cuando se emplea como sustrato cultivos energéticos como el maíz, se producen grandes emisiones asociadas a la cosecha, que pueden llegar incluso a contrarrestar o hacer neutral el efecto de mitigación por el uso del biogás (Berg *et al.*, 2006). En tal sentido se desarrollan estudios que fundamentan la sostenibilidad de esta tecnología. Recientemente Meyer-Ulrich *et al.* (2012) demostraron el potencial de mitigación de gases de efecto invernadero de la generación de energía eléctrica y térmica a partir de biogás obtenido de recursos agrícolas (excretas vacuna y ensilaje de maíz). Para ello compararon las emisiones de GEI debido a la producción de biogás en seis

escenarios seleccionados con un sistema de referencia, según describen las normas para análisis del ciclo de vida. Es de notar que realizaron un análisis de la variabilidad del potencial de mitigación debido a las incertidumbres asociadas a los procesos tecnológicos y medioambientales, los cuales resultan difíciles de controlar.

Berglund y Borjesson, (2006) analizaron el balance energético en sistemas de producción de biogás desde la perspectiva de ciclo de vida. Refieren una amplia gama de sustratos e incluyen pajas de diferentes cultivos, pero sin especificar a qué cultivo correspondieron. Los resultados mostraron que la energía de entrada en un sistema de biogás (ejemplo: plantas de biogás a gran escala) corresponde en un 20 al 40% al contenido de energía del biogás producido, y plantean que es difícil dar una conclusión general sobre el balance de energía en la producción de biogás, ya que los resultados dependen significativamente del diseño del sistema, del tipo de material a digerir y de los métodos de asignación seleccionados. Específicamente, el potencial de mitigación de gases de efecto invernadero por el uso de la paja de arroz como una fuente renovable de energía, en países como la India, Tailandia y Filipinas, fue analizado por Gadde *et al.* (2009), aunque el estudio solo se enmarca a la generación de electricidad por combustión directa de la paja de arroz.

En resumen, existen investigaciones que fundamentan las bondades medioambientales de la tecnología de producción de biogás para los diferentes sistemas estudiados, no obstante sería importante demostrar qué implicación ambiental tendría para la producción de arroz cubano, el uso de sus residuos para este fin, como una alternativa de tratamiento.

#### **1.1.4 Potencialidades energéticas y efecto ambiental de la paja de arroz. Propuesta de su digestión anaerobia en el CAI arrocero “Sur del Jíbaro”**

Los estudios realizados por Contreras, (2013) demostraron las potencialidades energéticas del residuo paja de arroz si es utilizado como sustrato de la digestión anaerobia para producir biogás. En este estudio se obtuvo como resultado una propuesta tecnológica para este caso, donde se necesitaría de un volumen efectivo total de digestión de 38 258 m<sup>3</sup> y según el rendimiento de biogás experimental obtenido por esta autora, es posible obtener una producción diaria de biogás de 59 397 m<sup>3</sup>. Con la producción diaria de biogás esperada y los índices de generación de energía eléctrica y térmica empleados, se puede estimar una producción de energía de 132 456 kWhd<sup>-1</sup> eléctricos para una potencia de 6 MW y una disponibilidad de energía térmica de 197 199 kWhd<sup>-1</sup> para una potencia de

8,20 MW, lo que posibilitaría a la empresa la sustitución del diesel que consume en la etapa industrial de secado. En la Tabla 1.1 se muestran los elementos considerados en este estudio para la estimación de las potencialidades energéticas para el caso de estudio de la empresa “Sur del Jíbaro”, teniendo en cuenta algunas modificaciones realizadas al estudio previo de Contreras, (2013).

**Tabla 1.1** Elementos considerados para la estimación de las potencialidades energéticas en el caso de estudio de la empresa “Sur del Jíbaro”. (Modificado de Contreras, 2013).

Parámetro	Unidad	Valor
Paja de arroz disponible	ta <sup>-1</sup>	80 000
Relación alimentación de agua:paja	-	2:1
Días de operación anual	d	365
Densidad de la biomasa	kgm <sup>-3</sup>	74,50
Densidad del agua	kgm <sup>-3</sup>	1 000
Tiempo de retención estimado	d	45
Contenido materia orgánica de la alimentación	kgSV tMF <sup>-1</sup>	698,20
Rendimiento experimental de biogás	m <sup>3</sup> kgMF <sup>-1</sup>	0,27
Índice generación energía eléctrica	kWhm <sup>-3</sup>	2,23
Índice generación energía térmica	kWhm <sup>-3</sup>	3,32
Alimentación diaria de biomasa	td <sup>-1</sup>	219,18
Alimentación diaria de agua	td <sup>-1</sup>	438,36
Alimentación total diaria	td <sup>-1</sup>	657,53
Volumen de alimentación diaria	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	657,53
Flujo de materia orgánica diaria al digestor	kgSV d <sup>-1</sup>	153 030
Carga orgánica volumétrica máxima	kgSV m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	4,00
Volumen efectivo mínimo de reactor	m <sup>3</sup>	38 258
Producción diaria de biogás	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	59 397
Producción diaria de energía eléctrica	kWh	132 456
Potencia del sistema de generación eléctrica	MW	6
Energía térmica disponible diaria	kWh	197 199
Potencia térmica	MW	8

Contreras, (2013) también obtuvo en su estudio el efecto ambiental del tratamiento de la paja de arroz vía digestión anaerobia para producir biogás con fines energéticos, en comparación con la disposición actual de los restos de cosecha en esta empresa. La figura 1.1 muestra estos resultados donde se observa como esta alternativa implica una disminución en las 11 categorías intermedias analizadas representadas en por ciento, dado por las emisiones que se evitan de CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y de material particulado, asociadas con la quema de la paja de arroz, y por la mitigación de daños al

sustituir combustible fósil en la generación eléctrica, por una fuente renovable. Además de la sustitución del recurso diesel que se utiliza como combustible en los secaderos, por la energía térmica disponible de la etapa de cogeneración (Contreras, 2013).



**Fig. 1.1.** Resultados de las categorías de impactos ambientales intermedios en por ciento de reducción (Fuente: Contreras, 2013).

Sobre la base de los datos de producción de la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” durante el año 2011, se obtuvo, además, que se hubieran dejado de emitir a la atmósfera 6 041 438 t de CO<sub>2</sub> equivalente si la paja de arroz hubiese sido tratada por vía anaerobia. Esto hubiera significado el 0,2% de las emisiones totales del país y el 3,2% de las emisiones del sector energético en ese propio año, resultado que corrobora el efecto ambiental positivo de la propuesta desde la perspectiva nacional.

## 1.2 Emergía y sostenibilidad

Existe un creciente interés en reincorporar el papel de los ecosistemas a la toma de decisiones económicas, puesto que se considera que el divorcio entre el crecimiento, que ha sido el foco de debate dentro de la ciencia económica, y los ecosistemas, que son el objeto de la mayoría de los esfuerzos de conservación, es una de las causas primordiales de la pérdida de biodiversidad que vivimos actualmente en el marco del cambio global. La síntesis emergética es una metodología que se inscribe en este intento, partiendo de una base ecológica y termodinámica (Lomas *et al.*, 2007).

La síntesis emergética consta de una potente base modelística, que se apoya en el uso del lenguaje energético y en los diagramas de flujo. Dichos diagramas de flujo, en tanto

que simbolizan la ventana ambiental, constituyen una representación de los sistemas socio-ecológicos, y por tanto, del capital natural, las funciones y los servicios de los ecosistemas, haciendo explícitos estos enlaces entre ecosistemas y sociedad (Lomas *et al.*, 2007).

La síntesis emergética como método, y los indicadores derivados de los flujos de energía adoptan el denominado “punto de vista del proveedor” a la hora de estudiar un producto o sistema. El “punto de vista del proveedor” significa que la síntesis emergética cuantifica el coste socio-ecológico de un producto o sistema, es decir, la materia y la energía de índole tanto biogeofísica como socio-económica que se ha invertido en su generación a lo largo del tiempo, y no los beneficios que aporta este producto o sistema a un determinado usuario (que sería lo que habitualmente se denomina desde el “punto de vista del usuario”) (Lomas *et al.*, 2007).

La síntesis emergética, en general, y la energía, en particular, cuantifican los servicios de los ecosistemas directa y explícitamente. Esto quiere decir que en la cuantificación y caracterización de los servicios no se utilizan categorías intermedias, como el valor de cambio, sino que se captura directamente la cantidad de materia y energía que constituye el servicio. La síntesis emergética concentra sus esfuerzos en estudiar los servicios desde el punto de vista del trabajo que tienen que hacer las unidades suministradoras de servicios en el marco del capital natural para generar físicamente la cantidad de servicios utilizada por los usuarios.

La síntesis emergética genera indicadores *sensu stricto*, en el sentido de que a partir de un marco conceptual y metodológico concreto que implica la mezcla de multitud de bases de datos de distinta naturaleza (geofísica, ecológica, monetaria, etc.) se calculan las respectivas energías y se construyen relaciones entre ellas.

Los indicadores emergéticos incorporan estructuralmente la dimensión temporal a través de la transformicidad y la energía específica que calculan el trabajo socio-ecológico total que ha costado a lo largo del tiempo generar una unidad de un determinado producto o sistema, constituyéndose en un verdadero indicador de eficiencia del sistema en el uso de la materia y la energía (Lomas *et al.*, 2007).

Los indicadores emergéticos son contexto-dependientes, es decir, que un valor alto o bajo del indicador tiene distintos significados de acuerdo con la fase del ciclo adaptativo en la

que el sistema socio-ecológico se encuentre o su contexto. Los casos de estudio ilustran que si la fase en la que se encuentra el sistema socio-ecológico es de crecimiento, unos valores altos de los indicadores que señalen un aumento y/o diversificación del uso de las funciones de los ecosistemas, y por tanto del aporte de servicios que realice el capital natural, serán positivos; al contrario, si se trata de fases de transición o crisis, un aumento en el uso del capital natural puede forzar la crisis o profundizarla. Esto implica también un cierto grado de dificultad a la hora de leer los indicadores, y la posibilidad de caer en errores al descontextualizar las cifras (Lomas *et al.*, 2007).

La perspectiva amplia que aportan los indicadores emergéticos, que cubre toda la ventana ambiental de un producto o sistema, así como lo directo y explícito en las relaciones entre sub-sistemas dentro del sistema socio-ecológico hacen que sea imposible mantener la hipótesis de perfecta sustituibilidad entre capitales.

La implementación de la síntesis emergética supone trabajar a varias escalas a la vez, en la medida en que, al menos, es la escala inmediatamente superior la que proporciona las entradas de materia y energía al sistema. Desde el punto de vista emergético, las relaciones entre socio-ecosistemas dentro de la misma escala o a distintas escalas se codifican en términos de intercambio de materia y energía.

La síntesis emergética es una metodología con base ecológica y termodinámica, que permite incluir los flujos de materia y energía procedentes de la base biogeofísica de los socio-ecosistemas dentro de la valoración de los costes ecológicos de la economía, complementando la escala de acción de otras metodologías tradicionalmente usadas con este objetivo, en un contexto multi-criterio de evaluación del uso del capital natural. Para que la síntesis emergética llegue a tener un papel dentro en la resolución de los problemas ligados a las relaciones ser humano-naturaleza, debe explotar estas propiedades dentro de este contexto multi-criterio (Lomas *et al.*, 2007).

Por su parte la sostenibilidad es un concepto polémico, pues se ha definido de maneras diferentes por muchas disciplinas. Sin embargo a partir de la época de los años 70 la palabra es utilizada para referirse a un manejo apropiado de los recursos naturales, de tal manera de permitir a las próximas generaciones el acceso a los recursos que se utilizan o no en la actualidad; esta definición fue la ilustración del Reporte de la Comisión Brundtland.

Pero en Redclift (1987), de acuerdo a su formación, desarrolla la idea que se requiere de un análisis de la interrelación del desarrollo y el medio ambiente. Es decir, el autor ve la necesidad de relacionar en el concepto de sostenibilidad el aspecto económico; que se evidencia en el desarrollo de un país y el aspecto ambiental.

De esta manera, Redclift (1987) define sostenibilidad como “el desarrollo sostenible, si no ha de ser despojado de contenido analítico, significa algo más que la concertación del compromiso entre el ambiente natural y la búsqueda del crecimiento económico. Esto significa una definición del desarrollo que reconozca que los límites de la sostenibilidad tienen origen tanto estructurales (económicos) como naturales” Debido a que la economía es un sistema abierto que disipa energía y materiales para mantenerse o crecer, su sostenibilidad depende de la disponibilidad de energías y materiales que consume (Lomas *et al.*, 2007).

Si la sociedad genera estructuras que requieren grandes flujos de energía provenientes de recursos naturales y grandes almacenamientos de energía fósil, y las concentraciones de estos recursos son consumidos y agotados, entonces la sociedad deberá prescindir de estas estructuras o enfrentará forzosamente una declinación (Odum, 2001).

En otras palabras, la sostenibilidad de una sociedad o de un proyecto depende principalmente de los tipos de recursos o de energías que intervienen en los mismos; siendo sostenible la dependencia de éstos por los recursos renovables y no por los que no son renovables.

Por lo tanto, un sistema es sostenible en la medida que las fuentes de energía que le aportan los flujos necesarios para su permanencia perduren a través del tiempo (fuentes renovables), o bien, un sistema es sostenible si es capaz de adaptarse a las fuentes de energía disponibles y a remplazar dichas fuentes de energía por otras en caso de que las fuentes originales de energía dejen de estar disponibles (Lomas *et al.*, 2007). Se puede decir entonces que la sostenibilidad es intrínseca a la relación que hay entre la tasa de consumo de los recursos de la fuente respecto a la tasa con que la fuente genera el recursos; por ejemplo, la extracción de recursos minerales tiende a ser insostenible, ya que es una actividad que se basa en productos no renovables. Sin embargo, la sostenibilidad de dicha actividad estará determinada por la disponibilidad de la energía

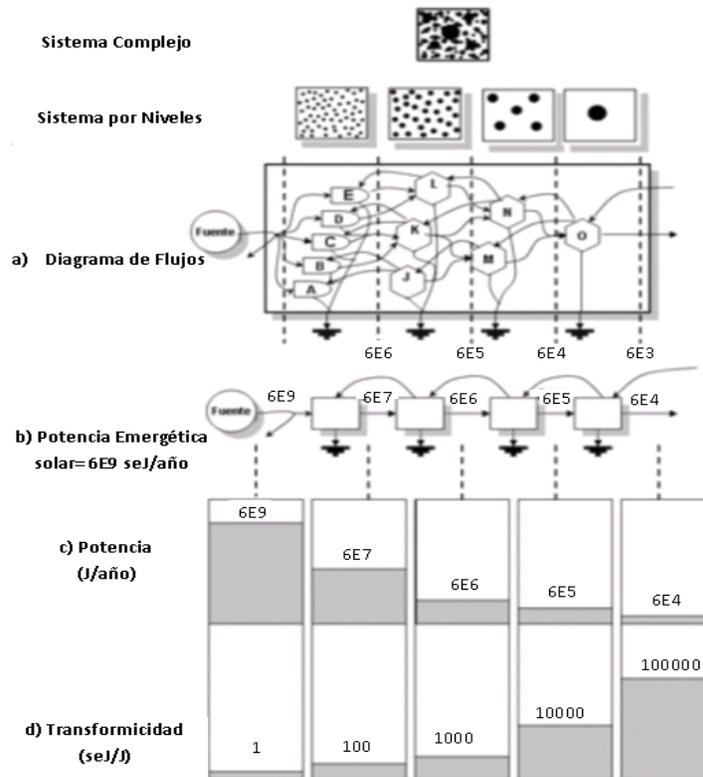
necesaria para realizar los procesos de extracción, transformación y reciclaje del mineral, además del aumento de la tasa de extracción del mineral.

Es así como la sostenibilidad de una economía, en términos energéticos, es una función de la dependencia de esta economía de energía renovable, el grado de cuanto depende la economía de la energía importada y la sobrecarga que la actividad económica genera en el ambiente (Lomas *et al.*, 2007). Se puede concluir entonces que la sostenibilidad es la compatibilidad entre el aspecto económico (máximo rendimiento) y el ambiental. Por tanto, la mejor relación es tener el mayor rendimiento con la menor carga medioambiental (Brown *et al.*, 2012). Teniendo en cuenta que a largo plazo sólo sistemas con un alto porcentaje de energía renovable capturada son sostenibles.

#### **1.4 Método de la contabilidad energética**

##### **1.3.1 Calidad de energía**

Todos los procesos de auto-organización de sistemas (ej: ecosistemas) están regidos por la segunda ley de la termodinámica, pues la energía que pasa de un nivel inferior a otro superior de la auto-organización es menor en cada escalón, dado que no existe una eficiencia del cien por ciento en el proceso de transformación; pero la energía necesaria para la construcción de niveles más altos de la auto-organización es cada vez mayor conforme el sistema se hace más complejo, es decir, conforme avanza en la cadena de organización (Odum, 1996). De esta manera, la energía se concentra a medida de que se avanza en los niveles de auto-organización como se muestra en la Figura 1.2



**Fig. 1.2** Diagrama energético de la jerarquía en la transformación de la energía. (Fuente: Tomado de Rydberg & Haden, 2006 *Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society*)

Esta observación implica que 1 joule de energía solar, 1 joule de carbón o 1 joule de electricidad, aunque representan la misma **cantidad** de energía (1 joule), no representan la misma **calidad**, en el sentido del potencial que tienen estos distintos tipos de fuentes energéticas para actuar sobre el conjunto del sistema, es decir, en la necesidad que tiene el sistema de recibir mayores o menores cantidades de energía menos concentrada para generar cada una de ellas (Lomas *et al.*, 2007).

Se concluye entonces que existe una *jerarquía de energías* según su calidad o potencial para influir en el sistema, que va desde fuentes de energía poco concentradas (como el sol) hasta aquellas muy concentradas (como el petróleo) (Odum & Odum, 2003; Sciubba & Ulgiati, 2005)

Es primordial hacer la aclaración sobre la selección de la energía solar como la energía de referencia, pues en el análisis emergético se supone que ésta es la principal entrada de energía poco concentrada a la ecósfera (en la tierra la fuente más abundante de energía es la luz solar, pero debido a que fluye en el tiempo y espacio, tiene una baja calidad en

comparación a otras formas de energía de la tierra derivadas desde ésta). Por tanto, la transformicidad tendría unidades de seJ/unidad de energía (joules equivalentes solares/unidad de energía).

### 1.3.2 Transformicidad, emergencia específica y jerarquía de energías

Por otro lado, la existencia de una jerarquía de energías, y la propia definición de emergencia conduce a un problema práctico y a una cuestión teórica, que son, por una parte el problema de transformar las distintas calidades de energía o materia a la calidad de energía de referencia (que, como se ha dicho, suele ser la solar), y por otra la cuestión de qué posición en la jerarquía de las energías ocupa cada elemento, respectivamente. Para poder transformar las diferentes calidades de energía o materia usadas a una calidad de energía solar (o emergencia), usaríamos un factor de equivalencia (UEV, en adelante), la **transformicidad** (*transformity*) o la **emergencia específica**, respectivamente, que nos informan de qué cantidad de energía con calidad equivalente a la solar es necesario para generar una unidad de energía o materia de mayor calidad (Odum, 1988; 1996). Por tanto, la transformicidad tendría unidades de seJ/unidad de energía, y la emergencia específica de seJ/unidad de masa. Esta cantidad también indicaría a qué nivel de la jerarquía de potencial de uso se encuentra el componente evaluado, es decir, qué cantidad de energía disipada es necesaria para generar una unidad de un determinado producto con una concentración mayor de energía.

Así, en el álgebra emergético tendríamos que:

$$E_i = Tr_i * Ex_i, \text{ donde}$$

- $E_i$  = emergencia (seJ) del producto.
- $Tr_i$  = transformicidad (seJ/unidad).
- $Ex_i$  = energía útil o Exergía (unidad de energía).

Y de modo análogo, para el caso de la materia:

$$E_i = Tr_i * M_i$$

- $E_i$  = emergencia (seJ) del producto.
- $Tr_i$  = emergencia específica (seJ/unidad).
- $M_i$  = masa (unidad de masa).

Calcular de nuevo los factores de equivalencia o de transformicidad es algo complicado, que está fuera del alcance de este estudio, pues se requiere un nivel de detalle de

información con el que no se cuenta. Por eso, la mayoría de los investigadores que hacen uso de la emergía, toman estos factores de estudios anteriores donde especifiquen la elaboración concreta y los constituyentes a los que hace referencia. Empíricamente se ha comprobado que la magnitud de los factores de transformicidad no varía significativamente cuando se trata de sistemas similares (Lomas *et al.*, 2007). Odum & Odum (2003) recomiendan usar transformicidades razonables ya calculadas que se encuentran en el apéndice C del libro “Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making” (Odum, 1996), siempre y cuando se hable de sistemas similares.

Las dos bases de datos principales se encuentran en la Universidad de Florida (EE.UU), la *International Society for the Advancement of Emergy Research* (Sociedad Internacional Dedicada al Avance de la Investigación en Emergía), y en la Universidad de Campinas (Brasil); esta última dirigida por el doctor Enrique Ortega. Esta base de datos se puede descargar de la red a través de estas direcciones:

(“<http://www.unicamp.br/fea/ortega/curso/transformid.htm>,”n.d.)

(“<http://www.emergysystems.org/folios.php>,” n.d.)

### **1.3.3 La metodología: la Síntesis Emergética**

Una vez aclarados estos aspectos, podemos decir que la **Síntesis Emergética de sistemas** (SES) (Odum,1996) es una metodología útil para la evaluación de los ecosistemas, y basada en la comparación de flujos de energía, masa y dinero utilizados por un SES a través de la base común de la emergía ligada a estos flujos. El objetivo de esta metodología es el de estudiar la organización de sistemas termodinámicamente abiertos, es decir, que intercambian materia y energía con el ambiente externo (Franzese *et al.* 2005), a través del uso de una perspectiva sistémica. Los objetivos generales de su aplicación son:

- La caracterización de las principales fuentes de energía externas al sistema y que dirigen su evolución en el tiempo.
- La estimación de la contribución de los servicios de los ecosistemas al sistema socio-económico, como capital natural.
- La estimación del trabajo de la ecosfera en la dinámica global de los sistemas antrópicos.

- La realización de una contabilidad ambiental económico-ecológica integrada sobre bases termodinámicas, con el objetivo de servir a la toma de decisiones políticas.
- El cálculo de indicadores termodinámicos de rendimiento, impacto, y sostenibilidad.

Su uso ha permitido (Brown y Ulgiati, 2004), entre otras cosas:

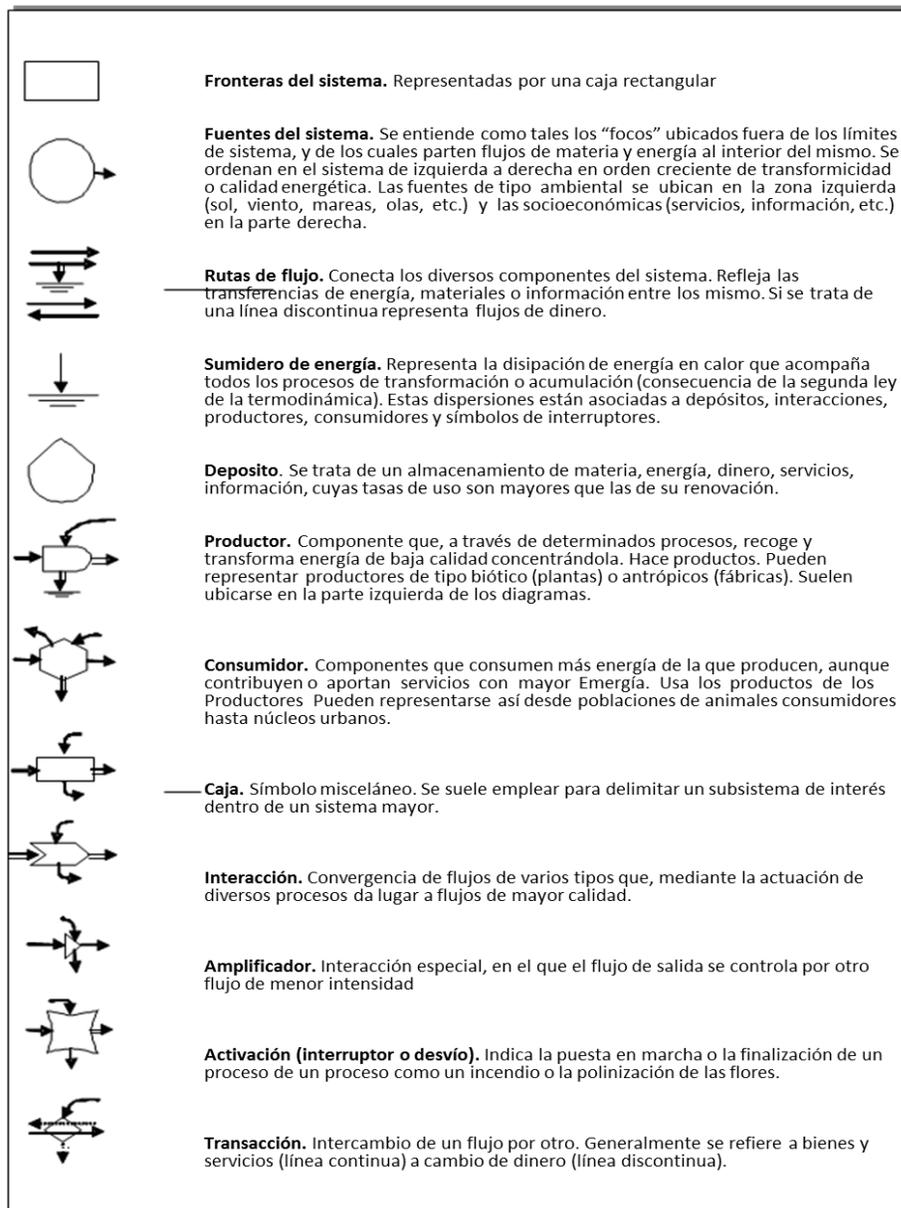
- a) investigar sistemas fuera de las actividades humanas,
- b) conocer el papel que los sistemas ecológicos tienen para el ser humano,
- c) implementar una evaluación ligada a la aportación ambiental en lugar de la clásica evaluación desde el punto de vista del usuario,
- d) evaluar procesos donde el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

Las principales fases que caracterizan la realización de una síntesis emergética se pueden resumir en las siguientes (a partir de Odum, 1996; Brown & Ulgiati, 2004):

1. **Descripción del sistema investigado y definición de sus límites espaciotemporales.** Con una base socio-ecológica, y según los objetivos para los que se realice el estudio.
2. **Modelado del sistema socio-ecológico.** Consiste en la representación, a través de diagramas de flujos de materia y energía, utilizando la simbología emergética (Figura 1.3.) establecida por Odum (1994), de la interacción entre las fuentes externas e internas del sistema, y los sistemas ecológicos y socio-económicos, así como los flujos de salida del sistema y la retroalimentación del mismo. Se trata de un modo muy instructivo de hacer explícitas las relaciones entre los componentes del sistema (Abel, 2004; Brown, 2004; Odum & Odum, 2000) y, por tanto, de visualizar el criptosistema (González Bernaldez, 1981), que además encierra detrás todo un aparato matemático que permite el modelado del mismo. A efectos de simplificar la contabilidad, los modelos complejos se suelen resumir para capturar las principales entradas y salidas al sistema, así como otros flujos que constituyen los factores clave y/o limitantes, en gran medida, del funcionamiento

interno del mismo. El modelado se compone de los siguientes pasos (a partir de Odum & Odum, 2000):

- a. A partir de los límites del sistema se definen las principales entradas y salidas de energía del mismo, y se clasifican según su naturaleza (biogeofísica, económica, humana, etc.), de izquierda a derecha en orden de transformicidad creciente alrededor del símbolo de límites del sistema.
- b. Se definen los componentes internos del sistema y sus relaciones tanto con las entradas y salidas de materia y energía como entre ellos, teniendo cuidado de implicar todos los elementos del sistema que regulan los procesos que constituyen el funcionamiento del mismo. Se colocan bajo el mismo criterio que en el anterior punto.
- c. Se incluyen los flujos de dinero correspondiente al uso económico que puedan tener algunos flujos del sistema, así como las entradas de dinero que mueven algunos de los componentes socio-económicos del mismo.
- d. Se incluye la degradación correspondiente a la segunda ley de la termodinámica.
- e. Se simplifica el diagrama según los objetivos del estudio mediante una agregación de categorías al nivel de detalle que se quiera llevar a cabo.



**Fig. 1.3** Significado de los principales símbolos emergéticos de Odum, aplicados en la Síntesis Emergética como forma de modelado de los sistemas socio-ecológicos.

3. **Obtención de datos y balances del sistema.** Se trata del cálculo efectivo de los flujos de materia y energía que figuran en el diagrama anterior para el período de tiempo investigado, y de la emergía correspondiente a estos flujos, a partir de las transformicidades y energías específicas correspondientes (Brown & Ulgiati, 2004). Implica la construcción de una tabla con los principales flujos de emergía clasificados, y que consta de una serie de campos.

4. **Cálculo de una serie de indicadores emergéticos.** A partir de los flujos hallados, y sistematizados en la tabla anterior, se pueden calcular toda una serie de relaciones. Serán explicados más adelante.
5. **Evaluación y comparación espacio-temporal de los indicadores emergéticos del sistema con otros sistemas similares y/o el mismo.** Esta comparación se realiza partiendo del criterio ligado al denominado Principio de Máxima Potencia Emergética (Odum & Pinkerton, 1955; Odum, 1983; Odum, 1995; Odum, 1996). Odum, (1996) tomó las ideas originales de Lotka (1922a; 1922b) ligadas a la importancia de la energía en el proceso evolutivo, y las transformó y actualizó para dar lugar al Principio de Máxima Potencia Emergética, que propone que en la competición entre procesos auto-organizativos prevalecen las relaciones y diseños que maximizan la potencia emergética. Hay que recalcar que se refieren al flujo o tasa de adquisición de energía o potencia emergética por el sistema (tanto a la entrante como a aquella que retroalimenta el sistema por distintas vías), y no a la energía total o suma de las energía adquirida por los distintos componentes del sistema (Cai *et al.* 2004; Hall, 2004), es decir, no se trata de que cuanto más se consume mejor. Así, se toma en cuenta los procesos de eficiencia en la adquisición, pero también aquellos de retroalimentación dentro del sistema, es decir, que se trata de utilizar del mejor modo la energía que alimenta el sistema, no usar la máxima cantidad. Aunque el Principio de Máxima Potencia Emergética sean uno de los aspectos más criticados y discutidos del método (Hau & Bakshi, 2004), su significado termodinámico y ecológico en el marco de los sistemas complejos adaptativos es uno de los campos de investigación que actualmente se están desarrollando con más posibilidades e interés dentro de la evolución del método, y sus posibles aportaciones a la Economía Ecológica. Este principio aporta un criterio, que no pretende ser exclusivo, y que permite determinar qué sistemas o diseños, ya sean ecológicos o ecológico-económicos, son más sostenibles en el tiempo desde el punto de vista del uso de la energía frente a otros de similares características, por lo que se ha convertido en una de las funciones objetivo de la física (Fath *et al.* 2001).

### 1.3.4 Índices emergéticos

Como se trató en apartados anteriores, el análisis emergético separa las entradas de fuentes renovables de las no renovables y de las entradas importadas. Estas distinciones hacen posible definir los indicadores emergéticos, que proveen las herramientas para la toma de decisiones de sostenibilidad, especialmente cuando se tratan diferentes alternativas (Brown *et al.*, 2012; Castellini *et al.*, 2006; Cohen *et al.*, 2006). Todos estos indicadores que se describirán a continuación cubren todos los aspectos de la sostenibilidad ambiental (Castellini *et al.*, 2006).

- a) **ELR** (del inglés: **Enviromental Loading Ratio**): Es el índice de carga ambiental, hace referencia a la relación que hay entre las entradas de los recursos no renovables al sistema más los recursos importados sobre los recursos renovables

$$ELR = (N+F) / R \quad \text{Ec. 1.1}$$

Los valores bajos de ELR (2), 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  $3 < ELR < 10$  el impacto es considerado moderado. Este índice es alto para sistemas con altas entradas no renovables o con altas emisiones al ambiente (Cao & Feng, 2007) y aquellos procesos muy tecnológicos.

- b) **EYR** (del inglés: **Emergy Yield Ratio**): Es el índice de rendimiento emergético; indica la relación que hay entre la emergía total del sistema sobre los recursos importados

$$EYR = (R+N+F) / F \quad \text{Ec. 1.2}$$

Este índice es usado para estimar la dependencia que tiene el proceso sobre los recursos importados o comprados y para mostrar la contribución del capital natural local en la economía de la región o el proceso. Bajos valores de EYR indican un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; por el contrario, altos valores de EYR indican la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico (Zhou *et al.*, 2010). Es decir, cuanto mayor sea este índice, mayor es la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) al sistema (Castellini *et al.*, 2006). Este índice también muestra que tan eficientemente el sistema usa los recursos locales que tiene disponible (Castellini *et al.*, 2006). Simultáneamente revela la capacidad de un proceso para

explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang *et al.*, 2010).

EYR<5 indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios; materias primas como cemento, acero entre otros. EYR>5 indica la utilización de recursos energéticos primarios y EYR<2 indican que no hay contribución significativa de recursos locales y están asociados a procesos casi completamente manufacturados (Brown *et al.*, 2012). Cuanto más alto sea el índice de producción energético, más energía está proporcionando un proceso dado al sistema frente a la que retira (Odum & Odum, 2003).

- c) **ESI** (del inglés: **Emergy Sustainable Indices**): Es el índice de sostenibilidad; indica la relación que hay entre el índice de rendimiento emergético y el índice de carga ambiental.

$$ESI = EYR / ELR$$

Ec.1.3

Este índice refleja la capacidad que tiene un sistema para suministrar productos o servicios con un mínimo estrés ambiental y un máximo beneficio económico (Zhang *et al.*, 2011). (Cao & Feng, 2007).

Cuando ESI<1 el proceso no es sostenible a largo plazo, cuando 1<ESI>5 se presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo, con ESI>5 el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo. Pero es incorrecto pensar que entre mayor sea este índice, mucho mayor es la sostenibilidad del proceso, pues a ESI>10 el proceso es considerado subdesarrollado (Cao & Feng, 2007).

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

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

Ec.1.4

Cuanto menor sea este índice, más bajo es el costo económico del proceso, así que la alternativa que presente un menor índice tiende a ser más competitiva y a prosperar en el mercado. Generalmente cuanto mayor sea la relación, mayor es el nivel de desarrollo económico del sistema (Zhang *et al.*, 2007).

- e) **T** (del inglés: **Emergy Per Unite**): Indica la transformicidad del producto o servicio final; es la relación que hay entre la emergía sobre la emergía total del producto o servicio producido.

$$T = (R+N+F) / E \quad \text{Ec. 1.5}$$

Cuando se comparan dos alternativas, una baja transformicidad indica una alta eficiencia en el proceso, pues se obtiene más producto con una cantidad dada de emergía incorporada al proceso, en otros términos se requiere menor cantidad de emergía para generar el producto (Lu *et al.*, 2010).

- f) **R** (del inglés: **Renovation Ratio, %**): Es la relación que hay entre las entradas de las fuentes renovables al sistema sobre la emergía total.

$$\%R = (R / (R+N+F)) \times 100 \quad \text{Ec. 1.6}$$

El factor de renovabilidad debe ser introducido dentro del análisis emergético cuando se quiera hacer una evaluación de sostenibilidad (Agostinho *et al.*, 2008). Simplemente indica el porcentaje de emergía renovable usada por el sistema. Los sistemas con un alto porcentaje de emergía renovable tienen mayor probabilidad de ser más sostenibles y prevalecer (tienen más capacidad de sobrevivir a un estrés económico, que aquellos que usan una gran cantidad de emergía no renovable) (Cohen *et al.*, 2006; Rydberg & Haden, 2006).

- g) **SEC** (del inglés: **Soil Emergy Cost**): Indica el costo emergético del suelo; es la relación que hay entre las entradas no renovables al sistema sobre la emergía total.

$$SEC = N / (R+N+F) \quad \text{Ec. 1.7}$$

Este índice provee la relación costo-beneficio (suelo-agricultura) para las prácticas de agricultura. Es así como SEC compara los rendimientos agrícolas contra la pérdida de emergía asociada al suelo erosionado; es decir, la cantidad de pérdida de suelo por unidad de emergía. El valor de este índice debe ser menor que la unidad (Zhang *et al.*, 2012).

- h) **EER** (del inglés: **Emergy Exchange Ratio**): Es el índice de la tasa de cambio energético; es calculado dividiendo el total de la emergía del producto por la emergía recibida de la venta.

$$EER = (R+N+F) / (\text{Precio del producto} \times \text{Emergy money ratio}) \quad \text{Ec. 1.8}$$

El "Emergy Money Ratio", conocido como relación emergía-dinero o canje emergético, es la cantidad de emergía que se puede comprar en un determinado

país por una unidad de dinero (un dólar) en un año específico. Países más desarrollados suelen tener un valor más bajo de este índice, indicando una mayor circulación de dinero. Los países menos desarrollados tienen valores más elevados de este índice, ya que en su economía hay una mayor contribución de recursos ambientales por los que no se paga (Ulgiati *et al.*, 1995). Más adelante se explica con detalle el cálculo de éste.

Es así como este índice proporciona una medida de quien gana o pierde en el comercio económico con relación al consumidor y productor (Cohen *et al.*, 2006). Un  $EER > 1$  indica que se suplió más emergía al consumidor respecto a la que fue recibida en el intercambio; es decir, el productor recibió menos emergía de la que fue utilizada para producir el bien. Si  $EER < 1$  indica que el productor obtuvo ganancias; recibió más emergía de la que fue utilizada. Si  $EER = 1$  se obtuvo exactamente la misma cantidad de emergía utilizada al momento de la venta (Agostinho *et al.*, 2008).

#### **1.4 Características del método emergético**

Una vez conocidos los principios del método de la contabilidad emergética, a continuación se resumen las principales características (Álvarez, *et al.*, 2006):

- ✓ Carácter global e integrador. Análisis a distintas escalas, es decir se realiza el análisis desde una escala más amplia (menor detalle) a una más reducida (mayor detalle), teniendo en cuenta la escala temporal o memoria de los servicios usados.
- ✓ Se trata de uno de los pocos métodos de valoración que permite evaluar los sistemas económicos y naturales, así como las interacciones entre ambos con una metodología común.
- ✓ Maneja unidades estandarizadas (julios solares emergéticos o *seJ*). Considera distintos tipos de calidad energética. Emplea factores de estandarización (transformicidades) para hacer equivalentes todos los flujos de energía dentro de una jerarquía de sistemas complejos.
- ✓ Es capaz de estimar los valores de distintos componentes (tanto económicos como naturales) del sistema en unidades energéticas y ligar éstos a unidades

monetarias, para hacerlo más comprensible, en un marco de referencia común (contabilidad ambiental).

- ✓ El valor (y los indicadores del mismo) no parte del individuo (de sus preferencias y/o conocimientos) sino que es intrínseco al recurso (el valor de un recurso es proporcional a la energía necesaria en su producción, denominada Emergía (Memoria Energética)). Pretende ser, por tanto, una teoría energética del valor (considerada objetiva y reproducible).
- ✓ Proporciona resultados cuantitativos sobre el estado de un sistema a través de diversos **índices** que permiten tomar decisiones con el objetivo de maximizar el bienestar público con las menores pérdidas ambientales posibles (gestión ambiental).
- ✓ Evalúa la renovabilidad de los servicios involucrados en el proceso
- ✓ Permite la modelización y la simulación, como poderosas herramientas de
- ✓ Incluye en la evaluación el trabajo humano y los servicios bajo un marco común.
- ✓ Tiene un principio de optimización (Principio de maximización de la potencia emergética).

Así, lo habitual en el procedimiento de la síntesis energética no es tanto tratar de reducir los distintos componentes materiales, energéticos, monetarios, etc. a energía solar como valor de cambio físico (la emergía no es una teoría de valoración económica), sino más bien tratar de introducir tanto elementos materiales como energéticos en el cálculo del trabajo realizado por la naturaleza para generar un determinado sistema o componente del sistema, que es medido en equivalentes de energía solar, como corresponde a la propia definición de emergía (Lomas Huerta 2009).

### **1.5 Ventajas y Desventajas del Método de La Contabilidad Energética**

En la Tabla 1.2 se muestran las principales ventajas y desventajas de la aplicación del método del análisis energético (Álvarez *et al.*, 2006). De manera general constituye una ventaja el hecho de que se parte de la construcción de un modelo conceptual (que constituye un paso fundamental en el proceso) y de una base de datos interdisciplinaria. Ambos pasos (modelización, o conceptualización del socio-ecosistema y obtención de información multirrelacionada) son básicos a la hora de abordar, desde una perspectiva sistémica, cualquier problema. Estos modelos y bases de datos asociadas (que integran y

comparan datos ecológicos con otros socioeconómicos) son de utilidad no sólo para la Síntesis Emergética, si no para otras múltiples aproximaciones o simplemente como bancos de información. No obstante, requieren grupos de trabajo transdisciplinares y supone grandes inversiones en términos de tiempo, dinero y personal que, en cualquier caso, dan sus frutos a medio-largo plazo. Una vez que se han creado esas bases de datos, su mantenimiento y actualización es mucho más sencillo (Álvarez *et al.*, 2006).

Por lo tanto este método es una evaluación integrada de los sistemas económicos, ecológicos, técnicos y energéticos, que ya ha sido exitosamente aplicado a sistemas de diferentes escalas (Brown & Ulgiati, 2004), en los que se incluyen: la sostenibilidad regional (Lei & Wang, 2008), restauración de los ecosistemas (Ton *et al.*, 1998) (Lu *et al.*, 2006), evaluación de la energía solar (Vassallo & Fabiano, 2009), y evaluación de la tecnología de las aguas residuales (Bjo & Geber, 2001; Siracusa & La Rosa, 2006), principalmente con el fin de utilizarlo como herramienta para la toma de decisiones ambientales.

**Tabla 1.2.** Ventajas y desventajas de la aplicación del método del análisis emergético

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Sólida base ecológica. Considera estructura, funcionamiento de cada tipo de ecosistema	Excluye aspectos sociales. Necesidad de complementar con otros métodos para no caer en el “reduccionismo energético”
Permite la interrelación de bases de datos que tradicionalmente se analizan de manera individual	Necesidad de una sólida y amplia base de datos de partida que no siempre está disponible
Consideración de las restricciones energéticas y termodinámicas de los sistemas. Aproximación desde la economía ecológica	Dificultad para incluir restricciones sociopolíticas de los sistemas. Aproximación egocéntrica
Consideración de distintos tipos de calidad energética	Necesidad de uso de factores de conversión (transformicidades)
Procedimiento estandarizado. Aplicación del método científico. Conceptualización del sistema en modelos de uso general	Incertidumbre en los cálculos de algunos factores de transformicidad
Trabajo multidisciplinar	Costo en tiempos y personal elevado
Conmensurabilidad de valores. Utilización de unidades comunes para evaluar componentes naturales y socioeconómicos	El concepto de valor no puede depender exclusivamente en la cantidad de energía necesaria para crear un determinado componente (hay que considerar otros factores como escases)

---

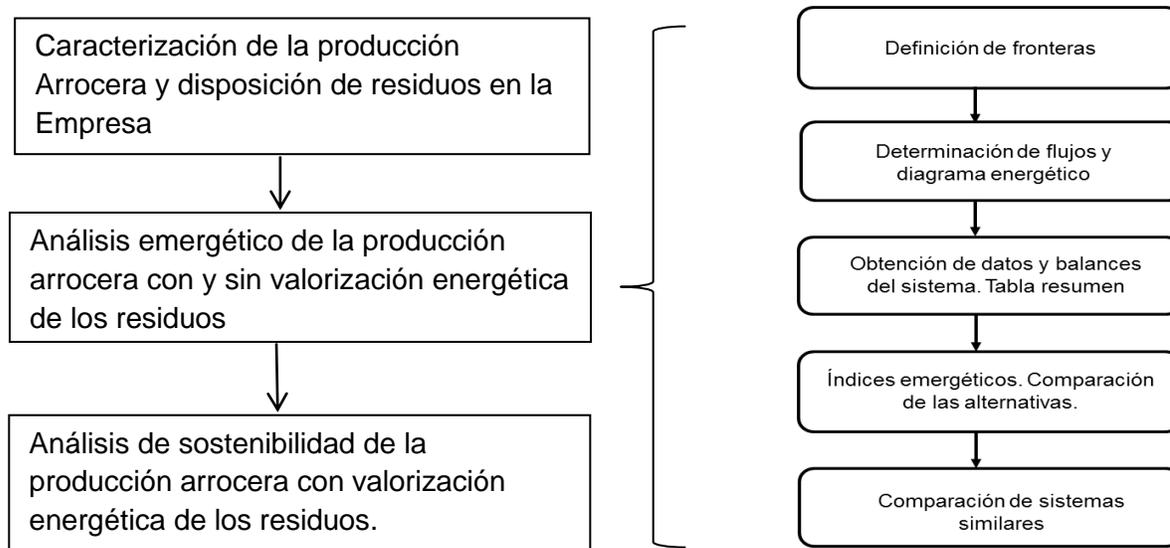
Gran potencialidad del método en comparación de alternativas y análisis a distintas escalas espacio-temporales

---

Necesidad de múltiples análisis previos para alcanzar una escala a gran detalle

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se expondrán los materiales y métodos utilizados para llevar a cabo la investigación. En el siguiente esquema se representa el procedimiento utilizado.



### 2.1 Caracterización de la producción arrocera en la Empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro”

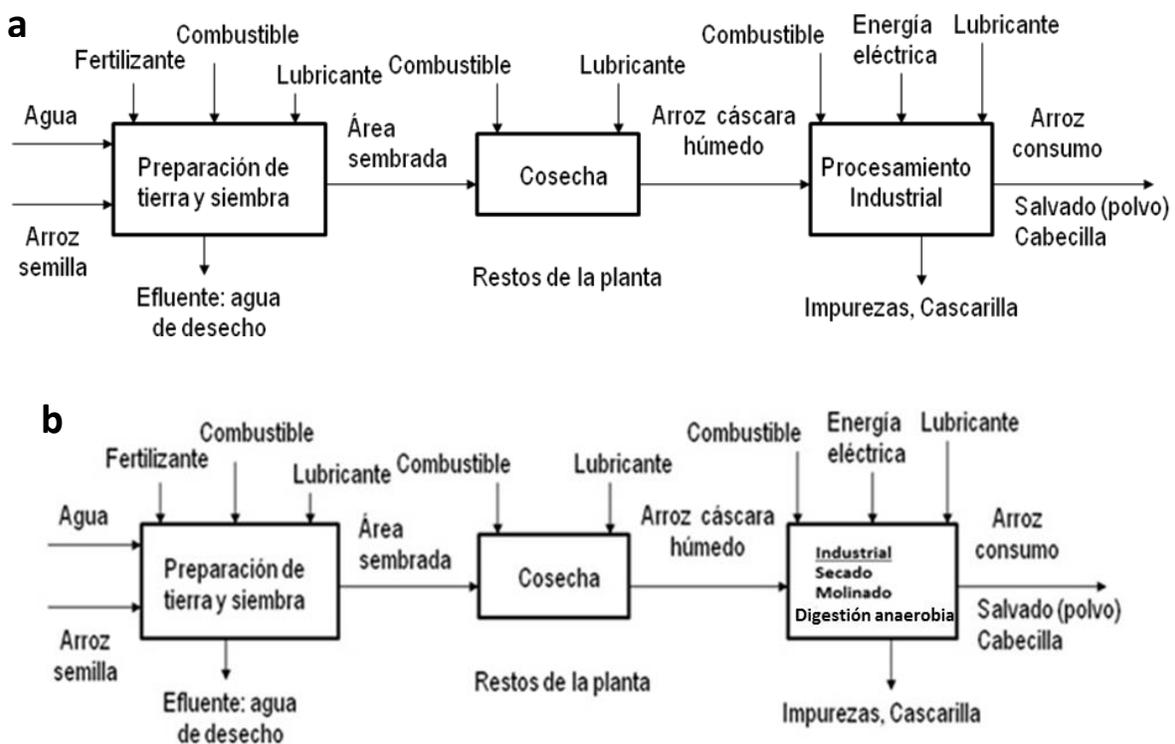
Para caracterizar la empresa Agroindustrial de granos “Sur del Jibaro” se realizó un análisis documental tanto de informes de la Empresa como de trabajos previos de investigación con fines energéticos y ambientales realizados por García-Rivero, (2010) y Contreras, (2013), donde se informaron datos reales de la producción arrocera y el consumo de varios de los insumos desde el año 2004 hasta la fecha. De esta manera se tuvo en cuenta el esquema general del sistema de producción de arrocera a partir del cual se pudo conocer las entradas y salidas (balance de masas y energías), así como las variantes de valorización de los residuos arroceros dentro del esquema de producción (Fig. 2.1 a y b).

Para la realización del presente estudio basado en el análisis energético de la producción de arroz en el CAI arrocero “Sur del Jíbaro” se evalúan dos alternativas propuestas en Contreras, (2013), las cuales tienen las siguientes características:

**Alternativa I:** Considera el proceso actual de la empresa, es decir, la etapa agrícola consta de la preparación de la tierra, siembra y cosecha, y tiene como característica

fundamental, para los objetivos de este estudio, que la paja de arroz (residuo de la cosecha) queda en el campo, suministrándole materia orgánica al suelo, constituyendo esto una ventaja y al mismo tiempo una desventaja, desde el punto de vista ambiental (Abril *et al.*, 2009). La etapa industrial consta del proceso de secado y molinado.

**Alternativa II:** Consiste en la valorización de la paja de arroz con fines energéticos. Es decir se utiliza como biomasa, en el tratamiento anaerobio, para producir biogás y generar energía térmica, que será usada en el secado del arroz, ahorrando el combustible que se utiliza en la actualidad, y generar energía eléctrica, que constituirá una de las salidas del sistema. La propuesta está caracterizada por un mayor uso de combustible que se introduce por el concepto de la compactación y transportación de la paja de arroz, además se hace necesario utilizar mayor cantidad de fertilizantes inorgánicos para abonar el campo para la cosecha y además evita la emisión de gases de efecto invernadero.



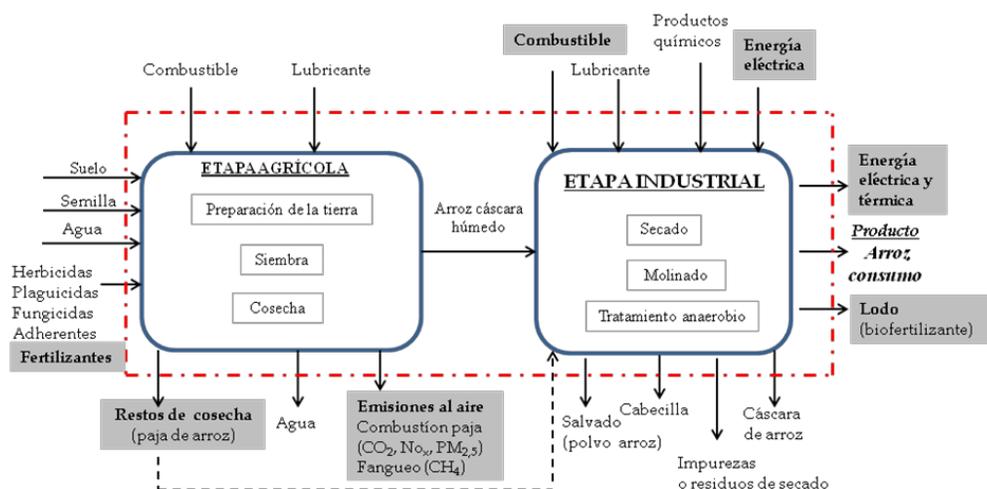
**Fig. 2.1** a: Esquema energético productivo actual; b: Esquema energético productivo con tratamiento anaerobio para la producción de biogás.

## 2.2. Análisis emergético

Esta investigación está dirigida a analizar mediante el método emergético la producción de arroz del CAI arrocero “Sur del Jíbaro”. Se aborda de manera sistemática y exhaustiva la metodología emergética para cada una de las alternativas estudiadas con base a los estudios de Odum (1996), donde se calcularon los índices emergéticos, los cuales son utilizados para analizar la sostenibilidad de cada alternativa. La metodología utilizada es resultado de la adoptada en otros procesos, pues no se encontró estudio alguno sobre la aplicación del método del análisis emergético para las dos opciones a evaluar. El presente estudio toma como base los trabajos de Odum (1996) y Lomas *et al.* (2007).

### 2.2.1 Definición de fronteras

A partir del esquema general se delimitó el sistema a utilizar en este estudio con fronteras definidas (límites espacio-temporales) en la que se establecieron los intercambios del sistema con sus alrededores. Los sistemas de estudio son delimitados con base a la información suministrada en Contreras, (2013) (Fig. 2.2), cuyos objetivos son los deseados en esta investigación que incluye la alternativa II de valorización de la paja de arroz por tratamiento anaerobio. Se consideró como producto final el arroz consumo y como unidad funcional la producción anual de 40 000 t de arroz consumo que fue la alcanzada en esta entidad en el año 2011.



**Fig. 2.2.** Esquema general del proceso de producción del arroz. Fuente: Contreras, (2013)

### 2.2.2. Determinación de flujos de masa y energía. Diagrama emergético

Los datos utilizados para la realización de este trabajo investigativo fueron recopilados a través de entrevistas con los directivos y técnicos de la empresa, consultas bibliográficas y de normas establecidas en este tema y, fundamentalmente, de Contreras, (2013) quien realiza el análisis del ciclo de vida al proceso de producción arrocerá, en cuya fase de inventario del análisis de ciclo de vida (ACV) se establecen cuáles son las principales entradas y salidas del sistema. A continuación se muestra la tabla resumen de entradas y salidas del sistema (Contreras, 2013).

En el proceso de análisis y comparación de los datos que serán utilizados en el estudio (Tabla 2.1) se determinaron contradicciones tanto con la bibliografía consultada como con los reportes oficiales emitidos por la empresa, conllevando a realizar las correcciones que a continuación se describen.

1. Agua riego: En Contreras, (2013), se consideran  $0,03 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . La empresa arrocerá "Sur del Jíbaro" establece que la norma de consumo de agua para riego es de  $17\ 351 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para la temporada de frío y  $16\ 154 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  para la de primavera.
2. Combustible: En Contreras, (2013), se consideran  $2\ 370\ 482,4 \text{ L a}^{-1}$  consumidos. Según datos oficiales del Departamento Energético del CAI arrocerá el consumo es mayor. Para la Alternativa II es necesario sumar el combustible a utilizar en la compactación, transportación del residuo de cosecha (paja de arroz) y traslado del biofertilizante obtenido.
3. Resto de cosecha: En Contreras, (2013), la producción de residuo de paja de arroz es de  $9,57 \text{ t h}^{-1}$ . Según García Rivero, (2010) se producen  $4,86 \text{ t h}^{-1}$  de paja de arroz. Para el [California Straw Building Association \(CASBA\) \(2008\)](#) la producción de paja de arroz en California es de 5.43 toneladas por hectárea.
4. Energía eléctrica y térmica: Varía ya que en Contreras, (2013), los cálculos fueron realizados para la producción de residuo de paja de arroz es de  $9,57 \text{ t h}^{-1}$ .

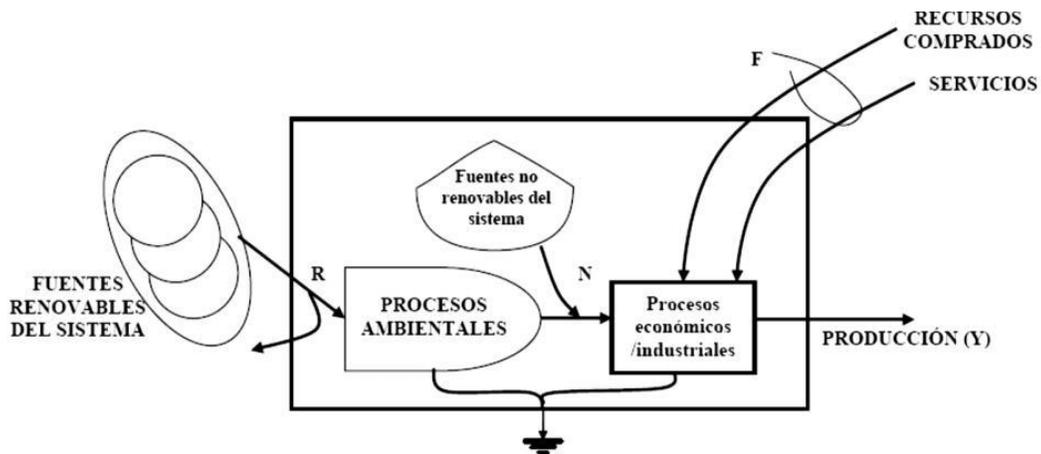
En el anexo 2.1 se exponen cuáles son los valores que se consideran adecuados en el estudio, que están acordes con los reportados por la bibliografía investigada.

Una vez delimitados los sistemas de estudio, la recolección, revisión y actualización de los datos ambientales y socioeconómicos para cada una de las alternativas se construye el diagrama emergético del sistema a partir de la definición de los recursos renovables (R), recursos no renovables (N), y recursos o servicios importados (F) según la metodología propuesta por diferentes autores (Álvarez *et al.*, 2006). Para la construcción del diagrama se tuvo en cuenta la simbología estandarizada para el lenguaje de emergía de los sistemas ecológicos (Odum, 1996) donde se representan gráficamente los componentes ecológicos–energéticos, el sector económico, los recursos utilizados y la circulación de dinero a través del sistema. La Figura 2.3 esquematiza de forma sintética las cuestiones que se tienen en cuenta para la construcción de los diagramas emergéticos para cada alternativa.

**Tabla 2.1** Entradas y salidas de masas y energías en el proceso de producción arrocerá en la Empresa “Sur del Jíbaro”. Fuente: Contreras, (2013).

<b>Entradas y salidas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>
<b>Etapa Agrícola</b>			
<b>Entrada</b>			
Suelo	h/a	15 282,7	15 282,7
Semilla	t/a	2407	2407
Agua*	L/a	436 038	436 038
Herbidas	t/a	168,04	168,04
Plaguicidas	t/a	12,45	12,45
Fungicidas	t/a	42,41	42,41
Adherentes	t/a	1,18	1,18
<b>Fertilizantes</b>			
Úrea	t/a	338,7	116,10
Fósforo	t/a	338,7	116,10
Potasio	t/a	270,9	270,9
Zinc	t/a	169,35	169,35
Combustible*	L/a	1 574 118,1	1 574 118,1
Lubricantes	t/a	450	450
<b>Salida</b>			
Arroz cáscara húmedo	t/a	112 592	112 592
Resto de cosecha*	t/a	146 360,7	0
<b>Etapa Industrial</b>			
<b>Entrada</b>			
Arroz cáscara húmedo	t/a	112 592	112 592
Combustible	L/a	796 364,3	0
Lubricantes	t/a	150	150
Energía eléctrica	kWh/a	2 769 819,15	2 769 819,15
<b>Salida</b>			
Arroz consumo	t/a	40000	40000
Salvado	t/a	9 570,3	9 570,3
Cabecilla	t/a	1 688,9	1 688,9
Residuo secadero	t/a	4 503,68	4 503,68
Cáscara de arroz	t/a	24 770,24	24 770,24
Energía eléctrica*	kWh/a	0	242 343,95
Energía térmica*	kWh/a	0	360 799,06
Lodo biofertilizante	t/a	0	222,6

\* Valores que se modifican en el estudio.



**Fig. 2.4.** Interacción de todas las entradas (R, N, F), generan una salida (“output”) del sistema Y. Fuente: Tomado de Álvarez *et al.*, 2006.

A continuación se exponen, en este estudio específico, cuales son los flujos definidos y clasificados, según el tipo de fuente (renovables, no renovables e importados), que intervienen en cada en cada alternativa valorada y además se muestran las formulaciones utilizadas para la realización posterior de los cálculos efectivos de los mismos.

#### Alternativa I o actual:

##### ➤ Fuentes renovables

- Energía solar= (área cultivada  $m^2 a^{-1}$ ) (radiación anual  $J m^{-2}$ ) (1-albedo).
- Lluvia (potencial químico)= (área cultivada  $m^2 a^{-1}$ ) (evaporación m) (densidad agua  $g m^{-3}$ ) (energía libre Gibbs  $J g^{-1}$ ).
- Lluvia (geopotencial)= (área cultivada  $m^2 a^{-1}$ ) (escurrimiento m) (densidad agua  $kg m^{-3}$ ) (gravedad  $m s^{-1}$ ).
- Viento (energía cinética en la superficie)= (área cultivada  $m^2 a^{-1}$ ) (viento geostrofico  $m s^{-1}$ )<sup>3</sup> (densidad aire  $kg m^{-3}$ ) (coeficiente Dragg) (323 días/a) (24 h/días) (60 min/h) (60 s/min).
- Agua del rio para riego= (agua usada  $m^3 a^{-1}$ ) (densidad agua  $g m^{-3}$ ) (energía libre Gibbs  $J g^{-1}$ ).
- Energía térmica de la tierra= (área cultivada  $m^2 a^{-1}$ ) (flujo calor  $J m^{-2}$ ).

- Paja de arroz (Fertilizante orgánico)= Este valor se obtiene multiplicando la producción total de paja de arroz dejada en el campo por la composición de esta en cuanto al contenido de nitrógeno, potasio y fósforo, cada uno de estos componentes se divide por el tiempo de degradación (se asumen 2 años). El resultado total es la suma de estos componentes en  $g a^{-1}$ .

➤ **Fuentes no renovables**

- Pérdidas netas de suelo= (área cultivada  $m^2$ ) (Pérdidas de suelo por área  $seJ m^{-2} a^{-1}$ ).

➤ **Fuentes importadas**

- Combustible= (((Diesel consumido preparación de tierras, siembra y etapa industrial,  $L a^{-1}$ ) + (Diesel consumido cosecha  $L a^{-1}$ ) + ((Lubricantes  $t a^{-1}$ ) (conversión lubricante galón  $t^{-1}$ ) (4.5461  $L galón^{-1}$ ))) \* (Contenido de energía del combustible  $J L^{-1}$ ).
- Electricidad = (Electricidad consumida  $kWh a^{-1}$ ) (Contenido de energía  $J kWh^{-1}$ ).
- Urea= Urea usada  $g a^{-1}$ .
- Fósforo= Fósforo usado  $g a^{-1}$ .
- Potasio= Potasio usado  $g a^{-1}$ .
- Pesticidas= (Herbicidas  $g a^{-1}$ )+ (Plaguicidas  $g a^{-1}$ )+ (Fungicidas  $g a^{-1}$ )+ (Adherentes  $g a^{-1}$ ).
- Semillas= Total semillas usadas  $g a^{-1}$ .
- Maquinarias y herramientas= ((Tractores usados)\*(Peso tractor  $g$ ) / (Average de vida  $a$ )) + ((Combinadas usadas)\*(Peso combinada  $g$ ) / (Average de vida  $a$ )).
- Labor= (Costo labor  $CUP a^{-1}$ )\*(Conversión  $CUC/CUP$ )\*(razón de cambio  $USD/CUC$ ).
- Servicios= (Costo servicios  $CUP a^{-1}$ )\*(Conversión  $CUC/CUP$ )\*(razón de cambio  $USD/CUC$ ).

## Alternativa II o de valorización de la paja de arroz:

### ➤ Fuentes renovables

- Energía solar= (área cultivada  $\text{m}^2 \text{a}^{-1}$ )\*(radiación anual  $\text{J m}^{-2}$ )\*(1-albedo).
- Lluvia (potencial químico)= (área cultivada  $\text{m}^2 \text{a}^{-1}$ ) (evaporación  $\text{m}$ ) (densidad agua  $\text{g m}^{-3}$ ) (energía libre Gibbs  $\text{J g}^{-1}$ ).
- Lluvia (geopotencial)= (área cultivada  $\text{m}^2 \text{a}^{-1}$ )\*(escurrimiento  $\text{m}$ ) (densidad agua  $\text{kg m}^{-3}$ )\*(gravedad  $\text{m s}^{-1}$ ).
- Viento (energía cinética en la superficie)= (área cultivada  $\text{m}^2 \text{a}^{-1}$ ) (viento geostrofico  $\text{m s}^{-1}$ )<sup>3</sup> (densidad aire  $\text{kg m}^{-3}$ ) (coeficiente Dragg) (323 días/a) (24 h/días) (60 min/h) (60 s/min).
- Agua del rio para riego= ((agua usada en riego  $\text{m}^3 \text{a}^{-1}$ )) (densidad agua  $\text{g m}^{-3}$ ) (energía libre Gibbs  $\text{J g}^{-1}$ ).
- Energía térmica de la tierra= (área cultivada  $\text{m}^2 \text{a}^{-1}$ ) (flujo calor  $\text{J m}^{-2}$ ).
- Energía térmica producción de biogás= (Fuel dejado de consumir en el secado  $\text{L a}^{-1}$ ) (Contenido de energía  $\text{J L}^{-1}$ ).
- Lodo biofertilizante= (Biofertilizante contenido nitrógeno producido tratamiento anaerobio  $\text{g a}^{-1}$ ) + (Biofertilizante contenido fósforo producido tratamiento anaerobio  $\text{g a}^{-1}$ ).
- Paja de arroz (producir biogás)= (Total arroz residuo cosecha  $\text{g a}^{-1}$ )
- Labor renovable (producción biogás y energía eléctrica)= (Costo labor  $\text{CUP/a}$ ) (Conversión  $\text{CUC/CUP}$ ) (razón de cambio  $\text{USD/CUC}$ ).

### ➤ Fuentes no renovables

- Agua para tratamiento anaerobio= (agua usada  $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ) (365) (densidad agua  $\text{g m}^{-3}$ ) (energía libre Gibbs  $\text{J g}^{-1}$ ).
- Pérdidas netas de suelo= (área cultivada  $\text{m}^2$ ) (Pérdidas de suelo por área  $\text{seJ m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ).

### ➤ Fuentes importadas

- Combustible= (((Diesel consumido preparación de tierras, siembra  $\text{L a}^{-1}$ )+ (Diesel consumido cosecha  $\text{L a}^{-1}$ )+ (Diesel consumido compactación y transportación paja de arroz  $\text{L a}^{-1}$ ) + ((Lubricantes  $\text{t/a}$ ) (conversión lubricante  $\text{galón t}^{-1}$ ) (4.5461  $\text{L galón}^{-1}$ ))) x (Contenido de energía del combustible  $\text{J L}^{-1}$ ).

- Electricidad= (Electricidad consumida kWh a<sup>-1</sup>) (Contenido de energía J kWh<sup>-1</sup>).
- Urea= (Urea usada g a<sup>-1</sup>) – (Biofertilizante contenido nitrógeno producido tratamiento anaerobio g a<sup>-1</sup>) + (Dejada de usar por quitar paja g a<sup>-1</sup>).
- Fósforo= (Fósforo usado g a<sup>-1</sup>) – (Biofertilizante contenido fósforo producido tratamiento anaerobio g a<sup>-1</sup>) + (Dejado de usar por quitar paja g a<sup>-1</sup>).
- Potasio= (Potasio usado g a<sup>-1</sup>) + Dejado de usar por quitar paja g a<sup>-1</sup>.
- Pesticidas= (Herbicidas g a<sup>-1</sup>)+ (Plaguicidas g a<sup>-1</sup>)+ (Fungicidas g a<sup>-1</sup>)+ (Adherentes g a<sup>-1</sup>).
- Semillas= Total semillas usadas g a<sup>-1</sup>.
- Maquinarias y herramientas= ((Tractores usados + Tractores usados transporte paja y compactación) (Peso tractor g)/ (Average de vida a))+ ((Combinadas usadas) (Peso combinada g)/ (Average de vida a)).
- Labor= (Costo labor CUP/a + Costo labor paja de arroz CUP/a) (Conversión CUC/CUP) (razón de cambio USD/CUC).
- Servicios= (Costo servicios CUP/a) (Conversión CUC/CUP) (razón de cambio USD/CUC).

Los datos utilizados para la realización de este estudio fueron obtenidos de las siguientes fuentes:

- ✓ Radiación solar, lluvia, viento: Instituto Nacional de Meteorología.
- ✓ Agua utilizada en el riego: Norma Cubana sobre el tema.
- ✓ Insumos, materiales, energía, etc.: Balance de masas y energías Contreras, (2013).
- ✓ Transformicidades utilizadas: Estudios similares (Lomas *et al* 2007, Odum *et al* 1996, Odum *et al* 2000).
- ✓ Otros (Labor, servicios, maquinaria y herramientas): Entrevista a directivos de la Empresa Agroindustrial “Sur del Jíbaro”.

En este estudio se tuvo en cuenta además otras consideraciones como:

1. Necesidad diaria de agua para digestor: 4,38 m<sup>3</sup>. Indica que para la Alternativa II existe este consumo adicional de agua para poder producir biogás.

2. Se consideró la energía utilizada por 33 combinadas ya que del parque de 42 con que cuenta la empresa solo el 80 % están funcionando.
3. Índice de consumo diesel por cosecha de 9,34 a 13 L t<sup>-1</sup> (García Rivero, 2010). Este índice se utiliza para calcular el valor total de diesel necesario en la compactación y transportación de la paja de arroz hacia el digester.
4. Densidad específica del diesel: 8.32E+05 g m<sup>-3</sup>.
5. Densidad específica del agua: 1.00E+06 g m<sup>-3</sup>.
6. Para realizar el cálculo de materia orgánica suministrada al suelo por la paja de arroz se utiliza la Tabla 2.4, que refleja la composición química del residuo agrícola, según Jiménez, (2015).

**Tabla 2.4.** Composición química de la paja de arroz. Fuente: Jiménez, (2015)

Composición	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (mg kg <sup>-1</sup> )	K (mg kg <sup>-1</sup> )
Paja de arroz	8,96	2,95	1,55

### 2.2.3. Obtención de datos y balances del sistema. Tabla resumen

Se realizó el cálculo efectivo de los flujos de materia y energía que figuran en el diagrama emergético para el período de tiempo investigado, y de la emergencia correspondiente a estos flujos, a partir de las transformicidades y emergías específicas correspondientes (Brown & Ulgiati, 2004).

Los cálculos, tanto de los flujos como de las emergías correspondientes a ellos, se realizan en Microsoft de Excel utilizando las fórmulas descritas en el epígrafe anterior. Anexos 3.1 y 3.2.

Todas las transformicidades utilizadas en este trabajo están referidas a 15.83 E+24 seJ/a (Odum *et al.* 2000). Con el objetivo de evitar el doble conteo de coproductos del sol, se utiliza el criterio de seleccionar dentro de las fuentes renovables el de mayor entrada de flujos de emergencia. Las transformicidades usadas en el trabajo incluyen labor y servicios para producir bienes y servicios.

Esto implica la construcción de una tabla resumen, para cada alternativa estudiada, que se alimenta de los cálculos realizados obtenidos en los Anexos 3.1 y 3.2, con

los principales flujos de energía clasificados, y que consta de una serie de campos, tal y como se presenta en la Tabla 2.2, y se explica a continuación. Fuente: Basado en Brown & Ulgiati (2004b).

**Tabla 2.2.** Principales campos de una tabla de síntesis emergética.

Nota	Item	Unidad	Dato	Transformicidad (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	Valor macroeconómico (em\$/año)
1	Item 1	xx.x	J/año	xxx.x	Em1	Em1/Emr
2	Item 2	xx.x	J/año	xxx.x	Em2	Em2/Emr
3	Item 3	xx.x	g/año	xxx.x	Em3	Em3/Emr
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
n..	Enésimo item	xx.x	g/año	xxx.x	Em enésimo	Em enésimo,Emr
Y	Y-ésimo producto	xx.x	J ó g /año	$\Sigma$ Em		

- ✓ La Columna 1 “nota” se refiere al orden en que están colocados cada uno de los flujos, y la nota a pie de tabla en la que se refiere el origen del dato, y los cálculos realizados para la transformación del mismo a las unidades correspondientes.
- ✓ La Columna 2 es el nombre del “item” o flujo que se evalúa, y que figura, con la simbología correspondiente, en el diagrama de flujos.
- ✓ La Columna 3 se refiere a la cifra proporcionada por los cálculos elaborados para cada flujo, que figuran numerados en una nota al pie de la tabla, en sus unidades correspondientes, que se encuentran en la Columna 4. El cálculo para alguno de los principales flujos de materia y/o energía que se manejan están en las tablas y los anexos de los artículos del capítulo 3.
- ✓ La Columna 5 se refiere a la energía por unidad o factor de equivalencia (transformicidad o energía específica).
- ✓ La Columna 6 es la que contiene la energía, en los equivalentes solares emergéticos (seJ) y es el resultado de multiplicar la columna 3 por la 5.

- ✓ Por último, la Columna 7 se refiere al denominado valor macroeconómico, o cantidad de actividad económica que se mueve debido a un determinado flujo o reserva de emergía. En este estudio no es objetivo por lo que no se realizan los cálculos.
- ✓ Las últimas filas se reservan para los productos del sistema (exportaciones, población, productos monetarios, etc.), y los cálculos relativos a su transformicidad, emergía total, etc. Con esta tabla se tiene, por tanto, una contabilidad de todos los componentes del sistema ambiental analizado (Odum, 1996). Como resultado de este procedimiento se tiene un conjunto de índices y coeficientes adecuados para la formulación de políticas y toma de decisiones ambientales (Brown and Ulgiati, 2004).

Con los valores obtenidos en la tabla resumen, emergía total y los productos que salen del sistema, se realiza el cálculo de la emergía específica y la transformicidad del arroz consumo, utilizando las siguientes fórmulas:

- Emergía específica del arroz consumo= (Emergía total de entrada al sistema seJ) / (Producción total de arroz consumo g). Odum et al 1996.
- Transformicidad de arroz consumo= (Emergía total de entrada al sistema seJ)/ ((Producción total de arroz consumo g) (% de proteínas J g<sup>-1</sup>) + (Producción total de arroz consumo g) (% de grasas J g<sup>-1</sup>) + (Producción total de arroz consumo g) (% de carbohidratos J g<sup>-1</sup>). Odum et al 1996. ( Composición química del arroz en la Tabla 2.4)

Para el cálculo de la transformicidad del arroz consumo se tuvo en cuenta la composición química del arroz consumo (Tabla 2.3) según Navarro, 2008.

**Tabla 2.3.** Composición química del arroz consumo. Fuente: Navarro, (2008).

<b>Composición</b>	<b>g 100g<sup>-1</sup></b>	<b>kJ g<sup>-1</sup></b>
Proteínas	6.6	24
Grasas	0.9	39
Carbohidratos	81.6	17

## 2.2.4. Índices energéticos. Comparación de las alternativas

A partir del análisis energético donde se separan las entradas de fuentes renovables (R) de las no renovables (N) y de las entradas importadas (F) se pudo definir los indicadores energéticos, que proveen las herramientas para la toma de decisiones de sostenibilidad cuando se comparan alternativas, por tanto, sirven de apoyo a la gestión y evaluación de la sostenibilidad del sistema dentro de los criterios del método (Brown *et al.*, 2012; Cao & Feng, 2007).

Se realiza una tabla, con los principales indicadores calculados, comparativa entre las dos alternativas evaluadas. De esta manera se determinó:

- ✓ El **índice de carga ambiental** (ELR, por sus siglas en inglés, Environmental Loading Ratio) según la ecuación 2.1:

$$\text{ELR} = (\text{NR} + \text{F}) / \text{R} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde se consideró que cuando  $\text{ELR} > 10$  hay una alta carga ambiental y cuando  $3 < \text{ELR} < 10$  el impacto es considerado moderado según Cao & Feng, (2007).

- ✓ El **índice de rendimiento energético** (EYR, por sus siglas en inglés Energy Yield Ratio) según la ecuación 2.2

$$\text{EYR} = (\text{R} + \text{NR} + \text{F}) / \text{F} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde se consideró que cuando EYR (Bajos valores) indica un bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil; y cuando EYR (altos valores) indica la fuerte competencia que tiene el producto desarrollado y un alto beneficio económico según Zhou *et al.*, (2010).

Este índice también se utilizó para determinar la eficiencia de uso de los recursos locales que tiene disponible (Castellini *et al.*, 2006) y la capacidad del proceso para explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang *et al.*, 2010), bajo el supuesto teórico de que cuando  $\text{EYR} < 5$  indica que en el proceso se utilizó una gran cantidad de recursos energéticos secundarios, cuando  $\text{EYR} > 5$  indica la utilización de recursos energéticos primarios y cuando  $\text{EYR} < 2$  indican que no hay

contribución significativa de recursos locales y están asociados a procesos casi completamente manufacturados (Brown *et al.*, 2012).

- ✓ El **índice de sostenibilidad** (ESI, por sus siglas en inglés Energy Sustainable Indices): según la ecuación 2.3.

$$ESI = EYR / ELR$$

Ec. 2.3

Donde se consideró que cuando  $ESI < 1$  el proceso no es sostenible a largo plazo, cuando  $1 > ESI < 5$  se presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo, con  $ESI > 5$  el proceso puede ser considerado sostenible a largo plazo.

- ✓ El **índice de emergía por unidad (T)** o transformicidad del producto o servicio final según la ecuación 2.4

$$T = (R+NR+F) / E$$

Ec. 2.4

### **2.2.5. Comparación de la Alternativa I con la producción de arroz de estudios similares**

Se realiza una comparación partiendo del criterio denominado Principio de Máxima Potencia Emergética (Odum & Pinkerton, 1955; Odum, 1983; Odum, 1995; Odum, 1996). La cual propone que en la competición entre procesos auto-organizativos prevalecen las relaciones y diseños que maximizan la potencia emergética. Esto es que el flujo o tasa de adquisición de emergía o potencia emergética por el sistema (tanto a la entrante como a aquella que retroalimenta el sistema por distintas vías), y no a la energía total o suma de las energía adquirida por los distintos componentes del sistema (Cai *et al.* 2004; Hall, 2004), es decir, no se trata de que cuanto más se consume mejor sino de utilizar del mejor modo la energía que alimenta el sistema, no usar la máxima cantidad.

Se conforma una tabla con los principales indicadores emérgéticos de la producción de arroz y se comparan los resultados obtenidos en la Alternativa I con los resultados obtenidos por Lomas, (2009) en un estudio similar que realizó a la producción de arroz en Guadalquivir, España en el 2006.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1 Producción arrocerá en la empresa de granos “Sur del Jibaro”. Caracterización de la empresa**

#### **3.1.1 Descripción general de la empresa**

El CAI Arrocerá “Sur del Jíbaro”, está situado en la parte sur de la provincia de Sancti-Spíritus en el municipio La Sierpe, tiene una extensión de 6 250 caballerías, equivalente a 83 875 hectáreas, de las cuales dedica al cultivo del arroz 27 217 ha, 20 130 ha a la ganadería mayor y menor y 2 050 ha a los cultivos varios, el resto es superficie no agrícola entre ellas canales de riego, viales e instalaciones. Sus producciones fundamentales son el arroz, los productos de la ganadería y las producciones de cultivos varios.

El CAI Arrocerá está conformado por 17 Unidades Empresariales de Base (UEB), de estas unidades, 6 se dedican al beneficio industrial del arroz, 2 a la producción ganadera y el resto de apoyo a la producción. Aunque hay que decir que la ganadería y los cultivos varios se han extendido a la mayoría de las unidades de la empresa.

La empresa cuenta con una plantilla de 3 293 trabajadores, de ellos 1 286 pertenecen a las UBPC, 1 946 al sector estatal y 61 a las Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS).

La extensión de tierra dedicada al cultivo de arroz está ubicada hacia el sur de la provincia de Sancti Spíritus y específicamente al sur del poblado de El Jíbaro. Los principales macizos arroceros están ubicados en tres regiones fundamentales, una está ubicada en el sureste de los poblados de Mapo y Natividad, otra que se extiende desde el poblado de Peralejo hasta El Jíbaro por la parte sur de los mismos, llegando aproximadamente hasta el litoral costero y un tercero ubicado en el suroeste del poblado de Las Nuevas. En cuanto a las unidades industriales la más céntrica dentro del CAI es la UEB Los Españoles que se encuentra ubicada a 4 km al suroeste de El Jíbaro, la cual cuenta con tres plantas de secado de tecnología discontinua con una capacidad total de 368 t diarias de arroz húmedo.

Alrededor de 15 km hacia el sur, o sea del otro lado del macizo que se encuentra entre El Jíbaro y Peralejo, y a solo 4 km hacia el oeste de ese último poblado, se encuentra enclavada la unidad industrial UEB Tamarindo el cual cuenta con dos plantas de secado,

una de tecnología por pases o discontinua, con capacidad de 128 t diarias de arroz húmedo y otra planta de tecnología continua, o sea de un solo pase, con una capacidad de 257 t diarias de arroz húmedo. También cuenta con un molino de arroz capaz de procesar 240 t diarias de arroz cáscara seco.

Los mayores consumos de portadores energéticos están relacionados con los procesos o etapas de cosecha y de procesamiento industrial del arroz. La electricidad y el diesel representaron el 95 % del total de los portadores energéticos durante el período comprendido entre el año 2004 y el 2008 (García-Rivero, 2010). En cuanto a la electricidad el índice de consumo actual es de 40,2 kWh por tonelada de arroz producido, en el área de molinado y de 21,3 kWh por tonelada de arroz seco en el proceso de secado. Además se consumen en el secado entre 12-14 L de diesel por tonelada de arroz seco (García-Rivero, 2010).

La Gestión Energética o Administración de Energía, como subsistema de la gestión empresarial abarca, en particular, las actividades de administración y aseguramiento de la función gerencial que le confieren a la entidad la aptitud para satisfacer eficientemente sus necesidades energéticas (Borrito *et al.*, 2002). O sea que la misma, debe estar encaminada a proveerle a la administración las herramientas de control para que la empresa pueda llevar a cabo su proceso productivo haciendo un uso más racional de los portadores energéticos y con ello mejorar la eficiencia económica y la competitividad de sus producciones en el mercado (García-Rivero, 2010).

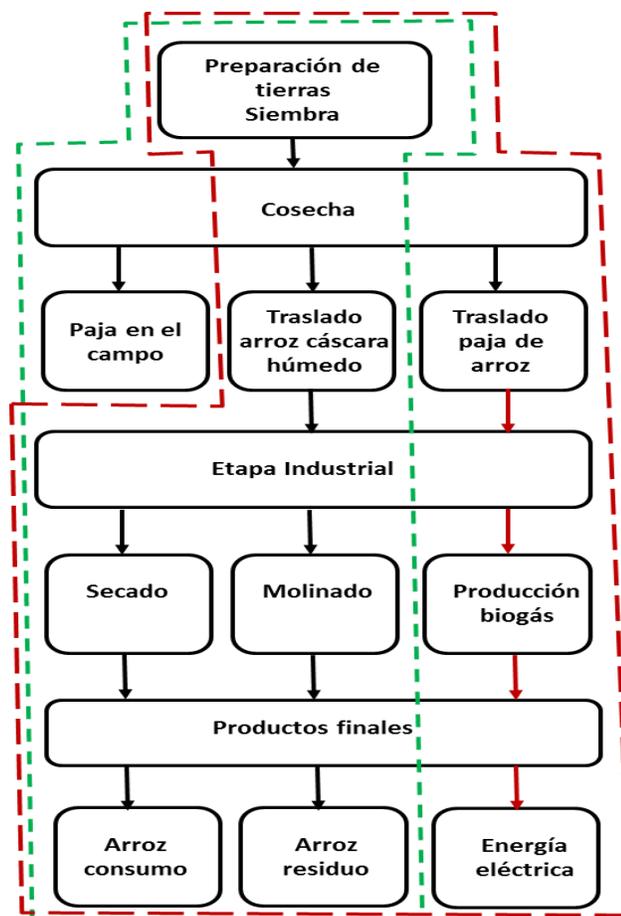
### **3.2. Análisis emergético**

El método emergético fue aplicado a la producción de arroz del CAI arrocero “Sur del Jíbaro” teniendo en cuenta la alternativa actual de disposición de la paja de arroz y la alternativa de valorización de esta mediante un tratamiento anaerobio para producir biogás con fines energéticos. De esta manera se definieron las dos alternativas para la realización del análisis emergético, las cuáles fueron caracterizadas en el capítulo 2.

#### **3.2.1. Definición de fronteras. Límites del ecosistema productivo**

Ambas alternativas, aunque cuentan con las mismas etapas de producción industrial del arroz, se diferencian en las relaciones internas y los productos finales. En la Alternativa I la paja de arroz queda en el campo brindando nutrientes al suelo y se obtiene, como

producto final, arroz consumo y arroz residuo. La Alternativa II tiene como objetivo recoger el residuo de la cosecha (paja) para producir biogás y generar electricidad, la cual constituye, junto al arroz consumo y arroz residuo, una de las salidas del ecosistema productivo. En la figura 3.1 se delimitan las alternativas estudiadas.



**Fig. 3.1.** Límites alternativas estudiadas. Las líneas verdes representan la Alternativa I y las rojas delimitan la Alternativa II.

### 3.2.2. Determinación de flujos y diagramas emergéticos

En la tabla 3.1 se identifican los flujos de masas, energías y monetarios que entran y salen del ecosistema productivo para cada alternativa.

En la Alternativa I como entradas renovables (**R**) están consideradas la energía solar, lluvia (potencial químico y geopotencial), viento (energía cinética en la superficie), agua del río (potencial químico), energía térmica de la tierra y paja de arroz dejada en el campo. Como recursos locales no renovables (**N**) solo se considera las pérdidas netas de suelo.

Finalmente los recursos importados (**F**) están asociados a los combustibles necesarios para la preparación de las tierras, siembras, cosecha, transportación de arroz cáscara húmedo y secado; electricidad en el molino de arroz, fertilizantes, pesticidas, semillas, maquinarias, labor y servicios.

En la Alternativa II se consideran entradas renovables (**R**) la energía solar, lluvia (potencial químico y geopotencial), viento (energía cinética en la superficie), agua del río (potencial químico), energía térmica de la tierra y las asociadas con la producción de biogás, como energía térmica, labor, lodos biofertilizantes y paja de arroz. Como recursos locales no renovables (**N**) solo se considera las pérdidas netas de suelo y el agua utilizada para el tratamiento anaerobio. Los recursos importados (**F**) están asociados a los combustibles necesarios para la preparación de las tierras, siembras, cosecha, transportación de arroz cáscara húmedo, compactación y transportación de la paja; electricidad en el molino de arroz, fertilizantes, pesticidas, semillas, maquinarias, labor y servicios.

Estos flujos se clasifican en flujos renovables del ecosistema productivo que intervienen en la obtención de los productos, los no renovables y los importados. Las principales entradas de naturaleza biogeofísicas al ecosistema productivo de estudio son idénticas para las dos alternativas, siendo las de mayor valor la energía solar y la lluvia (potencial químico),  $2,40E+15 \text{ J a}^{-1}$  y  $1,58E+15 \text{ J a}^{-1}$  respectivamente. La paja de arroz, para la Alternativa I, sirve como fuente de nutrientes al suelo y es considerada un recurso renovable que aporta al ecosistema productivo y en la Alternativa II se utiliza para producir biogás y generar electricidad, considerando el biofertilizante resultante del proceso de digestión anaerobia como un flujo renovable que aporta al ecosistema productivo.

**Tabla 3.1**Flujos de entradas y salidas de las alternativas.

			<b>Alternativa I</b>	<b>Alternativa II</b>
		Unidad	(unidad/año)	(unidad/año)
Entradas	Energía Solar	J	2,40E+15	2,40E+15
	Lluvia (energía potencial química)	J	1,58E+15	1,58E+15
	Lluvia (energía geopotencial)	J	1,26E+11	1,26E+11
	Viento (energía cinética en la superficie)	J	2,08E+13	2,08E+13
	Agua del río (potencial químico)	J	1,27E+15	1,27E+15
	Ciclo terrestre (energía térmica)	J	2,94E+14	2,94E+14
	Energía térmica de planta de biogás	J		2,31E+13
	Lodo biofertilizante de planta de biogás	g		4,46E+08
	Labor			1,37E+04
	Paja de arroz	g	7,44E+10	7,44E+10
	Agua tratamiento anaerobio	J		7,90E+11
	Area cultivada	m2	1,53E+08	1,53E+08
	Fuel (diesel, gasolina)	J	1,34E+14	2,20E+14
	Electricidad SEN	J	9,97E+12	9,97E+12
	Urea	g	3,39E+08	8,33E+08
	Fósforo	g	3,39E+08	1,16E+08
	Potasio	g	2,70E+08	2,71E+08
	Pesticidas	g	2,24E+08	2,24E+08
	Semillas	g	2,40E+09	2,40E+09
	Maquinarias y herramientas	g	1,18E+08	1,59E+08
Labor	USD\$	2,71E+06	2,90E+06	
Servicios	USD\$	7,30E+05	1,23E+06	
Salidas	Arroz consumo (con servicios)	g	4,00E+10	4,00E+10
	Electricidad generada planta de biogás	J		1,73E+14
	Arroz residuo	g	4,05E+10	4,05E+10

La energía térmica, producción de lodos y labor están asociadas con la planta de biogás y por ende solamente inciden en la segunda alternativa. La energía térmica se utiliza para el proceso de secado del arroz, sustituyendo el total de diesel utilizado para este proceso industrial, los lodos producidos se usan como fertilizantes para el suelo.

Las pérdidas de suelo y materia orgánica es una fuente local no renovable utilizada en el ecosistema productivo y para ambas alternativas tiene el mismo valor ya que no varía el área sembrada, 1,53E+8 m<sup>2</sup>. En la Alternativa II se utiliza otra fuente local no renovable, agua para el tratamiento anaerobio, con valor de 7,20E+11 J.

En las entradas de naturaleza económica y humana (importados) el valor más elevado para ambas alternativas lo constituye el diesel, aumentando desde  $1,34E+14 \text{ J a}^{-1}$ , Alternativa I, a  $2,20E+14 \text{ J a}^{-1}$ , Alternativa II, debido a la compactación y transportación de toda la paja de arroz hacia el biodigestor y el regreso de lodos como biofertilizante hacia el campo, se consumen  $2,95E+6 \text{ L}$  más al año por este concepto. Aumentan los consumos de fertilizantes ya que el campo deja de recibir, por la degradación de la paja,  $7,17E+8 \text{ g}$  de contenido de nitrógeno,  $2,36E+5 \text{ g}$  de fósforo y  $9,76E+5 \text{ g}$  de potasio, teniendo que suministrárselo con fertilizantes inorgánicos. También aumenta el uso de maquinarias y labor.

En la Alternativa I se obtienen como productos finales arroz consumo y residuos arroceros, mientras que en la segunda se obtiene además energía eléctrica con un valor de  $1,73E+14 \text{ J}$  anuales.

Las figura 3.2 y 3.3 representan los diagramas de flujos de emergía de cada alternativa estudiada. En ellas están plasmadas todas las interacciones entre la totalidad de fuentes tanto externas como internas que intervienen en el ecosistema productivo así como sus productos finales.

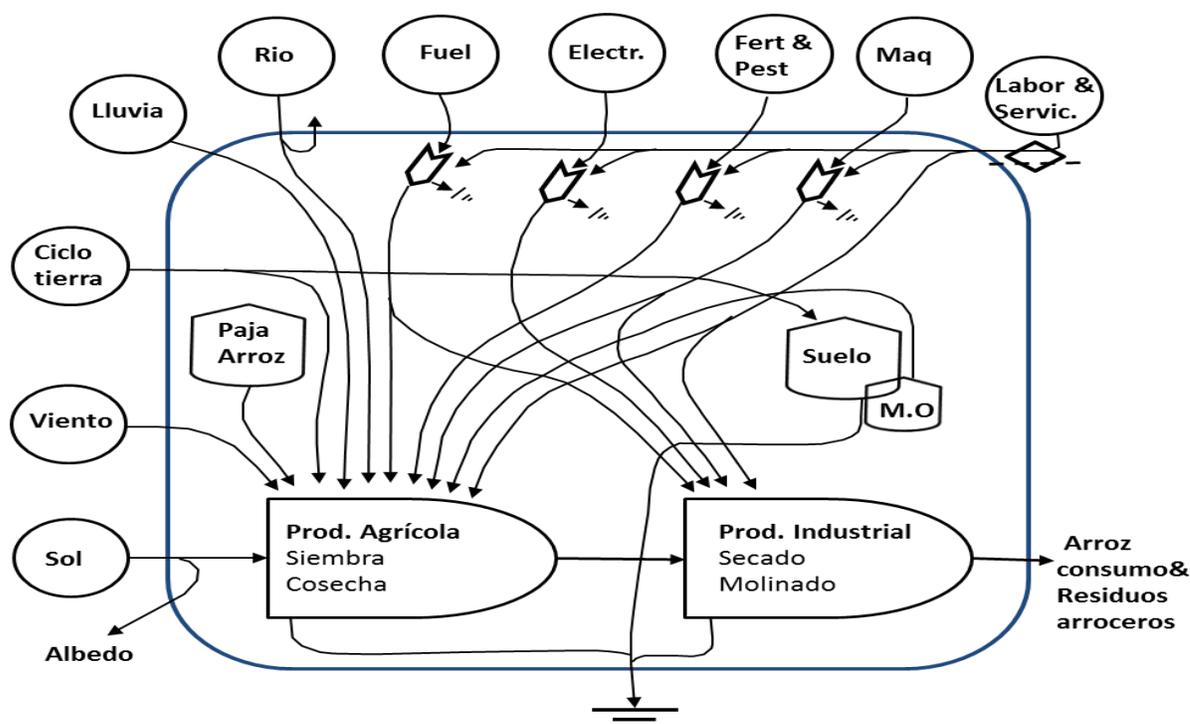


Fig. 3.2. Diagrama de emergía Alternativa I.

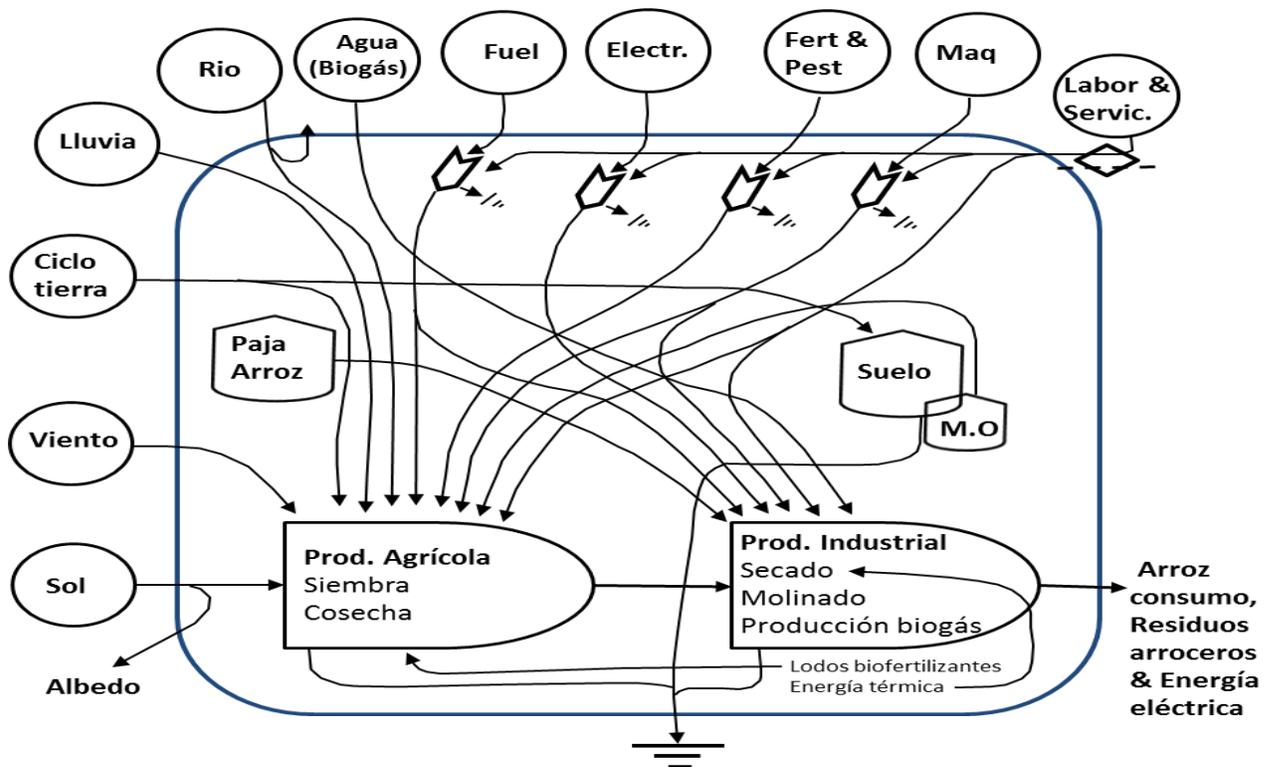


Fig. 3.3. Diagrama de energía Alternativa II.

### 3.2.3. Obtención de datos y balances del ecosistema productivo

La principal fuente de datos utilizados para la realización del presente estudio fue el balance de masas y energías de Contreras, (2013). En el anexo 2.1 se muestra una tabla resumen de las modificaciones efectuadas a dicho balance por ajustes en correspondencia a normas estudiadas por el autor y a la consideración de flujos no valorados por Contreras, (2013), (agua utilizada en el riego, combustible para transportación de arroz cáscara húmedo, paja de arroz producida, energía eléctrica y térmica generada).

A continuación se describen a detalle los cálculos realizados para cada alternativa para determinar los flujos de energía.

#### ➤ Cálculos efectivos Alternativa I.

##### FUENTES RENOVABLES

##### 1. ENERGÍA SOLAR.

- Área cultivada=  $1,53e+04 \text{ h a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Conversión=  $1,00E+04 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$

- Radiación=  $1,78E+07 \text{ J m}^{-2}$  (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Albedo para arroz= 0,12 (Rapport *et al.*, 2002)

$$\text{Energía solar} = (1,53e+04 \text{ h a}^{-1}) \times (1,00E+04 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}) \times (1,78E+07 \text{ J m}^{-2}) \times (1-0,12) \\ = 2,40E+15 \text{ J a}^{-1}$$

Transformicidad=1,00 por definición (Odum, 1996 Actualizado)

## 2. LLUVIA (POTENCIAL QUÍMICO)

- Área cultivada=  $1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Precipitación= 1,4 m (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Evaporación= 2,09 m (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Energía libre Gibbs=  $4,94 \text{ J g}^{-1}$
- Densidad agua=  $1,00E+06 \text{ g m}^{-3}$

$$\text{Lluvia (Energía potencial química)} = (1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (2,09 \text{ m}) \times (4,94 \text{ J g}^{-1}) \times (1,00E+06 \\ \text{ g m}^{-3}) = 1,58E+15 \text{ J a}^{-1}$$

Transformicidad=  $3,06E+04 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

## 3. LLUVIA (GEOPOTENCIAL)

- Área cultivada=  $1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Precipitación= 1,4 m (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Escurrimiento= 0,34 m (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Promedio Elevación= 0,25 m
- Densidad agua=  $1,00E+06 \text{ g m}^{-3}$
- Gravedad=  $9,8 \text{ m s}^{-2}$

$$\text{Lluvia (Geopotencial)} = (1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (0,34 \text{ m}) \times (0,25 \text{ m}) \times (1,00E+06 \text{ g m}^{-3}) \times (9,8 \text{ m} \\ \text{ s}^{-2}) = 1,26E+11 \text{ J a}^{-1}$$

Transformicidad=  $1,76E+04 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

## 4. VIENTO (ENERGÍA CINÉTICA EN LA SUPERFICIE)

- Área cultivada=  $1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Promedio velocidad=  $1,83 \text{ m s}^{-1}$  (Instituto de Meteorología de Cuba)
- Viento geostrófico (60% de 1.83)=  $1,10 \text{ m s}^{-1}$  (Reiter, 1969)
- Coeficiente Dragg=  $3,00E-03$  (Garratt, 1977)

- Densidad del aire= 1,23 kg m<sup>-3</sup>
- Días calma= 42 días (Instituto de Meteorología de Cuba)

Viento (Energía cinética en la superficie)=  $(1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (1,10 \text{ m s}^{-1})^3 \times (3,00E-03) \times (1,23 \text{ kg m}^{-3}) \times (365 \text{ días a}^{-1} - 42 \text{ días a}^{-1}) \times (24 \text{ h/días}) \times (60 \text{ min/h}) \times (60 \text{ s/min}) = 2,08E+13 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad= 1,58E+03 seJ J<sup>-1</sup> (Datos NEAD, Cuba)

## 5. AGUA DEL RIO PARA RIEGO

- Área cultivada= 1,53e+08 m<sup>2</sup> a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)
- Agua usada= 1,68E+00 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> (Normas de Cuba)
- Energía libre Gibbs= 4,94 J g<sup>-1</sup>
- Densidad agua= 1,00E+06 g m<sup>-3</sup>

Agua del rio para riego=  $(1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (1,68E+00 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}) \times (4,94 \text{ J g}^{-1}) \times (1,00E+06 \text{ g m}^{-3}) = 1,27E+15 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad= 8,10E+04 seJ J<sup>-1</sup> (Odum, 1996 Actualizado)

## 6. ENERGÍA TÉRMICA DE LA TIERRA

- Área cultivada= 1,53e+08 m<sup>2</sup> a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)
- Flujo de calor= 1,92E+06 J m<sup>-2</sup> (Fernández *et al.*, 1998)

Energía térmica de la tierra=  $(1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (1,92E+06 \text{ J m}^{-2}) = 2,94E+14 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad= 2,03E+04 seJ J<sup>-1</sup> (Datos NEAD, Cuba)

## 7. PAJA DE ARROZ (NUTRIENTES)

- Área cultivada= 1,53e+08 m<sup>2</sup> a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)
- Paja de arroz por área= 4,86 t m<sup>-2</sup> (García Rivero, 2010)
- Composición paja de arroz= 8,96E+03 g t<sup>-1</sup> (Nitrógeno); 2,95 g t<sup>-1</sup> (Fósforo); 12,2 g t<sup>-1</sup> (Potasio) (Jiménez., 2015)

Paja de arroz (Nutrientes)=  $((((1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (4,86 \text{ t m}^{-2}) \times (8,96E+03 \text{ g t}^{-1}))/2) + (((1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (4,86 \text{ t m}^{-2}) \times (2,95 \text{ g t}^{-1}))/2) + (((1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}) \times (4,86 \text{ t m}^{-2}) \times (12,2 \text{ g t}^{-1}))/2)$ . (Se asumen 2 años como tiempo de descomposición de la paja de arroz)

Energía específica paja de arroz (Nutrientes)= 2,86E+07 seJ g<sup>-1</sup> (Cálculo del estudio)

## FUENTES NO RENOVABLES

### 8. PÉRDIDAS NETAS DE SUELO

- Área cultivada=  $1,53e+08 \text{ m}^2 \text{ a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Pérdidas de suelo por área=  $2,50e+10 \text{ seJ m}^{-2}$  (Datos NEAD, Cuba)

## FUENTES IMPORTADAS

### 9. FUEL

- Diesel consumido preparación de tierras y siembra=  $2,37E+06 \text{ L a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Diesel consumido cosecha=  $1,46E+06 \text{ L a}^{-1}$  (Departamento Energético CAI. 2015)
- Lubricantes=  $7,91E+05 \text{ L a}^{-1}$  (Según la Empresa Cubalub de Cabaiguán, cada tonelada de aceite contiene  $1,32E+03 \text{ L}$ )
- Contenido de energía=  $2,90E+07 \text{ J L}^{-1}$

Total usado=  $((2,37E+06 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) + ((1,46E+06 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) + ((7,91E+05 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) = 1,34E+14 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad=  $1,14E+05 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

### 10. ELECTRICIDAD

- Electricidad consumida=  $2,77E+06 \text{ kWh}$  (Contreras., 2013)
- Contenido de energía=  $3,60E+06 \text{ J kWh}^{-1}$

Total usada=  $(2,77E+06 \text{ kWh}) \times (3,60E+06 \text{ J kWh}^{-1}) = 9,97E+12 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad=  $2,90E+05 \text{ seJ J}^{-1}$  (Datos NEAD, Cuba)

### 11. UREA (CONTENIDO NITRÓGENO)

Total usada=  $3,39E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Energía específica=  $6,37E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

### 12. FÓSFORO (CONTENIDO $\text{P}_2 \text{O}_5$ )

Total usado=  $3,39E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Energía específica=  $6,54E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

### 13. POTASIO (CONTENIDO K<sub>2</sub>O)

Total usado= 2,70E+08 g a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)

Energía específica= 1,84E+09 seJ g<sup>-1</sup> (Odum, 1996 Actualizado)

### 14. PESTICIDAS

Total usado= 2,24E+08 g a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)

Energía específica= 1,48E+10 seJ g<sup>-1</sup> (Odum, 1996 Actualizado)

### 15. SEMILLAS

Total usada= 2,40E+09 g a<sup>-1</sup> (Contreras., 2013)

Energía específica= 6,80E+04 seJ g<sup>-1</sup> (Odum, 1996 Actualizado)

### 16. MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS

- Tractores: 178 unidades (Cálculo del estudio), 4,32E+06 g de peso, 10 años de promedio de vida (Campos y Naredo, 1980); Combinadas: 33 unidades, 7,50E+06 g de peso, 5 años de promedio de vida (Campos y Naredo, 1980).

Total usado= 1,18E+08 g a<sup>-1</sup>

Transformicidad= 1,13E+10 seJ J<sup>-1</sup> (Odum, 1996 Actualizado)

### 17. MANO DE OBRA

- Costo de mano de obra= 5,95E+07 CUP a<sup>-1</sup> (Recursos Humanos CAI arrocero, 2015)
- Razón de cambio= 4,56E-02 USD CUP<sup>-1</sup> (Banco Central de Cuba)

Costo mano de obra= 2,71E+06 USD a<sup>-1</sup>

Transformicidad= 2,70E+12 seJ USD<sup>-1</sup> (Datos NEAD, Cuba)

### 18. SERVICIOS

- Costo de servicio= 1,60E+07 CUP a<sup>-1</sup> (Recursos Humanos CAI arrocero, 2015)
- Razón de cambio= 4,56E-02 USD CUP<sup>-1</sup> (Banco Central de Cuba)

Costo mano de obra= 7,30E+05 USD a<sup>-1</sup>

Transformicidad= 2,70E+12 seJ USD<sup>-1</sup> (Datos NEAD, Cuba)

## SALIDAS

### 1. ARROZ CONSUMO (CON SERVICIOS)

Energía total=  $1,46E+20$  seJ  $a^{-1}$

Total producto (peso seco)=  $4,00E+10$  g  $a^{-1}$  (Contreras., 2013)

a) Total producto (energía)=  $6,32E+14$  J  $a^{-1}$  (Cálculo del estudio)

b) Energía específica=  $3,64E+09$  seJ  $g^{-1}$  (Cálculo del estudio)

c) Transformicidad=  $2,31E+05$  seJ  $J^{-1}$  (Cálculo del estudio)

a) Total producto (Energía)=  $((4,00E+10$  g  $a^{-1}) \times (0,066$  g de proteínas  $g^{-1}$  de arroz)  $\times$   $(2,40E+04$  J  $g^{-1})) + ((4,00E+10$  g  $a^{-1}) \times (0,009$  g de grasa  $g^{-1}$  de arroz)  $\times$   $(3,90E+04$  J  $g^{-1})) + ((4,00E+10$  g  $a^{-1}) \times (0,816$  g de carbohidratos  $g^{-1}$  de arroz)  $\times$   $(1,70E+04$  J  $g^{-1}))$

b) Energía específica=  $(1,46E+20$  seJ  $a^{-1}) / (4,00E+10$  g  $a^{-1})$

c) Transformicidad=  $(1,46E+20$  seJ  $a^{-1}) / (6,32E+14$  J  $a^{-1})$

### 2. ARROZ RESIDUO

Energía total=  $1,46E+20$  seJ  $a^{-1}$

Total residuo=  $4,05E+10$  g  $a^{-1}$

d) Energía específica=  $3,60E+09$  seJ  $g^{-1}$

d) Energía específica=  $(1,46E+20$  seJ  $a^{-1}) / (4,05E+10$  g  $a^{-1})$

En el cálculo realizado a los residuos no se tiene en cuenta el residuo de la cosecha (paja de arroz) ya que esta se usa como abono al suelo. Solamente se suman los demás residuos obtenidos.

Finalmente los resultados obtenidos de los cálculos realizados para la Alternativa I están reflejados en las tablas resumen 3.2.

**Tabla 3.2** Cálculos de flujos de energía Alternativa I.

	Unidad	Datos (unidad/año)	UEV (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)	
<b>a) Entradas renovables</b>					
1	Energía Solar	J	2,40E+15	1	2,40E+15
2	Lluvia (energía potencial química)	J	1,58E+15	3,06E+04	4,83E+19
3	Lluvia (energía geopotencial)	J	1,26E+11	1,76E+04	2,22E+15
4	Viento (energía cinética en la superficie)	J	2,08E+13	1,58E+03	3,28E+16
5	Agua del río (potencial químico)	J	1,27E+15	8,10E+04	1,03E+20
6	Ciclo terrestre (energía térmica)	J	2,94E+14	2,03E+04	5,96E+18
7	Paja de arroz (nutrientes al suelo)	g	8,00E+10		2,12E+18
<b>b) Fuentes locales no renovables</b>					
8	Pérdidas netas de suelo	J			3,83E+18
<b>c) Bienes comprados</b>					
9	Fuel (diesel, gasolina)	J	1,34E+14	1,14E+05	1,53E+19
10	Electricidad SEN	J	9,97E+12	2,90E+05	2,89E+18
11	Urea	g	3,39E+08	6,37E+09	2,16E+18
12	Fósforo	g	3,39E+08	6,54E+09	2,22E+18
13	Potasio	g	2,70E+08	1,84E+09	4,97E+17
14	Pesticidas	g	2,24E+08	1,48E+10	3,32E+18
15	Semillas	g	2,40E+09	6,80E+04	1,63E+14
16	Maquinarias y herramientas	g	1,18E+08	1,13E+10	1,34E+18
<b>d) Servicios y labor</b>					
17	Labor	USD\$	2,71E+06	2,70E+12	7,33E+18
18	Servicios	USD\$	7,30E+05	2,70E+12	1,97E+18
<b>e) Salidas</b>					
Y1	Arroz consumo (con servicios)	g	4,00E+10	3,64E+09	1,46E+20
Y2	Arroz residuo	g	4,05E+10	3,60E+09	1,46E+20
<hr/>					
	Total producto (peso seco)	g	4,00E+10		
	Total producto (energía)	J	6,32E+14		
	<b>Energía por unidad</b>	seJ/g	<b>3,64E+09</b>		
	<b>Transformicidad</b>	seJ/J	<b>2,31E+05</b>		
		R	N	F	Y
		1,05E+20	3,83E+18	3,70E+19	1,46E+20

## ➤ Cálculos efectivos Alternativa II.

### FUENTES RENOVABLES

1. ENERGÍA SOLAR. (Idem Alternativa I)
2. LLUVIA (POTENCIAL QUÍMICO). (Idem Alternativa I)
3. LLUVIA (GEOPOTENCIAL). (Idem Alternativa I)
4. VIENTO (ENERGÍA CINÉTICA EN LA SUPERFICIE). (Idem Alternativa I)
5. AGUA DEL RIO PARA RIEGO. (Idem Alternativa I)
6. ENERGÍA TÉRMICA DE LA TIERRA. (Idem Alternativa I)
7. ENERGÍA TÉRMICA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

- Fuel dejado de consumir=  $7,96E+05 \text{ L a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Contenido de energía=  $2,90E+07 \text{ J L}^{-1}$

Total usado=  $(7,96E+05 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1}) = 2,31E+13 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad=  $1,14E+05 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

En la literatura consultada y estudiada no se encontró ningún valor de transformicidad sobre este tipo de flujo, ya que no es objetivo del estudio, se realiza el cálculo sobre la base de que la energía térmica producida va a eliminar el diesel consumido en la parte de secado de arroz, por lo tanto va a cumplir con la misma función.

8. LODO BIOFERTILIZANTE

- Lodo (Contenido nitrógeno)=  $2,23E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Lodo (Contenido  $\text{P}_2 \text{O}_5$ )=  $2,23E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Total producido=  $4,46E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Energía específica=  $6,46E+09 \text{ seJ g}^{-1}$

9. PAJA DE ARROZ (PRODUCCIÓN DE BIOGÁS)

- Total producida=  $7,44E+10 \text{ g a}^{-1}$  (García Rivero., 2010)
- Energía específica=  $1,66E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Cálculo del estudio)
- Total producido (lodo)=  $4,46E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Energía específica=  $6,46E+09 \text{ seJ g}^{-1}$

La emergía total anual en esta entrada se calcula como la resta entre la emergía total producida por la paja de arroz (producir biogás) y la emergía total anual del lodo biofertilizante, ya que con el mismo flujo de entrada obtenemos dos productos diferentes.

#### 10. MANO DE OBRA

- Costo de mano de obra=  $3,00E+05$  CUP  $a^{-1}$  (C culo del estudio, se asumen 20 trabajadores en la planta de tratamiento anaerobio y en la planta de generación eléctrica)
- Razón de cambio=  $4,56E-02$  USD CUP $^{-1}$  (Banco Central de Cuba)

Costo mano de obra=  $1,37E+04$  USD  $a^{-1}$

Transformicidad=  $2,70E+12$  seJ USD $^{-1}$  (Datos NEAD, Cuba)

#### FUENTES NO RENOVABLES

#### 11. AGUA (TRATAMIENTO ANAEROBIO)

- Agua producir biog s=  $4,38E+02$  m $^3$  d $^{-1}$  (Modificado de Contreras., 2013)
- Energía libre Gibbs=  $4,94$  J g $^{-1}$
- Densidad agua=  $1,00E+06$  g m $^{-3}$

Agua (Tratamiento anaerobio)=  $(4,38E+02$  m $^3$  d $^{-1}) \times (365$  d)  $\times (4,94$  J g $^{-1}) \times (1,00E+06$  g m $^{-3})$

Transformicidad=  $8,10E+04$  seJ J $^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 12. PÉRDIDAS NETAS DE SUELO

-  rea cultivada=  $1,53e+08$  m $^2$   $a^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Pérdidas de suelo por  rea=  $2,50e+10$  seJ m $^{-2}$  (Datos NEAD, Cuba)

#### FUENTES IMPORTADAS

#### 13. FUEL

- Diesel consumido preparación de tierras y siembra=  $2,37E+06$  L  $a^{-1}$  (Contreras., 2013)

- Diesel consumido cosecha=  $1,46E+06 \text{ L a}^{-1}$  (Departamento Energético CAI. 2015)
- Diesel consumido compactación y transportación paja de arroz=  $2,95E+06 \text{ L a}^{-1}$  (Cálculo del estudio)
- Lubricantes=  $7,91E+05 \text{ L a}^{-1}$  (Según la Empresa Cubalub de Cabaiguán, cada tonelada de aceite contiene  $1,32E+03 \text{ L}$ )
- Contenido de energía=  $2,90E+07 \text{ J L}^{-1}$

Total usado=  $((2,37E+06 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) + ((1,46E+06 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) + ((2,95E+06 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) + ((7,91E+05 \text{ L a}^{-1}) \times (2,90E+07 \text{ J L}^{-1})) = 2,20E+14 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad=  $1,14E+05 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 14. ELECTRICIDAD

- Electricidad consumida=  $2,77E+06 \text{ kWh}$  (Contreras., 2013)
- Contenido de energía=  $3,60E+06 \text{ J kWh}^{-1}$

Total usada=  $(2,77E+06 \text{ kWh}) \times (3,60E+06 \text{ J kWh}^{-1}) = 9,97E+12 \text{ J a}^{-1}$

Transformicidad=  $2,90E+05 \text{ seJ J}^{-1}$  (Datos NEAD, Cuba)

#### 15. UREA (CONTENIDO NITRÓGENO)

- Usada=  $1,16E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Retirada de la paja=  $6,66E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Cálculo del estudio)

Total usada=  $(1,16E+08 \text{ g a}^{-1}) + (6,66E+08 \text{ g a}^{-1}) = 7,82E+08 \text{ g a}^{-1}$

Energía específica=  $6,37E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 16. FÓSFORO (CONTENIDO $\text{P}_2 \text{O}_5$ )

- Usado=  $1,16E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Retirada de la paja=  $9,07E+05 \text{ g a}^{-1}$  (Cálculo del estudio)

Total usada=  $(1,16E+08 \text{ g a}^{-1}) + (9,07E+05 \text{ g a}^{-1}) = 1,16E+08 \text{ g a}^{-1}$

Energía específica=  $6,54E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 17. POTASIO (CONTENIDO $\text{K}_2 \text{O}$ )

- Usado=  $2,70E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)
- Retirada de la paja=  $2,19E+05 \text{ g a}^{-1}$  (Cálculo del estudio)

Total usada=  $(2,70E+08 \text{ g a}^{-1}) + (2,19E+05 \text{ g a}^{-1})= 2,71E+08 \text{ g a}^{-1}$

Energía específica=  $1,84E+09 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 18. PESTICIDAS

Total usado=  $2,24E+08 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Energía específica=  $1,48E+10 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 19. SEMILLAS

Total usada=  $2,40E+09 \text{ g a}^{-1}$  (Contreras., 2013)

Energía específica=  $6,80E+04 \text{ seJ g}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 20. MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS

- Tractores: 273 unidades (Cálculo del estudio),  $4,32E+06 \text{ g}$  de peso, 10 años de promedio de vida (Campos y Naredo, 1980); Combinadas: 33 unidades,  $7,50E+06 \text{ g}$  de peso, 5 años de promedio de vida (Campos y Naredo, 1980).

Total usado=  $1,59E+08 \text{ g a}^{-1}$

Transformicidad=  $1,13E+10 \text{ seJ J}^{-1}$  (Odum, 1996 Actualizado)

#### 21. MANO DE OBRA

- Costo de mano de obra=  $6,35E+07 \text{ CUP a}^{-1}$  (Recursos Humanos CAI arrocero, 2015)
- Razón de cambio=  $4,56E-02 \text{ USD CUP}^{-1}$  (Banco Central de Cuba)

Costo mano de obra=  $2,90E+06 \text{ USD a}^{-1}$

Transformicidad=  $2,70E+12 \text{ seJ USD}^{-1}$  (Datos NEAD, Cuba)

#### 22. SERVICIOS

- Costo de servicio=  $1,60E+07 \text{ CUP a}^{-1}$  (Recursos Humanos CAI arrocero, 2015)
- Razón de cambio=  $4,56E-02 \text{ USD CUP}^{-1}$  (Banco Central de Cuba)

Costo mano de obra=  $7,30E+05 \text{ USD a}^{-1}$

Transformicidad=  $2,70E+12 \text{ seJ USD}^{-1}$  (Datos NEAD, Cuba)

De manera similar los resultados obtenidos de los cálculos realizados para la Alternativa II están reflejados en las tablas resumen 3.3.

**Tabla 3.3** Cálculos de flujos de energía Alternativa II

	Unidad	Datos (unidad/año)	UEV (seJ/unidad)	Energía solar (seJ/año)
<b>a) Entradas renovables</b>				
1	Energía Solar	J	2,40E+15	2,40E+15
2	Lluvia (energía potencial química)	J	1,58E+15	4,83E+19
3	Lluvia (energía geopotencial)	J	1,26E+11	2,22E+15
4	Viento (energía cinética en la superficie)	J	2,08E+13	3,28E+16
5	Agua del río (potencial químico)	J	1,27E+15	1,03E+20
6	Ciclo terrestre (energía térmica)	J	2,94E+14	5,96E+18
7	Energía térmica de planta de biogás	J	2,31E+13	2,63E+18
8	Lodo biofertilizante de planta de biogás	g	4,46E+08	<b>2,88E+18</b>
9	Paja de arroz para producir biogás	g	7,44E+10	1,18E+20
10	Labor	\$	1,37E+04	<b>3,69E+16</b>
<b>b) Fuentes locales no renovables</b>				
11	Agua para tratamiento anaerobio	J	7,90E+11	<b>6,40E+16</b>
12	Pérdidas netas de suelo			3,83E+18
<b>c) Bienes comprados</b>				
13	Fuel (diesel, gasolina)	J	2,20E+14	2,50E+19
14	Electricidad SEN	J	9,97E+12	2,89E+18
15	Urea	g	7,82E+08	4,98E+18
16	Fósforo	g	1,16E+08	7,60E+17
17	Potasio	g	2,71E+08	4,98E+17
18	Pesticidas	g	2,24E+08	3,32E+18
19	Semillas	g	2,40E+09	1,63E+14
20	Maquinarias y herramientas	g	1,59E+08	1,80E+18
<b>d) Servicios y labor</b>				
21	Labor	USD\$	2,90E+06	7,82E+18
22	Servicios	USD\$	1,23E+06	3,32E+18
<b>e) Salidas</b>				
Y1	Arroz consumo (con servicios)	g	4,00E+10	2,81E+20
Y2	Electricidad generada planta de biogás	J	1,73E+14	<b>1,62E+06</b>
Y3	Arroz residuo	g	4,05E+10	2,81E+20
	R	N	F	Y
	2,27E+20	3,89E+18	5,04E+19	2,81E+20

Si se analiza de forma comparativa los flujos de energía determinados para cada alternativa se puede concluir que en cuanto a **Fuentes no renovables (N)**: la pérdida de suelo y materia orgánica fueron similares para las dos alternativas estudiadas,  $3,83E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ , sin embargo en la Alternativa II (o de valorización de la paja de arroz) se utiliza otra fuente local no renovable, agua para el tratamiento anaerobio y alimentación del digestor, con una energía anual de  $6,40E+16 \text{ seJ a}^{-1}$  (Fig. 3.2).

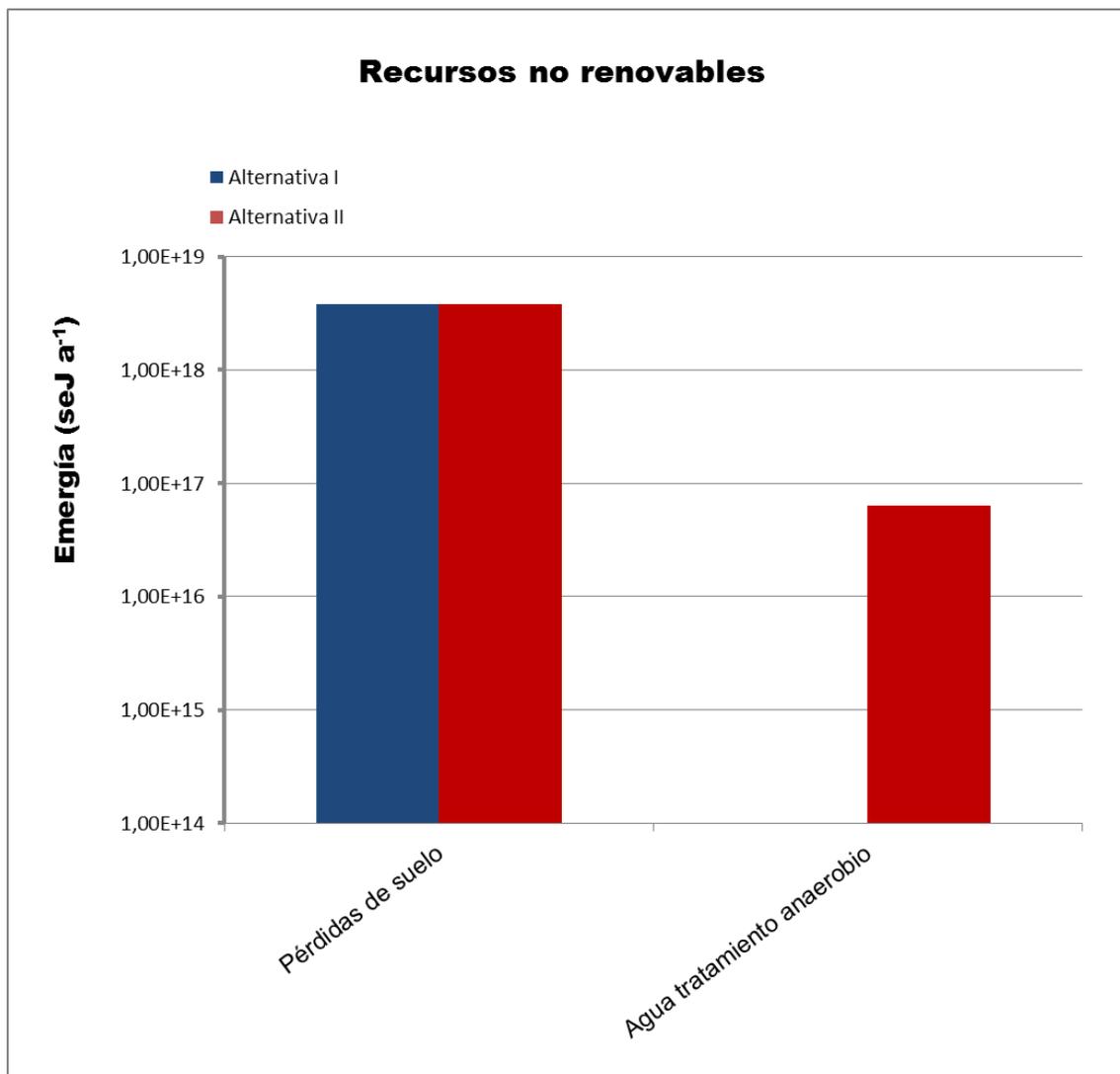
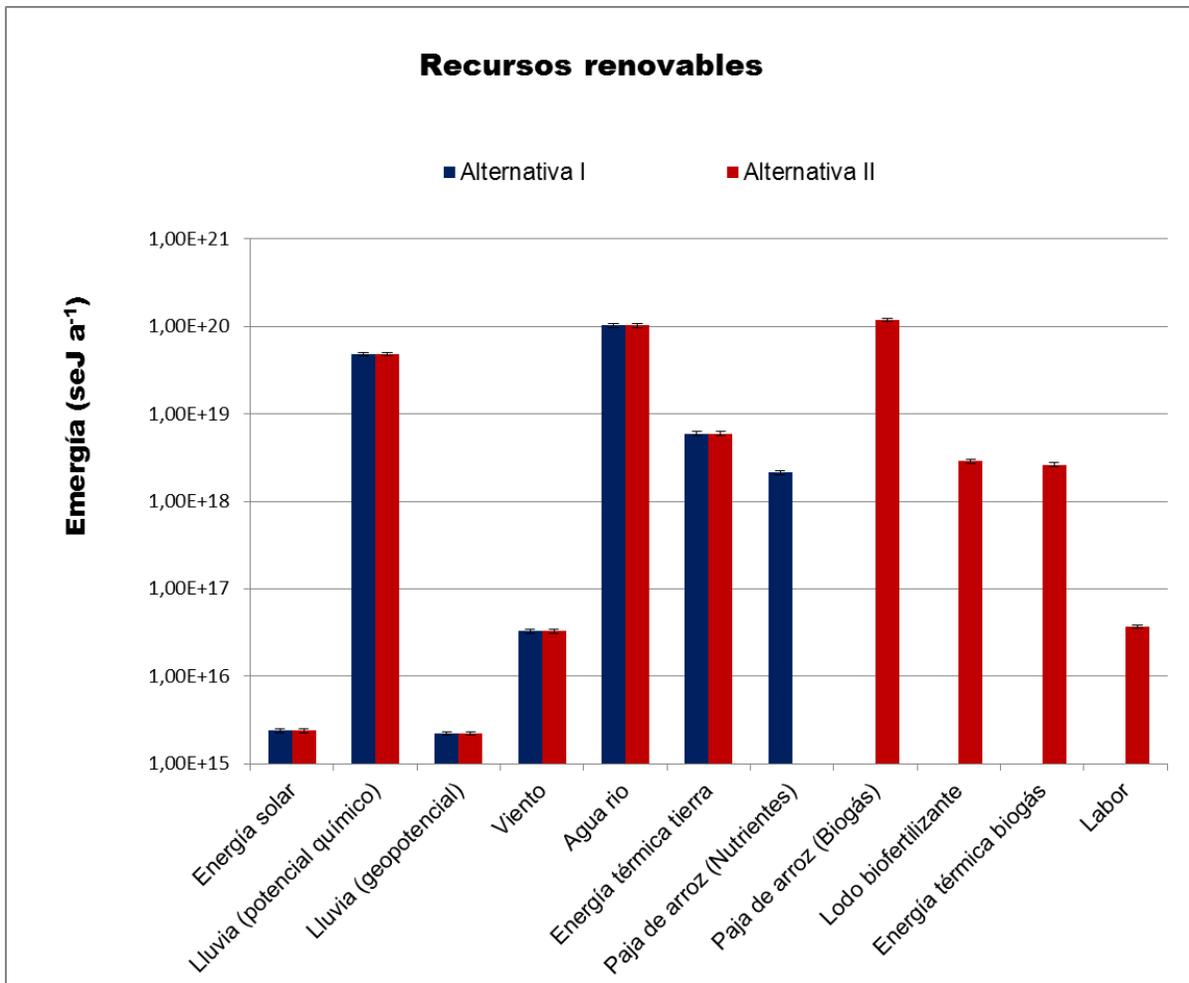


Fig. 3.2. Comparación de las entradas no renovables.

En cuanto a las **Entradas renovables (R)**: La energía del agua de río ( $1,03E+20 \text{ seJ a}^{-1}$ ), utilizada en el riego, constituye la mayor entrada renovable del proceso en la Alternativa I. Para la Alternativa II el valor energético de este flujo se mantiene con el mismo valor, sin embargo la energía aportada por la paja de arroz constituye la mayor entrada, con valor de  $1,18E+20 \text{ seJ a}^{-1}$ . Las restantes entradas de naturaleza biogeofísica no se contabilizan con el objetivo de evitar el doble conteo de entradas de una misma fuente (sol). La entrada anual sustentada por la paja de arroz es de  $2,12E+18 \text{ seJ a}^{-1}$  para la Alternativa I. Sin embargo otras entradas adicionales de  $2,63E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ ,  $2,88E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ ,  $3,69E+16 \text{ seJ a}^{-1}$ , en forma de energía térmica, lodo biofertilizante y mano de obra, emergen en la Alternativa II.

La energía total de entradas renovables tienen valores de  $1,05E+20 \text{ seJ a}^{-1}$  en la Alternativa I y de  $2,27E+20 \text{ seJ a}^{-1}$  en la Alternativa II.



**Fig. 3.3.** Comparación de las entradas renovables.

Comparando ambas alternativas, en cuanto a energía total renovable, se observa un crecimiento en la Alternativa II de un 216,2%, dado fundamentalmente por la **valorización** que adquiere la paja de arroz como fuente energética en la generación de energía eléctrica a través del biogás y la incorporación de los lodos resultantes de la degradación anaerobia como biofertilizantes. En la figura 3.3 se muestra la comparación gráfica.

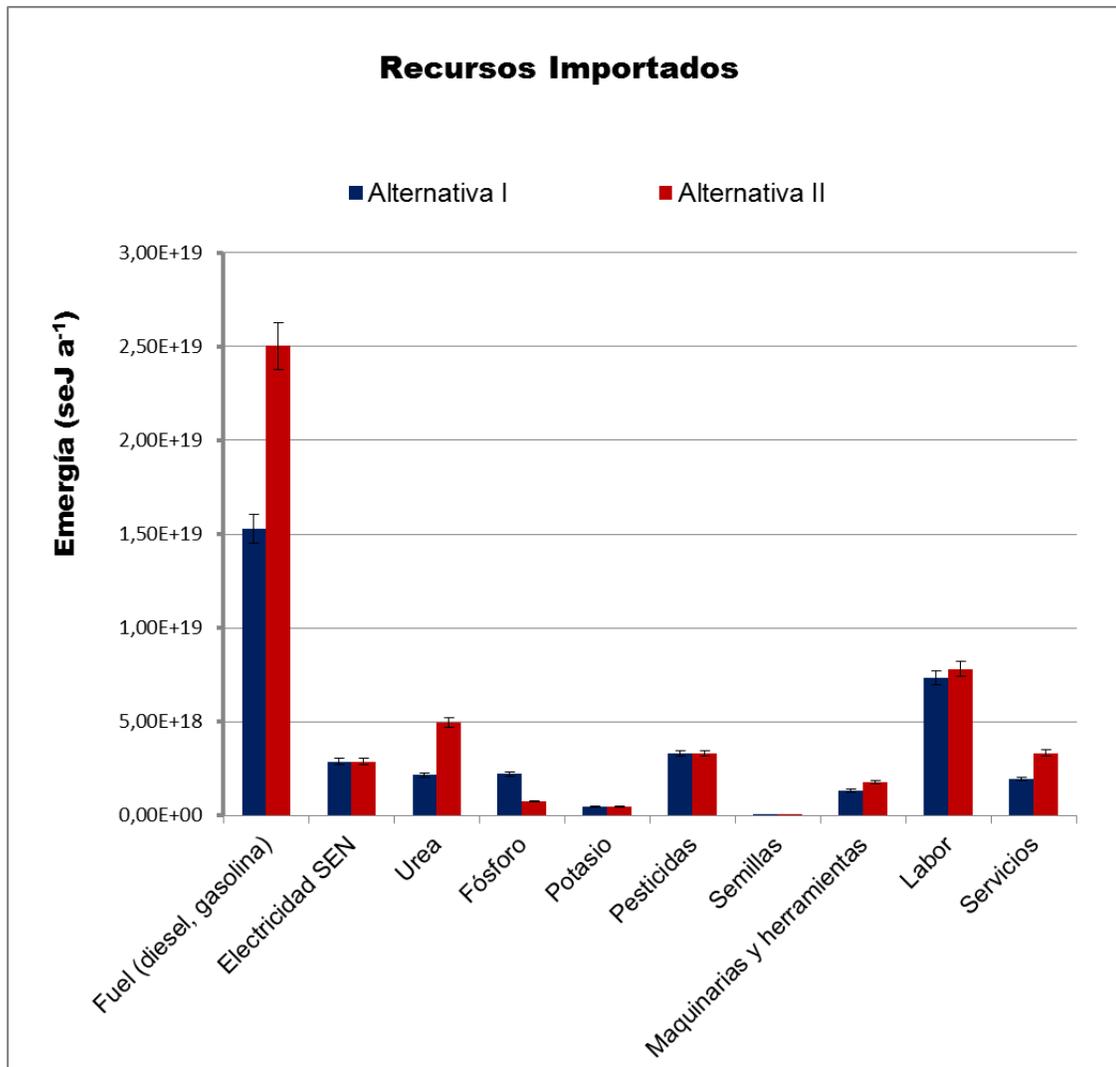
Por otro lado esta alternativa requiere introducir mano de obra para la obtención de los productos que salen del ecosistema productivo, lo que se considera un flujo renovable y se traduce en la generación de empleo impacto social positivo.

Si se comparan los **Recursos importados (F)**: se observa que todas las entradas en esta categoría son, fundamentalmente, los materiales requeridos para la obtención

de los productos finales en cada alternativa. Tanto en la Alternativa I como en la Alternativa II el recurso de mayor incidencia lo constituye el uso de los combustibles, con valor de  $1,53E+19 \text{ seJ a}^{-1}$ , para la Alternativa I siendo 1.63 veces menor que en la alternativa de valorización de la paja ( $2,50E+19 \text{ seJ a}^{-1}$ ).

Los fertilizantes inorgánicos, en la Alternativa I, suman una emergía total anual de  $4,87E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ , mientras que en la Alternativa II es de  $6.24E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ , constituyendo, el fertilizante de contenido nitrogenado, en esta alternativa, el recurso importado de mayor entrada en esta categoría, con un valor emergético de  $4.98E+18 \text{ seJ a}^{-1}$ . En la Alternativa II, donde el residuo (paja) deja de cumplir su función como suministrador de nutrientes al suelo y es necesario suplirlo con fertilizantes inorgánicos, el consumo de urea aumenta 2,3 veces. Sin embargo en la Alternativa I, dentro de la misma categoría, el fertilizante de contenido de fósforo ( $P_2 O_5$ ) tiene un valor de  $2,22E+18 \text{ seJ a}^{-1}$  y es el de mayor entrada entre los fertilizantes consumidos.

También hay un incremento de emergía en maquinaria - herramientas y mano de obra de la primera a la segunda alternativa aumentando 1,34 y 1,1 veces, respectivamente, en la Alternativa II. Esto es debido al crecimiento en el uso de maquinarias y de mano de obra necesaria para compactar y transportar la paja de arroz y la mano de obra necesaria para el tratamiento anaerobio de la paja. La figura 3.4 muestra la comparación numérica entre ellas.

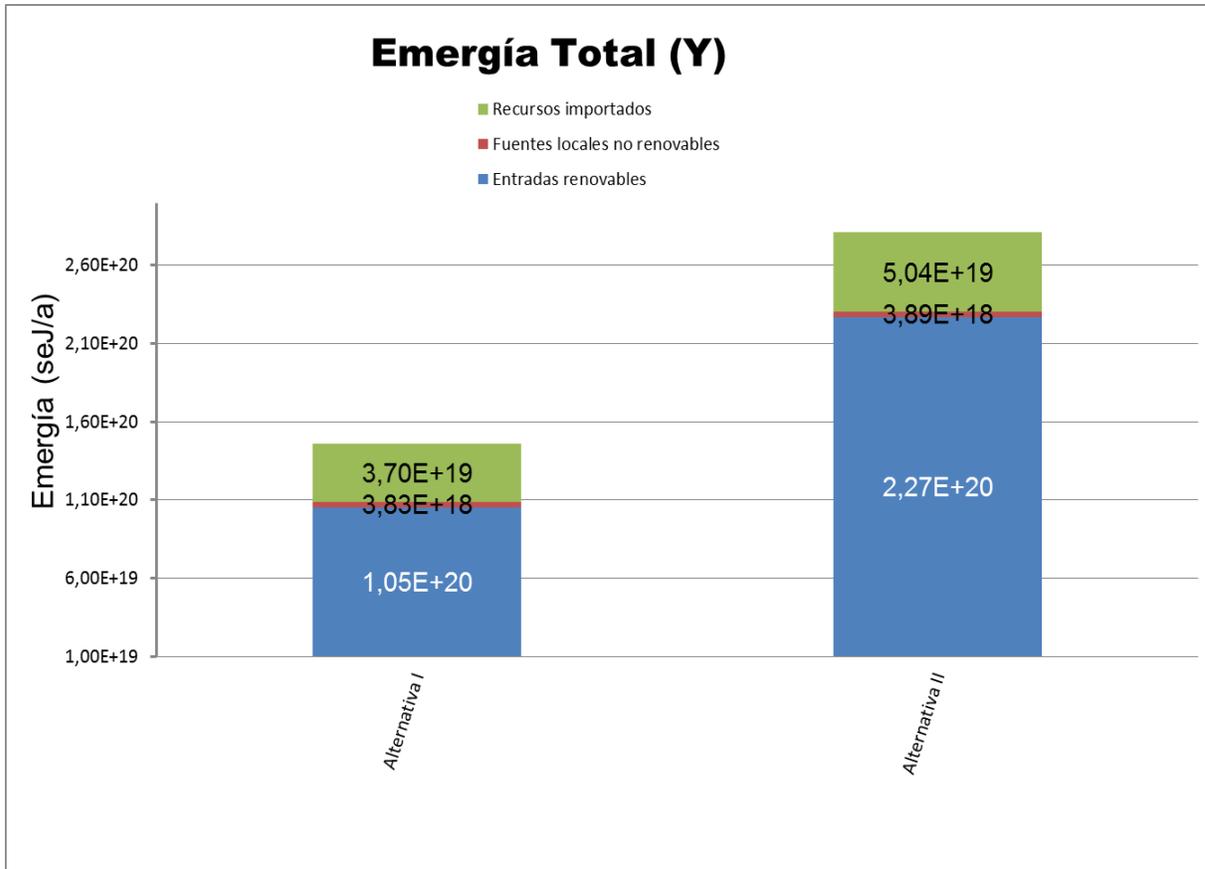


**Fig. 3.4.** Comparación de los recursos importados de las alternativas.

En la figura 3.5 se realiza una comparación de las alternativas en cuanto a energía total de cada una de las fuentes de entrada. En la Alternativa I las entradas renovables representan el 71,91% del total de la energía anual ( $1,46E+20 \text{ seJ a}^{-1}$ ), mientras que los recursos importados representan el 25,34% y las fuentes locales no renovables el 2,75%. Para la Alternativa II las entradas renovables representan el 80,78% del total anual ( $2,81E+20 \text{ seJ a}^{-1}$ ), los recursos importados el 17,93% y las fuentes locales no renovables el 1,29%.

La energía total anual, en la Alternativa II, tiene un crecimiento de 1,92 veces con respecto a la Alternativa I. Esto se debe a que crecen un 216,19% las entradas

renovables y los recursos importados crecen un 136,21%, además de un pequeño crecimiento en las entradas no renovables, (1,56%).



**Fig. 3.4.** Comparación según las fuentes de entrada.

Como se puede observar el ecosistema productivo de la Alternativa II tiene un mayor crecimiento de las entradas renovables frente a los recursos importados que se necesitan en la utilización de la paja de arroz como fuente de energía renovable para este caso de estudio, dado por la utilización del tratamiento anaerobio para valorizar el residuo paja de arroz. Resultados similares fueron obtenidos por Zhou *et al.*, (2010), quien determinó la energía de un sistema de producción agrícola con inclusión de la producción de biogás a partir de residuos agrícolas. Los resultados de este autor mostraron que un proyecto de biogás con residuos agrícolas tiene una mayor dependencia de la entrada local de recursos renovables, menos presión ambiental y una mayor sostenibilidad en comparación con otros sistemas agrícolas típicos.

### 3.2.4. Índices energéticos. Comparación de las alternativas

Como se trató en apartados anteriores, el análisis energético separa las entradas de fuentes renovables (R) de las no renovables (N) y de los recursos importados (F). Estas distinciones hacen posible definir los indicadores energéticos, que proveen las herramientas para la toma de decisiones de sostenibilidad, especialmente cuando se tratan diferentes alternativas (Brown *et al.*, 2012; Castellini *et al.*, 2006; Cohen *et al.*, 2006).

**Tabla 3.4** Indicadores e índices de las alternativas evaluadas.

Indicador	Alternativa I	Alternativa II
	Actual	Valorización de la paja de arroz
Entradas renovables (R)	1,05E+20 seJ a <sup>-1</sup>	2,27E+20 seJ a <sup>-1</sup>
Entradas locales no renovables (N)	3,83E+18 seJ a <sup>-1</sup>	3,89E+18 seJ a <sup>-1</sup>
Recursos importados (F)	3,70E+19 seJ a <sup>-1</sup>	5,04E+19 seJ a <sup>-1</sup>
Energía total (Y)	1,46E+20 seJ a <sup>-1</sup>	2,81E+20 seJ a <sup>-1</sup>
Índice de carga ambiental (ELR)	0,39	0,24
Índice de rendimiento energético (EYR)	3,94	5,57
Índice de sostenibilidad (ESI)	10,1	23,3

#### ***Índice de carga ambiental (ELR)***

El índice de carga ambiental, para las dos alternativas estudiadas, indica que el impacto ambiental de estos dos procesos es muy bajo (0,39 en la Alternativa I y 0,24 en la Alternativa II). La propuesta de valorizar la paja de arroz con fines energéticos (producción de biogás y generación de energía eléctrica) tiene mejor índice de carga ambiental que la Alternativa I. Las dos alternativas valoradas son procesos que

todavía pueden aceptar mayor energía procedente de los recursos no renovables e importados y según Cao & Feng, (2007) son muy amigables ambientalmente.

### ***Índice de rendimiento energético (EYR)***

El cálculo de este índice permite estimar la dependencia que tiene el proceso sobre los recursos importados o comprados y para mostrar la contribución del capital natural local en la economía de la región o el proceso (Castellini *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2010). Utilizando los criterios de análisis y evaluación del índice de rendimiento energético, explicados en el marco teórico y en la metodología, se caracterizaron las alternativas estudiadas en el presente trabajo

El índice de rendimiento energético para la Alternativa I (EYR=3,94) indica que se consume más recursos energéticos secundarios (Brown *et al.*, 2012); como por ejemplo los fertilizantes; tiene un moderado beneficio económico (Zhou *et al.*, 2010); la contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) es moderada (Castellini *et al.*, 2006) y por tanto posee una capacidad adecuada para explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang *et al.*, 2010). Esto quiere decir que para la Alternativa I se pueden considerar nuevas alternativas de producción que utilicen de forma más intensiva los recursos renovables del ecosistema productivo y que impliquen mayores flujos de recursos importados (tecnología, mano de obra, servicios).

Por su parte, el índice de rendimiento energético para la Alternativa II (EYR=5,57) indica que se consumen más recursos energéticos primarios como por ejemplo el diesel (Brown *et al.*, 2012), sin embargo reporta un alto beneficio económico y una fuerte competencia del producto. (Zhou *et al.*, 2010), además de una alta contribución de los recursos locales (renovables y no renovables) (Castellini *et al.*, 2006) lo que le brinda a esta alternativa alta capacidad para explotar los recursos locales (de fuentes renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang *et al.*, 2010). Además se logra una mayor energía proporcionada al sistema frente a la que se retira (Odum & Odum, 2003). En todos estos aspectos en lo que supera la Alternativa II a la I representan que los

productos obtenidos en esta variante aprovechan mejor los flujos que entran al sistema y por ende se obtiene una mayor memoria energética en los productos que salen del ecosistema productivo.

### ***Índice de sostenibilidad (ESI)***

La producción actual en el CAI arrocero “Sur del Jíbaro” con la actual disposición de la paja (Alternativa I) mostró un valor de  $ESI = 10,1$ . Esto indica que es un proceso con un mínimo de estrés ambiental y un máximo de beneficio económico (Zhang *et al.*, 2011), Es decir que para la obtención de los beneficios económicos se logran con un bajo estrés ambiental, además de ser considerado sostenible a largo plazo (Cao & Feng, 2007), es un proceso que puede ser mucho más explotado porque todavía tiene mucha más capacidad de entregar energía o un mayor rendimiento económico sin causar impactos ambientales considerables; en otras palabras, es un proceso que no ha entregado toda su energía disponible (rendimiento económico) brindando la posibilidad de ser explotado desde el aspecto económico, pues el ambiente tiene la capacidad de asimilar más impactos sin degradar su calidad. Es un proceso donde falta más intervención del hombre para ser explotado.

Por su parte, en el proceso de valorización de la paja de arroz (Alternativa II), en términos de sostenibilidad con  $ESI = 23,3$ ; se presenta una buena contribución a la economía a largo plazo, presenta un muy bajo estrés ambiental, y es económicamente viable (Cao & Feng, 2007). El valor de ESI es elevado respecto a otros trabajos debido a la gran contribución de los recursos renovables cuando se valoriza el residuo paja de arroz mediante el tratamiento anaerobio. La emergía de la paja de arroz cuando se introduce su tratamiento anaerobio es 55,66 veces superior a la emergía de la paja de arroz cuando esta se queda en el campo como cobertura vegetal y fuente de nutrientes (disposición actual, Alternativa I). A esto se suma que los recursos importados en la Alternativa II solo aumentan 1,36 veces respecto a la Alternativa I. Esto es debido a que a pesar de que cuando se retira la paja del campo se utiliza diesel, aumenta el uso de fertilizantes orgánicos, aumenta la mano de obra necesaria y se introduce el recurso agua para el tratamiento anaerobio, estas entradas no significan un aumento tal que sea proporcional al

aumento del índice de sostenibilidad en la alternativa II.

### **3.2.5 Comparación de la Alternativa actual con la producción de arroz en Guadalquivir, España, 2006**

En la tabla 3.5 se muestra una comparación de los principales indicadores energéticos en la producción de arroz. Solo se compara la alternativa actual por su similitud con el estudio realizado por Lomas, (2009).

Es necesario mencionar que en el trabajo presentado por Lomas, (2009), el cálculo tanto de los índices como de la transformicidad y la emergía específica de arroz se realiza sin tener en cuenta la transportación y secado del arroz.

Según Raugeri *et al.* (2005), se considera a la transformicidad como un indicador de razón de rendimiento, es decir, la energía total requerida por unidad de producto, en términos energéticos. La transformicidad del presente estudio tiene un valor de 1,1 veces mayor, y la emergía específica también es mayor 1,1 veces que las obtenidas en el estudio de Lomas, (2009). La diferencia que existe entre los dos estudios está dada por las fronteras escogidas para cada estudio.

Respecto a la renovabilidad (R/Y), el modelo de producción de arroz en el Sur del Jíbaro tiene mayor fracción de uso que es renovable (71,91%), 29% más que en Guadalquivir. La producción de arroz en Guadalquivir (2006) es más dependiente de los recursos importados, que representa el 57% del total de emergía, dado fundamentalmente por el alto valor que poseen los servicios. También se puede concluir que los flujos renovables del ecosistema estudiado por Lomas, (2009) son menores que los considerados en el presente estudio dado a que en su estudio no considera la disponibilidad de la paja de arroz como biofertilizante y en los flujos importados la mano de obra presenta valores muy superiores a los que se utilizan en las Alternativas estudiadas en el presente trabajo.

**Tabla 3.5** Comparación de los principales indicadores en la producción de arroz.

<b>Indicador</b>	<b>Sur del Jíbaro Alternativa I</b>	<b>Guadalquivir España 2006</b>
Transformicidad arroz (seJ J <sup>-1</sup> )	2,31E+05	2,60E+05
Energía específica arroz (seJ g <sup>-1</sup> )	3,64E+09	3,89E+09
R/Y	0,72	0,43
F/Y	0,25	0,57
EYR	3,94	1,75
ELR	0,39	1,34
ESI	10,1	1,31

En el Sur del jíbaro la energía usada por unidad de energía invertida (EYR), con valor 3,94, es 2,25 veces mayor que en Guadalquivir, con valor 1,75. Mientras que el índice de carga ambiental (ELR) se comporta de forma inversa, es 3,43 veces menor (0,39 en el Sur del Jíbaro por 1,34 en Guadalquivir), indicando que es mucho más amigable ambientalmente el primero.

En el estudio realizado a la producción arrocera en el Sur del Jíbaro el índice de sostenibilidad (ESI) con valor de 10,1 indica que el proceso actual tiene la posibilidad de ser explotado desde el aspecto económico, pues el ambiente tiene la capacidad de asimilar más impactos sin degradar su calidad y falta más la intervención del hombre para ser explotado. Mientras que el ESI, con valor 1.31, en Guadalquivir indica que el proceso presenta una contribución sostenible a la economía durante periodos a mediano plazo (Cao & Feng, 2007).

No obstante los resultados de este trabajo, a juicio del autor, las futuras investigaciones deben estar encaminadas a la determinación de los índices energéticos en diferentes líneas de producciones y/o servicios a nivel nacional, para que se adecuen las prácticas de la teoría del análisis energético a Cuba, y para que

su uso se implemente con miras al desarrollo sostenible de nuestra nación, e implementarlo en la formación profesional. Además la práctica extensiva de la metodología permitirá la obtención de una base de datos nacional tanto de productos y servicios como también de los diferentes ecosistemas.

## CONCLUSIONES

1. En la Empresa Agroindustrial de granos Sur del Jíbaro, la paja de arroz que se genera no tiene una disposición adecuada. Actualmente se deja en el campo como abono orgánico, pero realmente es incinerada o tapada con el laboreo, lo que provoca mayores daños ambientales. Estudios recientes demostraron que el tratamiento anaerobio de esta puede ser una alternativa ambiental y económicamente viable dado a la producción de biogás y biofertilizante.
2. La determinación de los flujos y diagramas emergéticos permitió definir las entradas renovables, no renovables e importadas del sistema producción arroceras con y sin valorización de la paja de arroz. Con esta última crecen las entradas renovables y los recursos importados. Además permitió calcular la transformicidad y/o emergía específica del arroz consumo y por tanto demostrar que la emergía total anual en la alternativa de valorización de la paja de arroz es mayor 1.92 veces que la emergía total de alternativa actual.
3. El cálculo de los índices emergéticos permitió determinar que ambas alternativas (disposición actual y valorización de la paja de arroz) son sustentables energética y ambientalmente. Sin embargo el valor de sostenibilidad obtenido (10.1) en la alternativa actual muestra que este ecosistema productivo tiene la posibilidad de ser explotado desde el aspecto económico, pues el ambiente tiene la capacidad de asimilar más impactos sin degradar su calidad. Por su parte la alternativa de valorización de la paja, con valor de 23,3 muestra ser un ecosistema productivo que tiene la posibilidad de ser mucho más explotado y más sostenible económicamente que la alternativa de actual disposición.
4. La comparación de los resultados en la producción de arroz en Guadalquivir España con los obtenidos en la Alternativa I arrojo que la a la producción arroceras en el Sur del Jíbaro tiene un índice de sostenibilidad (ESI) con valor

de 10,1 que indica que el proceso es sostenible a largo plazo, en el caso de en Guadalquivir con un ESI, con valor 1.31, indica que el proceso presenta una contribución sostenible a la economía durante períodos a mediano plazo.

## **RECOMENDACIONES**

1. Profundizar en el acopio de datos reales tanto de la producción arroceras como los índices nacionales de conversión de energías.
2. Aplicar el análisis emergético a otros ecosistemas productivos donde se integre la producción de biogás.
3. Utilizar la síntesis emergética como una herramienta complementaria a los análisis de ciclo de vida (LCA) y análisis de ciclo de vida exérgico (ELCA), ya que esta metodología integra la información económica y ambiental en un marco de referencia común (contabilidad ambiental).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abel, T. 2004. Systems diagrams for visualizing macroeconomics. *Ecological Modelling* 178: 189-194.
- Abril, D., Navarro, E. y Abril, A. (2009). La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento. *Agronomía* 17(2): 69 - 79.
- Agostinho, F., Diniz, G., Siche, R., & Ortega, E. (2008). The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. *Ecological Modelling*, 210(1-2), 37-57.
- Álvarez, S., Lomas, P. L., Martín, B., Rodríguez, M., & Montes, C. (2006). La síntesis emergética ("emergy synthesis"). Integrando energía, ecología y economía. Monografía. Universidad autónoma de Madrid España.
- Banco Central de Cuba. (2015). Comunicación personal con el especialistas del Banco Popular de Ahorro. Sancti Spíritus. (Diciembre 2015).
- Berglund, M. y Borjesson, P. (2006). Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. *Biomasa and Bioenergy*, 30, 254-266.
- Bjo, J., & Geber, U. (2001). Emergy analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge. *Resources Conservation and Recycling*, (31), 293-316.
- Borrego, J. (2015). Reportaje periódico Escambray "Venturas y desventuras en la principal empresa agropecuaria de Sancti Spíritus". (Revisado Enero 2016).
- Borroto, A., Monteagudo J. P., y colaboradores (2006). Gestión energética en el sector productivo y los servicios. Universidad de Cienfuegos.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Emergy analysis and environmental accounting. *Encyclopedia Energy*, 2, 329–354.
- Brown, M. T., & Ulgiati, S. (2004). Emergy analysis and environmental accounting. *Encyclopedia Energy*, 2, 329–354.
- Brown, M.T. 2004. A picture is worth a thousand words: energy systems language and simulation. *Ecological Modelling* 178: 83-100.

- Brown, M.T., Ulgiati, S. 2004b. Emery analysis and environmental accounting. Pages 329-354 in C.J. Cleveland, editor. Encyclopaedia of Energy. Boston University, Boston, MA, USA.
- Brown, Mark T., Raugei, M. & Ulgiati, S. (2012). On boundaries and “investments” in Emery Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, 15(1), 227-235.
- Cai, T.T., Olsen, T.W., Campbell, D.E. 2004. Maximum (em)power: a foundational principle linking man and nature. *Ecological Modelling* 178: 115-119.
- California Straw Building Association (CASBA). (2008). California rice straw production FAQ. [en línea]. Disponible en: <http://www.ricestrawmarket.org>.
- Campos, P., Naredo, J.M. 1980. La energía en los sistemas agrarios. *Agricultura y Sociedad* 15:17-113.
- Cao, K., & Feng, X. (2007). The Emery Analysis of Multi-Product Systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 85(5), 494-500.
- Castellini, C., Bastianoni, S., Granai, C., Bosco, A. D., & Brunetti, M. (2006). Sustainability of poultry production using the emery approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 343-350.
- Chandra, R., Takeuchi, H. y Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 16, 1462-1476.
- Cohen, M. J., Brown, M. T., & Shepherd, K. D. (2006). Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emery synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 249-269.
- Contreras, L. M. (2013). Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocerá cubana para la producción de biogás. Tesis Doctoral, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

- Contreras, L. M., I. Pereda-Reyes, et al. (2012). "Aprovechamiento energético de residuos arroceros por bioconversión. Caso de estudio Cuba." *Dina, Ingeniería e Industria* 2: 1-11.
- Contreras, L. M., Pereda-Reyes, I. y Romero-Romero, O. (2012). Aprovechamiento energético de residuos arroceros por bioconversión. Caso de estudio Cuba. *Dina, Ingeniería e Industria* 2: 1-11.
- Contreras, L. M., Vera, A., Romero, O., et al. (2006, noviembre). Diagnóstico y perspectiva para la producción de biogás con fines energéticos en la provincia de Sancti Spíritus. Ponencia presentada en el II Simposio Internacional, Sociedad, Turismo y Desarrollo Humano Local, Sancti Spíritus, Cuba.
- Departamento Energético. (2015). Comunicación personal con el especialistas del departamento energético del CAI. Arrocero "Sur del Jíbaro". Sancti Spíritus. (Diciembre 2015).
- Dirección de Recursos Humanos. (2015). Comunicación personal con el especialistas del departamento de recursos humanos del CAI. Arrocero "Sur del Jíbaro". Sancti Spíritus. (Diciembre 2015).
- Doberman, A. & Fairhurst, T. H. (2002). "Rice straw management". En: *Better Crops International*, Vol. 12. Special Supplement.
- Fath, B.D., Patten, B.C., Choi, J.S. 2001. Complementarity of ecological goal functions. *Journal of Theoretical Biology* 208: 493-506.
- Franzese, P.P., Comar, V., Russo, G.F., Ulgiati, S. 2005. Analisi dei sistema ecologici: approccio modellistico – ecodinamico. *Biologi Italiani* 6: 41-48.
- Gadde, B., Christoph, M. y Reiner, W. (2009). Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and the Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1532-1546.
- García, A. (2010). Mejoramiento de la eficiencia energética y económica del CAI Arrocero Sur del Jíbaro mediante estudio de potenciales de ahorro por aprovechamiento energético de residuos. Tesis en opción al grado de Master.

Maestría de Eficiencia Energética. Centro Universitario “José Martí Pérez”.  
Sancti Spíritus, Cuba.

González Bernáldez, F. 1981. Ecología y paisaje. Blume, Madrid.

Hall, C. A. S. 2004. The continuing importance of maximum power. *Ecological Modelling* 178: 1-2.

Hau, J. L., Bakshi, B.R. 2004. Promises and problems of energy analysis. *Ecological Modelling* 178: 215-225.

He, Y. y Yunzhi, P. (2008). Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production. *Energy & Fuels*, 22, 2775-2781.

Hills, D. J. y Roberts D. W. (1981). Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. *Agricultural Waste*, 3, pp. 179-189.

Hondal, A. (2015). Comunicación personal con el especialista de la Empresa Cubalub. Sancti Spíritus. (Diciembre 2015).

Intriago Flor, F. G; Paz Mejía, S. A. (2000). Ensilaje de cascara de plátano maduro con microorganismos eficaces como alternativa de suplemento para ganado bovino. Tesis de grado de Ingeniero Agrónomo. Universidad Earth. Costa Rica, 63p.

Jiménez, J.; Puebla, Y. G.; Cisneros, M.E.; Sagastume, J.M.; Guerra, G.; Noyola, A. (2015). Optimization of the specific methanogenic activity during the anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw, using industrial clay residues as inorganic additive. *Chemical Engineering Journal* 259 (2015) 703–714.

Kalra, M. S y Panwar J. S. (1986). Digestion of Rice Crop Residues. *Agricultural Wastes*, 17, 263-269.

Karimi, K., K. S, et al. (2006). "Conversion of rice straw to sugars by dilute-acid hydrolysis." *Biomass Bioenergy*30: 247-253.

- Komatsu, T., Kudo, K., Inoue, Y. y Himeno, S. (2010). Anaerobic codigestion of sewage sludge and rice straw. Disponible en: [http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/anaerobiccodigestion495.pdf /](http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/anaerobiccodigestion495.pdf/)
- Lei, K., & Wang, Z. (2008). Municipal wastes and their solar transformities: an emergy synthesis for Macao. *Waste management (New York, N.Y.)*, 28(12), 2522-31.
- Lei, Z., Jiayi, Ch., Zhenya, Z., et al. (2010). Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation. *Bioresource Technology*, 101, 4343-4348.
- Lomas & Huerta, P. (2009). Aportaciones de la síntesis emergética a la evaluación multi-escalar del empleo de los servicios de los ecosistemas a través de casos de estudio. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología, Tesis doctoral.
- Lomas, P. L., Donato, M. D., & Ulgiati, S. (2007). La síntesis emergética : una valoración de los servicios de los ecosistemas con base termodinámica. *Revista Ecosistemas*, 16(3), 37-45.
- López\_Dávila. E, et al. (2013) Potencial de Biogás de la Fermentación Anaerobia de Residuos Sólidos de la Agroindustria Azucarera, utilizando Lodo Anaerobio de Estiércol Porcino. *Revista Centro Azúcar*, Vol. 40, Enero-Marzo, 2013. 7 p.
- Lotka, A.J. 1922a. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 8: 47–51.
- Lotka, A.J. 1922b. Natural selection as a physical principle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 8:151–4.
- Lu, H., Bai, Y., Ren, H., & Campbell, D. E. (2010). Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: implications for agricultural policy in China. *Journal of environmental management*, 91(12), 2727-35.
- Lu, H., Campbell, D. E., & LI.R. H. (2006). Emergy synthesis of an agro-forest restoration system in lower subtropical China. *Ecological Engineering*. 27, 175–192.

- Medinilla, F. (2015). Comunicación personal con el especialista del Instituto de Meteorología de Cuba. Sancti Spíritus. (Diciembre, 2015).
- Meyer-Ulrich, A., Schattauer, A., Jürgen, H., et al. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renewable Energy*, 37, 277-284.
- Mussatto, S. I., M. Fernandes, et al. (2008). " Effect of hemicellulose and lignin on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain " *Enzyme Microbiology and Technology*43: 124-129.
- Navarro, E. (2008). La biomasa de la Albufera, aprovechamiento y corrección de impactos. Valencia: Ed. Aleta Ediciones. Colección Aleta Investigación. 156 p.
- NEAD (2008). National Environmental Accounting Database. Center for Environmental Policy, University of Florida.
- Odum, H. T. 1996. Environmental accounting: emergy and decision making. John Wiley, New York, USA.
- Odum, H., & Odum, B. (2003). Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering*, 20(5), 339-361.
- Odum, H.T. (1998). Emergy evaluation. International workshop, advances in energy flows in ecology and economy. Porto Venere, Italy.
- Odum, H.T. 1983. Maximum power and efficiency: a rebuttal. *Ecological Modelling* 20: 71-82.
- Odum, H.T. 1994. Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology. Colorado University Press, Niwot, CO, USA.
- Odum, H.T. 1995. Energy systems concepts and self-organization: a rebuttal. *Oecologia* 104: 518-522.
- Odum, H.T. 2001. An energy hierarchy law for biogeochemical cycles. Pages 235-248 in: Brown, M.T., editor. *Emergy Synthesis 1: Theory and applications of the emergy methodology*. Proceedings of the 1st Biennial Emery Conference. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, USA.

- Odum, H.T., (1996). Environmental Accounting. Energy and Environmental Decision Making. John Wiley & Sons, Inc., p. 369.
- Odum, H.T., (2000). Handbook of Emergy Evaluation. A Compendium of Data for Emergy Computation. Emergy global processes. Center of Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.
- Odum, H.T., Pinkerton, R.C. 1955. Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. American Scientist 43 (2): 331-343.
- Ortega, E., Miller, M., Anami, M.H., Beskow, P.R., (2003). From emergy analysis to public policy: soybean in Brazil. In: Mark, T., Brown, (Eds.), Emergy Synthesis 2: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Proceedings of the Second Biennial Emergy Conference, The Center of Environmental Policy, 2001, Gainesville, Florida.
- Rapport, D., Rolston, D.E., Nielsen, N.O., Qualset, C.O., Damania., A.B. 2002. Managing for healthy ecosystems. CRC Press.
- Redclif. M. (1987). Sustainable development: exploring the contradictions. Ecological Economics Metheun, London. 217 pp
- Reiter, E.R. 1969. Atmospheric transport processes. Part I: Energy transfers and transformations. US Atomic Energy Commission. Division of Technical Information, Oak Ridge, TN, USA.
- Rydberg, T., & Haden, A. (2006). Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. Agriculture, Ecosystems & Environment, 117(2-3), 145-158.
- Sciubba, E., & Ulgiati, S. (2005). Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? Energy, 30(10), 1953-1988.
- Siracusa, G., & La Rosa, A. D. (2006). Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis. Ecological Modelling, 197(3-4), 490-497.

- Somayaji, D. y Khanna, S. (1994). Biomethanation of rice and wheat straw. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 10, 198-212.
- Ton, S., Odum, H. T., & Delfino, J. J. (1998). Ecological-economic evaluation of wetland management alternatives. *Ecological Engineering*, 11, 291–302.
- Ulgati, S., Brown, M. T., Bastianoni, S., & Marchettini, N. (1995). Emergy based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecol. Eng*, 5, 519–531.
- Valentina Savran, 2010. Evaluación del potencial tecnológico de la biomasa no cañera al balance energético nacional. Informe técnico de biomasa Agosto 2010.
- Vassallo, P. & Fabiano, M. (2009). Emergy required for the complete treatment of municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 35(5), 687-694.
- Velez, J. (2007). Biosolids: A problem or a solution? *Producción mas Limpia*, 2, 57-71.
- Wang, G., Gavala, H. N., Skiadas, I. V. y Ahring, B. K. (2009). Wet explosion of wheat straw and codigestion with swine manure: Effect on the methane productivity. *Waste Management* 29(11): 2830-2835.
- Watanabe, A., Satoh, Y. y Kimura, M. (1995). Estimation of the increase in CH<sub>4</sub> emission from paddy soils by rice straw application. *Plant and Soil*, 173, 225-231.
- Yanfeng, H., Y. Z. Pang, et al. (2008). "Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production." *Energy & Fuels* 22(4): 2775-2781.
- Yang, D., Zheng, Y. y Zhang, R. (2009, junio). "Alkali Pretreatment of Rice Straw for Increasing the Biodegradability". An ASABE Meeting Presentation. Paper Number: 095685. Grand Sierra Resort and Casino Reno, Nevada.
- Yu, Y., B. Park, et al. (2004). "Co-digestion of lignocellulosics with glucose using thermophilic acidogens." *Biochemical Engineering Journal* 18(3): 225-229.

- Zhang, L. X., Song, B., & Chen, B. (2012). Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production*, 28, 33-44.
- Zhang, L. X., Yang, Z. F., & Chen, G. Q. (2007). Emergy analysis of cropping–grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*, 35(7), 3843-3855.
- Zhang, R. y Zhang Z. (1999). Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. *Bioresource Technology*, 68, 235-245.
- Zhang, X., Deng, S., Wu, J., & Jiang, W. (2010b). A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emergy. *Ecological Engineering*, 36(5), 685-696. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.010
- Zhang, X., Deng, S., Zhang, Y., Yang, G., Li, L., Qi, H., Xiao, H. (2011). Emergy evaluation of the impact of waste exchanges on the sustainability of industrial systems. *Ecological Engineering*, 37(2), 206-216.
- Zhao Rui, Zhenya Zhang, Ruiqin Zhang, Miao Li, Zhongfang Lei, Motoo Utsumi, Norio Sugiura. (2010). "Methane production from rice straw pretreated by a mixture of acetic–propionic acid". *Bioresource Technology* 101, pp. 990–994
- Zhou, S.Y.; B. Zhang, Z.F. Cai, (2010). Emergy analysis of a farm biogas project in China: A biophysical perspective of agricultural ecological engineering

**Anexo 2.1** Flujos utilizados para el cálculo emergético. Modificado de Contreras, 2013.

<b>Entradas y salidas</b>	<b>Unidad</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>
<b>Etapa Agrícola</b>			
<b>Entrada</b>			
Suelo	h/a	15 282,7	15 282,7
Semilla	t/a	2407	2407
Agua	L/a	<b>257 040 000</b>	<b>257 040 438</b>
Herbicidas	t/a	168,04	168,04
Plaguicidas	t/a	12,45	12,45
Fungicidas	t/a	42,41	42,41
Adherentes	t/a	1,18	1,18
<b>Fertilizantes</b>			
Urea	t/a	338,7	116,10
Fósforo	t/a	338,7	116,10
Potasio	t/a	270,9	270,9
Zinc	t/a	169,35	169,35
Combustible	L/a	<b>4 621 021,4</b>	<b>7 571 021,4</b>
Lubricantes	t/a	450	450
<b>Salida</b>			
Arroz cáscara húmedo	t/a	112 592	112 592
Resto de cosecha	t/a	<b>74 400</b>	0
<b>Etapa Industrial</b>			
<b>Entrada</b>			
Arroz cáscara húmedo	t/a	112 592,0	112 592,0
Combustible	L/a	796 364,3	0
Lubricantes	t/a	150	150
Energía eléctrica	kWh/a	2 769 819,15	2 769 819,15
<b>Salida</b>			
Arroz consumo	t/a	40000	40000
Salvado	t/a	9 570,3	9 570,3
Cabecilla	t/a	1 688,9	1 688,9
Residuo secadero	t/a	4 503,68	4 503,68
Cáscara de arroz	t/a	24 770,24	24 770,24
Energía eléctrica	kWh/a	0	<b>132 456</b>
Energía térmica	kWh/a	0	<b>197 199</b>
Lodo biofertilizante	t/a	0	222,6