



**UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS  
“JOSÉ MARTÍ PÉREZ”**



**Tesis para optar por el Título de Máster en Producciones Más Limpias**

**Impacto Ambiental de Alternativas Energéticas sobre el proceso de secado de  
arroz**

**En la UEB “Tamarindo”**

**Autor: Ing. Ernesto Jesús Pomares Fiallo**

**Tutor: Dr.C. Ernesto Luis Barrera Cardoso**

**Sancti Spíritus, 2022**

## Resumen

La producción de arroz en Cuba es altamente dependiente del consumo de diesel y energía eléctrica. Es además alta generadora de residuos con potencial energético. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental de varias alternativas energéticas sobre el proceso de secado del arroz en la UEB "Tamarindo" perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos Sur del Jíbaro del municipio La Sierpe, provincia SS, utilizando residuos de las producciones arroceras y porcinas disponibles en la unidad. Para cumplir este propósito se utilizó la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y mediante el software libre OpenLCA versión 1.10 (Base de Datos ecoinvent 3.6 y la metodología ReCiPe con categorías de impactos (CI) en punto final, en una perspectiva jerárquica, se determinó el impacto en la "Calidad del Ecosistema", la "Salud Humana" y los "Recursos Fósiles". Y en punto medio donde se realizó un análisis más detallado sobre 18 CI en estudios de caracterización y normalización, se realizó posteriormente un análisis de sensibilidad valorando variaciones en la variable de más incertidumbre. Para lo que se definió el objetivo y alcance del estudio y se elaboró el inventario de ciclo de vida para las diferentes alternativas. Los resultados del estudio mostraron una disminución significativa del impacto ambiental con la sustitución completa del diésel de secado y la energía eléctrica de la red nacional por la energía generada a partir de la cascarilla de arroz. Los impactos perjudiciales más notables estuvieron en ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, consumo de agua y toxicidad humana carcinogénica. Para todos los casos el flujo de mayor impacto fue el del arroz en su etapa agrícola, se evidenció además que las alternativas propuestas tienen significativo impacto beneficioso sobre el consumo de recursos, calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua.

## **Abstract**

Rice production in Cuba is highly dependent on the consumption of diesel and electricity, it is also a high generator of waste with potential energy. The objective of this work is to evaluate the environmental impact of various energy alternatives on the rice drying process in the UEB "Tamarindo" belonging to the Agroindustrial Company of Grains Sur del Jíbaro in the Municipality of La Sierpe, province of Sancti Spiritus, using waste from rice production and swine available in the unit. To fulfill this purpose, the Life Cycle Analysis (ACV) methodology was used and through the free software OpenLCA version 1.10 (ecoinvent 3.6 database and the ReCiPe methodology with Impact categories (CI) finally, in a hierarchical perspective, the impact on "Ecosystem Quality", "Human Health" and "Fossil Resources" was determined, as well as the total impact. And in the middle where a more detailed analysis was carried out on 18 CI in characterization and normalization studies, a sensitivity analysis was subsequently carried out evaluating variations in the variable of greatest uncertainty. For which the objective and scope of the study were defined and the life cycle inventory was prepared for the different alternatives. The results of the study showed a significant decrease in the environmental impact with the complete substitution of drying diesel and electricity from the national grid for energy generated from rice husks. The most notable detrimental impacts were in freshwater ecotoxicity, water consumption, and carcinogenic human toxicity. For all cases, the flow with the greatest impact was that of rice in its agricultural stage, it was also evidenced that the proposed alternatives have a significant beneficial impact on the consumption of resources, global warming, terrestrial ecotoxicity and water consumption.

# Contenido

<b>Introducción</b> .....	6
<b>Capítulo I Marco teórico referencial</b> .....	11
<b>1.1- Cambio climático a nivel mundial, sus efectos en Cuba.</b> .....	11
1.2- Efecto del uso de los combustibles fósiles en el cambio climático.....	14
<b>1.3 Producción de arroz en Cuba. Impacto ambiental de la producción de arroz.</b> .....	15
<b>1.4- Tendencia al uso de las FRE. Su aplicación en la producción de arroz.</b> .	17
<b>1.5 La cascarilla de arroz como combustible</b> .....	20
<b>1.6- Herramientas de evaluación de impacto ambiental</b> .....	23
<b>1.6.1- Análisis Ciclo de vida</b> .....	23
<b>Capítulo II. Materiales y métodos.</b> .....	27
<b>2.1- Descripción del proceso de análisis del ciclo de vida</b> .....	27
<b>2.2- Aplicación de la metodología de análisis del ciclo de vida</b> .....	27
<b>2.2.1 Definición de objetivo, alcance y fronteras del estudio</b> .....	27
<b>2.2.2 Descripción del proceso secado.</b> .....	29
<b>2.2.3 Principales limitaciones y suposiciones.</b> .....	31
<b>2.2.4. Definición de las alternativas energéticas a evaluar.</b> .....	31
<b>2.2.5- Se realiza el inventario de ciclo de vida para cada alternativa</b> .....	32
<b>2.2.6 Evaluación de impacto del ciclo de vida</b> .....	32
<b>2.2.7 Estudio de sensibilidad.</b> .....	33
Una vez realizada la evaluación del impacto de ciclo de vida a las alternativas ....	33
<b>Capítulo III Análisis de los resultados.</b> .....	34
<b>3.1- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto final del ACV)</b> .....	34

<b>3.2- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto medio del ACV)</b> .....	35
<b>3.3 Análisis de sensibilidad</b> .....	37
<b>3.4- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto final del ACV) sin considerar carga ambiental del flujo “mercado de arroz”</b> .....	41
<b>3.5- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto medio del ACV) sin considerar carga ambiental del flujo “mercado de arroz”</b> .....	42
<b>3.6- Estudio de sensibilidad. Sin considerar flujo mercado de arroz</b> .....	44
<b>3.7 Análisis de los resultados</b> .....	46
<b>Conclusiones</b> .....	49
<b>Recomendaciones</b> .....	50
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	51
<b>ANEXOS</b> .....	55

## **Introducción**

El desarrollo de la especie humana, desde su surgimiento, ha venido aparejado con un deterioro progresivo del medio ambiente. La necesidad de explotar los recursos de la naturaleza y el vertimiento a esta de todos los desechos generados han provocado una destrucción paulatina del mundo que le permite vivir. Los debates recientes sobre medio ambiente y desarrollo coinciden con el agravamiento de la situación socioeconómica mundial, debido al impacto de la crisis económica global con particular crudeza en las dimensiones financiera, comercial, energética, social, alimentaria y ambiental (Pichs, 2012).

En el sistema económico tradicional la incompatibilidad entre crecimiento económico y equilibrio ecológico es evidente. Existen grandes problemas de degradación ambiental: contaminación del aire, del suelo y del agua, agotamiento de los recursos naturales renovables y no renovables, pérdida de diversidad biológica y deforestación, entre otros. Todo esto ha llevado al hombre a pensar en un desarrollo que no comprometa la estabilidad del planeta. El término Desarrollo Sostenible (DS), fue abordado conceptualmente en el informe titulado "Nuestro Futuro Común", presentado por la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo de Naciones Unidas en 1987. Esta comisión fue presidida por Gro Harlem Brundtland (en aquel momento Ministra de Medio Ambiente y después Primera Ministra de Noruega), y en consecuencia el documento recibió el nombre de informe de Brundtland (IB), enunciando que: "El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". La relación entre el medio ambiente y la economía se definió de forma explícita en 1992 en el Quinto Programa de Acción Comunitario en materia de Medio Ambiente, cuando consideró que el crecimiento económico es insostenible "si no se tienen en cuenta las consideraciones medio ambientales, no sólo como un factor restrictivo, sino como un incentivo para aumentar la eficacia y la competitividad, sobre todo en el mercado mundial" ("Comisión de Comunidades Europeas," 1992).

La concepción de desarrollo ha evolucionado rápidamente a partir de Río 92, punto de origen de las propuestas que conformaron la Agenda 21. Efectivamente, la concepción puramente economicista ha sido atemperada por un enfoque que incorpora explícitamente otras dimensiones esenciales del desarrollo; así, la dimensión

económica, ha sido complementada por la social, la político-institucional y, naturalmente, la ambiental.

Entre las prioridades humanas para su existencia está su alimentación, y en ella juega un papel primordial la agricultura. Se conoce que las producciones agrícolas generan grandes impactos negativos sobre el medio ambiente y los recursos naturales, al ser responsables del 14 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (Pereda & Díaz, 2015). Inciden en la degradación y erosiones de los suelos, pérdidas de áreas boscosas y contaminación de las aguas con agroquímicos y pesticidas. Una de las actividades más importantes en el sector agrícola es el cultivo de arroz, que aporta de igual forma a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (Gadde et al., 2009). Esto nos indica la urgente necesidad de tomar medidas para lograr producciones más amigables con el medio ambiente en este sector de la economía.

La producción de alimentos para la población es un objetivo primordial de cada gobierno existente en el mundo actual. En este sentido es indispensable el procesamiento industrial de la gran mayoría de los alimentos conocidos por el hombre para propiciar su consumo con los requerimientos establecidos, así como su conservación para almacenamiento y posterior consumo.

Los procesos industriales actuales requieren en esencia de una gran cantidad de energía para su desempeño. Energía que se obtiene primordialmente de combustibles fósiles. Por otra parte, estos procesos son por lo general altos generadores de residuos que en muchas ocasiones no tienen una correcta disposición final. Las problemáticas abordadas hasta el momento han puesto a los gobiernos frente a dos grandes dilemas:

**1- El inminente agotamiento los combustibles fósiles.**

**2- La contaminación progresiva del medio ambiente.**

Muchos gobiernos e innumerables instituciones se esfuerzan por dar solución a estos, dándole a la industrialización un enfoque medioambiental sostenible.

Mejorar la eficiencia energética de estos procesos es un punto clave para el desarrollo sostenible. Esto equivale a reducir los consumos a través de la implementación de medidas que garanticen una correcta gestión energética, así como incentivar la elaboración de proyectos que propicien el uso de fuentes renovables de energía.

Diversas son las fuentes energéticas con que cuenta la humanidad, pero su control y las formas de utilizarlas, representa el elemento que nos ha conducido al esquema energético global actual. El cual se basa en el empleo de los combustibles fósiles; que no son renovables, que son contaminantes en alto grado, concentrados en pocas regiones de la tierra, en manos de grandes consorcios transnacionales y utilizados de forma ineficiente e irracional (Rodríguez, 2003).

En el año 2018, la matriz energética mundial estaba formada por un 81,3 % de combustibles fósiles, 4.9% de energía nuclear y un 13,8 % de Fuentes Renovables de Energía (FRE) (IEA, 2020). El caso particular de Cuba la utilización de las FRE está por debajo del contexto internacional, el 95,7 % le concierne al uso de combustible fósil y el 4,3 % a FRE (Weiland, 2010).

Dentro de los procesos productivos altamente consumidores de combustibles fósiles está la producción y beneficio de arroz, en el que igualmente se genera una gran cantidad de residuos sólidos. El manejo o la disposición de los residuos de cosecha y de beneficio industrial, es una problemática aún por resolver en países grandes productores de arroz. Específicamente de la actividad agro-industrial del arroz se estima que a nivel mundial se tienen anualmente 731 millones de toneladas de paja arroz y más de 113 millones de toneladas métricas de cáscara (Santos, 2015). Para estas condiciones el uso de tecnologías ambientales como la producción de biogás cumple una doble función pues a través de ella, además de facilitarse la depuración o el tratamiento de residuales orgánicos biodegradables mediante un proceso biológico, se obtiene un gas con valor combustible, que adquiere altos niveles de utilización como recurso energético (Chandra et al., 2012). El biogás se considera una fuente renovable de energía versátil ya que puede reemplazar combustibles fósiles en la producción de energía, calor y combustible alternativo para vehículos (Weiland, 2010). En el caso de la cascarilla de arroz, como biomasa al fin, puede ser utilizada como combustible bien utilizando el método de combustión o gasificación. Según (Méndez, 2010) y (Navarro et al., 2016) las dos variantes aportan poder calórico para sustituir combustibles fósiles y resuelve el problema de la disposición final de este residuo, convirtiéndolo en una nueva materia prima.

En América Latina y el Caribe el arroz es una de las fuentes más importantes de calorías y proteínas, se producen treinta millones de toneladas de arroz en siete



millones de Ha anualmente con un rendimiento promedio de tres t/ha (León & Carreras, 2002). En Cuba el cultivo del arroz se ha extendido a casi todas las regiones del país y constituye la principal fuente de carbohidratos en la alimentación de la población, con un consumo aproximado de 670 000 toneladas al año y un per cápita nacional anual que supera los 70 kilogramos, mientras que el promedio mundial se encuentra por los 57 kilogramos (Díaz, 2011).

El grano de arroz es cosechado con un alto contenido de humedad, por lo que debe ser sometido a un proceso de secado que permita consumirlo de inmediato o almacenarlo por largos períodos de tiempo. La etapa de secado es el primer paso del proceso de beneficio industrial del arroz y a él le siguen las operaciones de limpieza, descascarado, blanqueo y clasificación que pertenecen al proceso de molinado del grano donde finalmente se obtiene el arroz consumo listo para entregar a la población. En la región central de Cuba, específicamente en la provincia Sancti Spíritus se encuentra una de las entidades mayores productores de arroz del país: la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro”. El beneficio industrial del arroz se realiza en 5 unidades. Una de estas unidades es el objeto de estudio de este trabajo y lo constituye la UEB Tamarindo.

La UEB Tamarindo, ubicada en el consejo Popular San Carlos, constituye un gran complejo industrial donde existen dos unidades de secado de arroz y un molino arrocero. Los dos secaderos existentes trabajan con tecnología Española Imad y Stein la primera con flujo continuo y la segunda discontinua y el molino con tecnología japonesa Seatake.

En el año 2018 la UEB Tamarindo procesó 27 521 ton de arroz cascara húmedo con un consumo diésel de 529 268 L y 1 431 899 kWh de electricidad. Datos que demuestran los altos consumos de portadores energéticos del proceso industrial de beneficios del arroz. Considerando que, según historial de la empresa, el residuo del secado oscila entre 4 y 7% del arroz cáscara húmedo y la cascarilla entre un 20 y un 25% del arroz seco entrado al molino, se puede estimar los grandes volúmenes de residuos sólidos que genera la unidad y que hoy no tienen una adecuada disposición final.

Cerca de la industria (menos de 1 Km) se encuentra la unidad porcina de igual nombre con capacidad para 5 000 cabezas y con disposición final de los residuos en una laguna de oxidación, estos pueden ser utilizados para un proceso de biogás.

Con estos antecedentes comenzamos nuestro estudio de impacto ambiental de alternativas energéticas sobre el proceso de secado del arroz.

- ✓ Objeto de estudio: Proceso de secado de arroz.
- ✓ Campo de acción: El impacto ambiental de las alternativas energéticas

Teniendo en cuenta las potencialidades de aprovechamiento de residuos agroindustriales de la zona se proponen una seis de alternativas de aprovechamiento energético.

De lo anterior se deriva siguiente interrogante, devenida en nuestro problema científico:

- ✓ Problema científico: ¿Cómo determinar la alternativa energética con menor efecto negativo sobre el medio ambiente para el proceso de secado en la UEB Tamarindo?
- ✓ Hipótesis: Si se realiza un análisis de ciclo de vida (ACV) a las alternativas energéticas propuestas, se podrá conocer cual tiene menor efecto negativo sobre el medio ambiente en la UEB Tamarindo.
- ✓ Objetivo General: Determinar la alternativa con menor efecto medioambiental en la UEB Tamarindo mediante un Análisis de Ciclo de Vida.
- ✓ Objetivos específicos:
  - Identificar los objetivos y el alcance del proceso de secado del arroz en la UEB Tamarindo
  - Desarrollar el inventario de ciclo de vida para las alternativas energéticas propuestas en la UEB Tamarindo
  - Determinar el impacto ambiental de las alternativas energéticas propuestas en la UEB Tamarindo.
  - Realizar estudio de sensibilidad con la alternativa energética de menor impacto sobre el medio y la variable de mayor incertidumbre.

## Capítulo I Marco teórico referencial

Cambio climático a nivel mundial, sus efectos en Cuba.

Efecto del uso de los combustibles fósiles en la en el cambio climático.

Producción de arroz en Cuba. Impacto ambiental de la producción de arroz.

Tendencia al uso de las FRE. Su aplicación en la producción de arroz.

La cascarilla de arroz como combustible.

Herramientas de evaluación de impacto ambiental

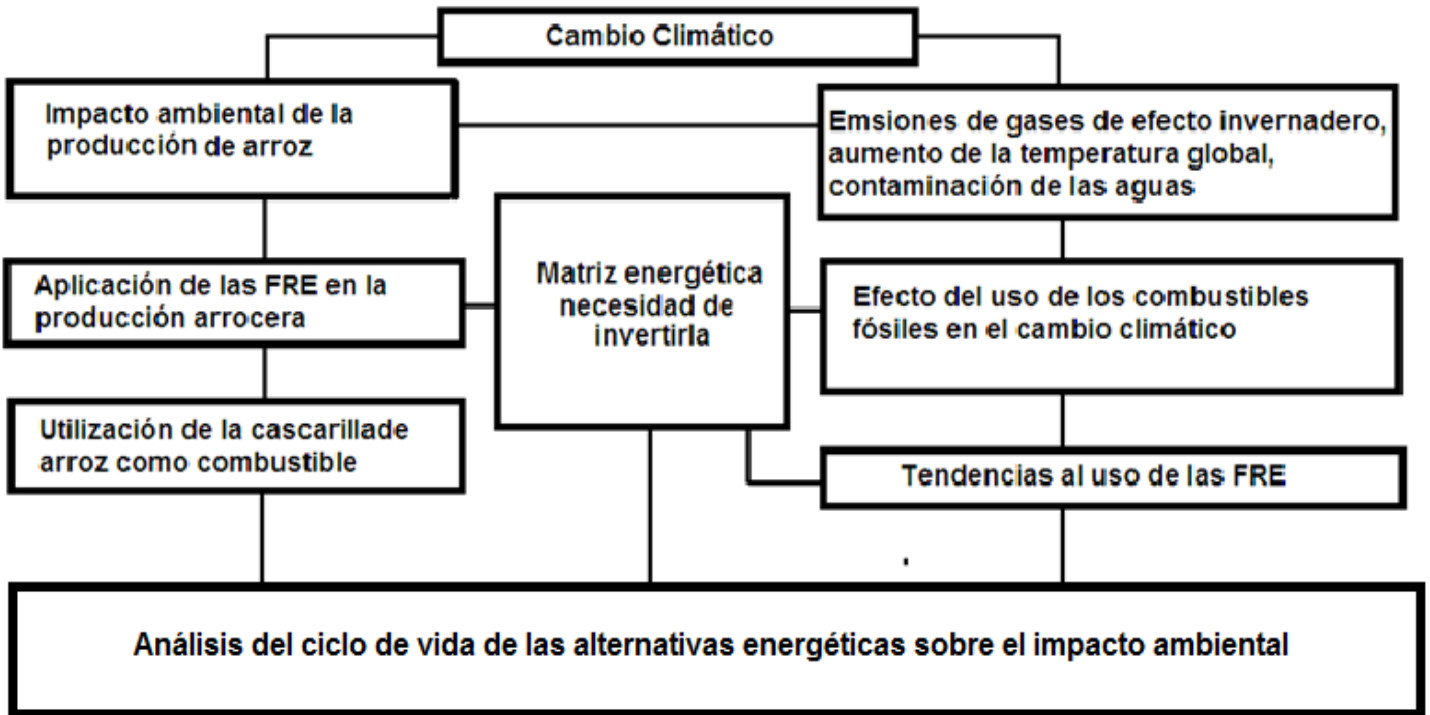


Fig. 1 Hilo conductor del marco teórico referencial. Elaboración propia.

### 1.1- Cambio climático a nivel mundial, sus efectos en Cuba.

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC, 2005), en su artículo 1, define el “cambio climático” como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ((IPCC), 2007), el término como tal denota un cambio en el estado del clima identificable (por

ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Sin embargo (Miller, 2007; Wasserman et al., 1965), sostiene que el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas.

El cambio climático puede deberse a procesos naturales internos o debido acciones externas, o a cambios generados por los seres humanos, de forma duradera, en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra.

En su vida la tierra ha pasado por diferentes etapas marcadas por características climáticas, alguna de ella extremas como las glaciaciones que ocurrieron independientemente a la existencia del hombre. En los últimos años del siglo XX y lo que va del XXI las condiciones climáticas han variado notablemente: Períodos de prolongadas sequías, intensas lluvias e inundaciones, aumento de la intensidad y cantidad de huracanes (Aunque no existe una evidencia concluyente, desde 1970, existen una preponderancia en los huracanes tropicales hacia períodos de vida más largos y de mayor intensidad. La cantidad de huracanes en el Atlántico Norte se comportó por encima de lo normal (basado en 1981–2000) en nueve de los diez años del período de 1995 a 2005) ((IPCC), 2007). Aumentó de la temperatura media global (La tendencia lineal a cien años (1906-2005), que es de 0.7 [entre 0.56° C y 0.92° C] es más acentuada que la indicada por el TIE, que era de 0.6 [entre 0.4° C y 0.8° C] (1901-2000) ((IPCC), 2007).Grandes derretimientos de los casquetes polares (Los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que, en promedio anual, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2.7 [entre 2.1 % y 3.3% la extensión máxima de suelo estacionalmente congelado se ha reducido en torno a un 7% en el Hemisferio Norte, con disminuciones de hasta un 15% durante la primavera.]), ((IPCC), 2007)., el incremento del nivel del mar (Los técnicos se han basado en los registros del caudal de las mareas, después de realizar correcciones por movimientos verticales de tierra, la elevación anual media durante el siglo XX estuvo entre 1 y 2 mm) (IPCC, 2007) son algunos ejemplos de ello.

Las predicciones de los expertos no son alentadoras, se avizoran efectos más nocivos para el planeta y en especial para los países subdesarrollados y en vías de desarrollo,

los cuales sufrirán más estas consecuencias, aun cuando estos son los que menos han influido en las causas del cambio. En el Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008, el IPCC pronosticó:

- ✓ Potenciales cambios de temperatura superiores a los 5° C en el periodo que va desde 1990 hasta 2100. El ritmo de calentamiento es muy probable que sea el mayor a lo previsto.
- ✓ Se espera un aumento de las precipitaciones, así como de sus variaciones anuales, sobre todo en medias y altas latitudes del hemisferio Norte y en el invierno antártico, así como disminución en otras latitudes
- ✓ Se espera un incremento en la magnitud de ciertos fenómenos extremos.
- ✓ En el hemisferio Norte se prevé una reducción aún mayor de la cobertura nivosa y de los hielos marinos, así como de los glaciares y otras capas de hielo. La capa de hielo antártico es probable que aumente de masa mientras que es probable que se reduzca la de Groenlandia.
- ✓ Se espera que el nivel del mar se eleve entre 9 y 88 cm. de 1990 a 2100, a causa principalmente de la expansión térmica y de la pérdida de hielo. Esta variabilidad tan grande en la estimación se debe a incertidumbres en los modelos asumidos por los expertos.

Cuba es una isla situada en Caribe y un país en vías de desarrollo por lo que sentirá con fuerza las consecuencias del cambio climático. Los largos periodos de sequía, el aumento de las temperaturas medias, mayor afectación por los huracanes y el aumento del nivel del mar son un ejemplo de esto.

Aun cuando la industrialización del país es baja y no aporta emisiones significativas de gases de efecto invernadero, Cuba desde la convención Rio 92 siempre ha estado insertada en el movimiento mundial por la lucha contra el cambio climático. En 1997 se hace miembro de la Comisión Marco sobre Cambio Climático (CMCC). En el año 2012, se constituye en Cuba la Comisión Gubernamental para atender el "Uso y Desarrollo de las Fuentes Renovables de Energía y la Eficiencia Energética, y en junio de 2014 se elaboró la Política de Eficiencia, Energía y Fuente Renovable de Energía hasta el año 2030, en la cual se propone reducir la matriz energética en relación al uso de combustibles fósiles a un 86 % e incrementar a un 14 % las FRE (Moreno, 2014). Lograr el cambio de la matriz energética para alcanzar una mayor autonomía es de

interés gubernamental lo que queda plasmado en los lineamientos 37, 113, 131, 133, 218 y 247, que regulan la política económica y social del país, para potenciar el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía, priorizando las de mayor efecto económico.

En consecuencia, con esta política, las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O desde 1990 hasta 2014 han disminuido, así como las emisiones totales. Por otra parte, se nota un aumento de las emisiones de CH<sub>4</sub> en igual período, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1 Emisiones brutas de gases de efecto invernadero en Cuba (Centro de Gestión de la Información Económica, 2018).

#### 1.2- Efecto del uso de los combustibles fósiles en el cambio climático

Gas de efecto invernadero	U/M	Año 1990	Año 2014
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	gg	34495.95	29415.52
Óxido Nitroso N <sub>2</sub> O	gg	22.75	11.19
Metano CH <sub>4</sub>	gg	371.61	442.94

El vertiginoso desarrollo mundial ha estado marcado por la explotación y consumo de los combustibles fósiles (grandes reservas de carbono acumuladas en el subsuelo durante milenios) rompiendo así el ciclo del carbono, aumentando fuera de los límites naturales las concentraciones en la atmósfera de dióxido de carbono, gas, principal causante del efecto invernadero. Según Guía de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC, 2005)) y el Protocolo de Kioto (edición revisada, 2005). Son muchos los gases que provocan el efecto invernadero, pero se hace hincapié en los seis principales, que son los siguientes:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)

Se estima que los tres primeros explican el 50, el 18 y el 6 por ciento, respectivamente, del efecto global de calentamiento mundial derivado de actividades humanas. (CMCC, 2005).

Las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> Y N<sub>2</sub>O están vinculadas principalmente a la combustión de combustibles fósiles, al igual que los óxidos de azufre (SO<sub>2</sub> Y SO<sub>3</sub>) estos dos últimos son los principales causantes de las lluvias ácidas.

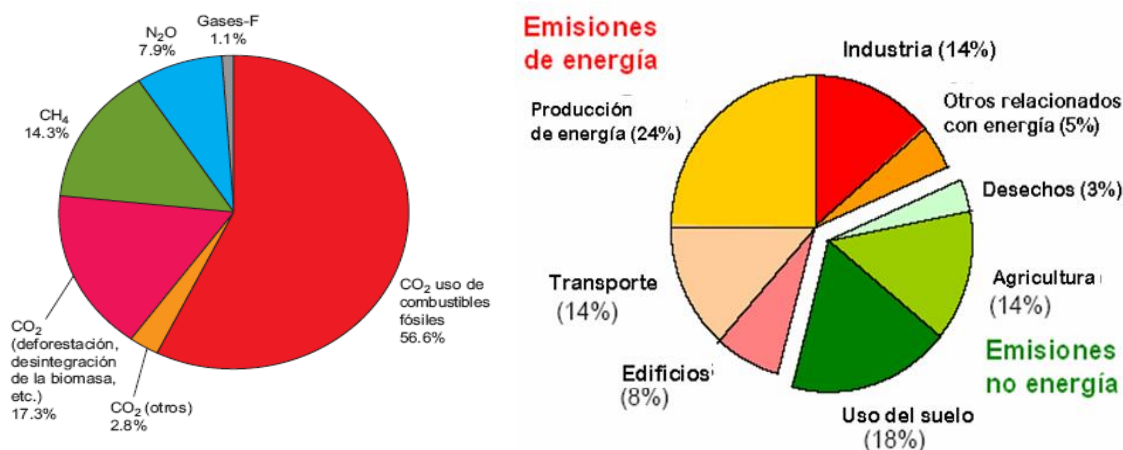


Fig.2 Proporción en la atmósfera de gases de efecto invernadero (manual de contaminación ambiental 2010)

La Cumbre de Poznan, Polonia, 2008, consideró que el cambio climático se debe, principalmente a la emisión de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles. Mientras que el *Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008* sostiene que el calentamiento pone en evidencia que sobrepasamos la capacidad de carga de la atmósfera del planeta, Las actuales concentraciones han alcanzado el equivalente a 380 partes por millón (ppm) de dióxido de carbono, cifra que supera el rango natural de los últimos 650,000 años, 310 ppm (Díaz, 2011).

### 1.3 Producción de arroz en Cuba. Impacto ambiental de la producción de arroz.

El cultivo del arroz se lleva a cabo en 113 países y constituye el alimento básico para más de la mitad de la población mundial. Entre los principales productores se encuentra la India, China, Indonesia, Bangladesh, Tailandia, Viet Nam y Japón, con 161 420 millones de hectáreas cultivadas en el 2009 (Chandra et al., 2012). Se

considera el tercer cultivo agrícola de importancia mundial en términos de área total cultivada y de producción.

El aumento de las emisiones de metano está en correspondencia con el aumento de la producción agrícola y ganadera desde 1990 hasta el 2020 debido principalmente a la descomposición de los residuos. Según (Navarro et al., 2016) el cultivo del arroz en condiciones de aniego es responsable del 15-20 % de las emisiones totales de metano. Otros sectores, que también han aumentado las producciones, como las ganaderas y agrícolas generan grandes volúmenes de residuos que al descomponerse contribuyen con las emisiones de CH<sub>4</sub>. De aquí que en nuestro país las emisiones totales de gases de efecto invernadero disminuyen y solo aumenta la emisión de metano, como muestra la tabla 1. Otros autores como (Contreras, 2013) y (Peralta, 2016) coinciden con que la producción de arroz es responsable de un 10-15% del metano emitido a la atmósfera. Durante el proceso agroindustrial de producción del arroz se generan cantidades significativas de residuos sólidos: 1,3 t de paja; 0,04 t de residuos del proceso de secado y 0,22 t de cáscara de arroz por tonelada de arroz húmedo que entra al proceso (Linares & Meneses, 2011). Aunque una pequeña parte de estos residuos se utilice, principalmente como alimento animal o cama de avicultura, la mayor parte es incinerada a cielo abierto emitiendo grandes volúmenes de gases a la atmósfera, con el consecuente impacto, además, sobre el suelo que se erosiona y degrada por las altas temperaturas, las aguas superficiales y el aire del entorno que son contaminados con cenizas y humos. Según (Contreras, 2013) la paja de arroz en muchas ocasiones es incorporada al suelo en el proceso de preparación de tierra en aniego (fangueo) incidiendo en la generación de metano y provocando un alto consumo de oxígeno del suelo.

Otro impacto negativo de la producción arroceras está dado por elevado consumo de portadores energéticos, tanto del proceso agrícola como el industrial. Causante de significativos volúmenes emisión de gases de combustión.

Tabla 2. Consumo directo de portadores energéticos (Linares, 2017)

Proceso	Diésel (L/T arroz húmedo-sucio)	Electricidad (kW/t arroz )
Agrícola	28-30	-
industrial	13-18	66-71



Otros daños al medio ambiente en el proceso de producción de arroz son:

- ✓ Deforestación y erosión de los suelos por las siembras intensivas
- ✓ Salinización de los suelos por el alto consumo de agua y los aniegos permanentes.
- ✓ Contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por las grandes aplicaciones de agroquímicos y pesticidas.
- ✓ Pérdidas de la biodiversidad por el uso continuo de insecticidas.
- ✓ Contaminación del aire con polvillo en la industria.

#### 1.4- Tendencia al uso de las FRE. Su aplicación en la producción de arroz.

Se denomina fuentes renovables de energía a las que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre ellas se cuentan la energía eólica, la geotérmica, la hidráulica, la mareomotriz, la solar, la undimotriz, la biomasa, y los biocombustibles.

A pesar del inminente agotamiento de los combustibles fósiles y del conocimiento de su negativo impacto ambiental, hoy día comprenden más del 80% de la matriz energética mundial. Las FRE, con el alto potencial para su aprovechamiento y muy bajo impacto sobre el medio, apenas forman parte del 13.8%. Como muestran la tabla 3 y la figura 3 Tabla No 3. Resumen duración de las reservas de Carbón, Petróleo y Gas Natural, según datos de reservas probadas y producción mundial del año 2014.

Según datos 2014		Reservas mundiales	Producción por años	Años de duración de la reserva
Petróleo	Millones de barriles	1700057.7	32365.5	52.5
Gas	Km <sup>3</sup>	187073.8	3460.6	54.1
Carbón	Millones de toneladas	891531.0	8164.9	109.2

Desde 1990, la utilización de las fuentes renovables de energía en el mundo, han crecido a un ritmo anual promedio del 1,7%. El crecimiento ha sido especialmente alto para las fuentes renovables “nuevas” (eólica, solar), que crecieron a un ritmo anual del 19%, y la mayor parte del incremento fue en los países de la Organización para el comercio y el desarrollo económicos (OCDE), con grandes programas de energía eólica en los países como Dinamarca y Alemania (OCDE/AIE, 2015).

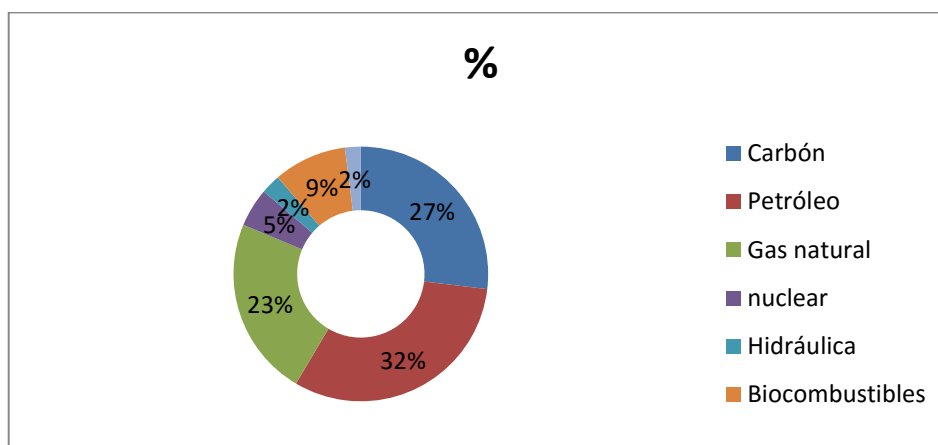


Fig. 3 Consumo mundial de energía primaria 2020. Fuente: (IEA, 2020).

Las conversaciones sobre el cambio climático indudablemente han estimulado el desarrollo de las fuentes renovables de energía para poder reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los Países Signatarios de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2020).

#### 1.4.1- Aplicación de las FRE en la producción arrocerá.

En la literatura revisada se encuentra abundante información sobre la utilización de la cascarilla de arroz como combustible, utilizando los métodos de combustión o gasificación, aprovechando su poder calórico para el proceso de secado del arroz o para generar electricidad para el propio proceso, para la etapa del molinado y exportación del sistema. Según (Quinceno, 2010) el aprovechamiento del calor generado por la combustión o gasificación de la cascarilla, eliminando su incineración a cielo abierto evitaría el consumo de combustibles fósiles convencionales y provocaría variación en las concentraciones de los gases emitidos a la atmósfera.

En la gasificación de la cáscara del arroz se convierte un combustible sólido en uno gaseoso, que tiene varias posibilidades de aprovechamiento: Puede quemarse en

quemadores de calderas o secaderos para la producción de energía térmica. Con un adecuado tratamiento el gas de síntesis es un combustible apto para motores o turbinas de gas, equipos generalmente empleados para la producción de energía térmica y eléctrica. Cuando la potencia instalada en motores o turbinas es suficientemente alta, existe la posibilidad de aprovechar los gases de escape en un ciclo combinado. En cuanto al rendimiento en la generación de energía eléctrica, hay mucha variabilidad de datos, pero puede considerarse que para generar 1 kWh. es necesario emplear 2,8 kg de cascarilla de arroz. (Sierra, 2009), (López et al., 2019) con relación de 0.36 kWh/kg cascarilla.

Otros autores se refieren la generación de biogás a partir de la cascarilla, pero la mayoría coinciden que este sustrato es de muy difícil biodegradabilidad.

Más recientemente, se estudia la digestión anaerobia de la paja de arroz. Según (Contreras, 2013) concluye que es factible la generación de electricidad a partir del biogás generado teniendo como base del sustrato la paja de arroz y a su vez el aprovechamiento del calor en la cogeneración para el proceso de secado. Con los siguientes índices:

Índice de generación eléctrica:  $2.23 \text{ kWhm}^{-3}$

Índices de generación térmica:  $3.32 \text{ kWhm}^{-3}$

El estudio realizado por (López et al., 2019) sobre la codigestión de residuos del secado y residuos porcinos en diferentes proporciones arrojó rendimientos superiores a lo esperado

Tabla 4- Rendimiento de metano experimental y esperado y efecto de la mezcla (López et al., 2019)

Mezcla*	yCH <sub>4</sub> (LCH <sub>4</sub> /kgSV)		yCH <sub>4</sub>	Efecto mezcla
	Experimental	Esperado		
RS <sub>100</sub> :RP <sub>0</sub>	332.63	332.63	1	
RS <sub>0</sub> :RP <sub>100</sub>	488.87	488.87	1	
RS <sub>98</sub> :RP <sub>2</sub>	325.05	335.75	-3.2	No hay efecto
RS <sub>95</sub> :RP <sub>5</sub>	401.20	340.44	17.8	Efecto sinérgico

Estos dos últimos casos demuestran las potencialidades, aún por aplicar, para la utilización de los residuos arroceros como portadores energéticos dentro del proceso de beneficio industrial arroz.

Según Programa General para el Desarrollo local en el uso del BIOGÁS como fuente energética y de disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus (Spíritus, 2020), en el municipio la Sierpe existe un potencial para generar 22394 m<sup>3</sup>/día de biogás a partir de los residuos arroceros. Lo que le ahorraría 13205 litros de diésel por día. En el caso del centro porcino Tamarindo el potencial de producción de biogás es de 466m<sup>3</sup>/día que podrían sustituir 275 litros diarios de diésel.

## **1.5 La cascarilla de arroz como combustible**

### **1.5.1 Combustión de la cascarilla:**

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por Celulosa y Sílice, elementos que ayudan a su buen rendimiento como combustible. El uso de la cascarilla como combustible representa un aporte significativo a la preservación de los recursos naturales y un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas, en la producción de arroz, uno de los principales cereales de nuestra canasta familiar. (Valverde et al., 2007). En las siguientes tablas se brindan algunos datos energéticos de la cascarilla.

Tabla No 5 Comparación del poder calorífico de la cascarilla de arroz frente a otros combustibles (Quinceno, 2010)

Combustible	Poder calorífico (kcal/kg)
Cascarilla de arroz	3650
Cascarilla de café	4251
Bagazo húmedo	2335
Bagacillo	3142
Tuza de maíz	5225
Carbón	7000
Petróleo	7800
Leña verde 30% humedad	2500

Tabla No 6 toneladas equivalentes cascarilla de arroz frente a combustibles fósiles  
(Quinceno, 2010)

Combustible (1ton)	Poder calorífico (kcal/kg)	Toneladas equivalentes cascarilla de arroz
Cascarilla de arroz	3650	1
Diésel	7800	2.45
Carbón Mineral	11200	4.14
Gas natural	13265	3.50

Tabla No7 Comparación del proceso de combustión de la cascarilla de arroz y el  
carbón. (Quinceno, 2010)

CONCEPTOS	Carbón	Cascarilla
Temperatura de los productos de combustión al salir del hogar	649°C	593°C
Temperatura de los productos de combustión a la entrada al ventilador	323 °C	204 °C
Porcentaje CO2 de los productos	14.5%	13.75%

Ventajas del uso de la cascarilla de arroz como combustible en el secado de arroz

- ✓ Aún, cuando tiene menor poder calorífico que los combustibles fósiles se oxida entre 1000-1200 °C y los gases de combustión suplen las necesidades energéticas del secado.
- ✓ Debido al bajo su bajo contenido de N<sub>2</sub>, minimiza las emisiones de N<sub>2</sub>O.
- ✓ Las emisiones de dióxido de azufre son nulas.
- ✓ Los subproductos sólidos de la combustión (cenizas) tienen un valor comercial.
- ✓ Evita el consumo de combustibles fósiles.
- ✓ Contribuye a mejorar las condiciones energéticas del país.

### 1.5.2- Gasificación de la cascarilla de arroz

Los sistemas de gasificación de biomasa operan mediante el calentamiento y posterior craqueo térmico de las partículas sólidas, formando un gas combustible denominado gas de síntesis o syngas, que se limpia y filtra, para luego combustionarse en un modo simple o en un ciclo combinado (Torres et al., 2014). Se considera que el gas producido tiene un bajo o medio poder calorífico (1.000 - 3.000 kCal/ Nm<sup>3</sup>) si es comparado con el gas natural (9.000 kCal/Nm<sup>3</sup>>) o el butano (28.000 kCal/Nm<sup>3</sup>) (Valverde et al., 2007).

La biomasa debe tener una humedad menor que 35%, siendo las óptimas las menores del 15%. En el caso de la cascarilla de arroz es ideal pues esta tiene una humedad de entre 10-11%. El agente gasificante puede ser vapor de agua, oxígeno, aire, o una mezcla de los anteriores, logrando un suministro de O<sub>2</sub> de entre el 25-35% del estequiométrico (Sánchez, 2017). La temperatura de operación está entre 700-1500 °C. Los gasificadores utilizados pertenecen a dos grupos: Los de lecho fijo y los de lecho fluido. El gas resultante es una mezcla de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y vapor de agua, sus concentraciones estarán en dependencia de la biomasa utilizada, el agente gasificante suministrado, la relación de alimentación entre estos y la tecnología utilizada según (Torres 2014).

Tabla 8: Composición y uso del gas de síntesis en función al agente gasificante (Sánchez, 2017)

Agente gasificante	Poder calorífico(MJ/ Nm <sup>3</sup> )	Composición del gas obtenido (%Vol.)						Uso final
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	C	
Aire	Menor que 6	16	20	12	2	50	-	Combustible
O <sub>2</sub>	10-20	32	48	15	2	3	-	Combustible, gas síntesis
Vapor agua	10-20	50	20	22	6	-	2	Combustible, gas síntesis
H <sub>2</sub>	Menor que 30							Sustituto de gas natural.

Ventajas del uso del gas de síntesis según (Fernández, 2019)

- ✓ Balance de emisiones de CO<sub>2</sub> nulo, esto es debido a que durante el proceso de combustión del gas de síntesis se emite una cantidad de dióxido de carbono equivalente a la absorbida por la biomasa durante el proceso de la fotosíntesis.
- ✓ Plantas de pequeño tamaño (<5 MW) técnica y económicamente viables, con lo que se favorece la generación distribuida y la consiguiente reducción de las pérdidas por transporte de electricidad.
- ✓ Disponibilidad de la biomasa in situ. La ubicación de las plantas de generación junto a las fuentes de biomasa repercute en un ahorro en los costes de transporte.
- ✓ Aprovechamiento de los residuos. Muchas de las plantas llevan a cabo el proceso de gasificación a partir de la biomasa producida como residuos de un proceso industrial o agrícola, con lo que se facilita su eliminación y, además, contribuye a minimizar el impacto medioambiental.
- ✓ Costes de la biomasa mínimos, especialmente por tratarse de un residuo, lo que supone la revalorización energética de un combustible a muy bajo precio.
- ✓ Versatilidad del gas, ya que puede alimentar turbinas de vapor, motores de combustión interna, calderas y quemadores para intercambio de calor.
- ✓ Operación y mantenimiento sencillos.

Desventajas del uso del gas de síntesis según (Fernández, 2019)

- ✓ Es necesario adecuar el gasificador al combustible a emplear para lograr optimizar su funcionamiento.
- ✓ El gas de síntesis contiene alquitranes y restos en forma de cenizas, lo que implica un lavado y acondicionamiento previos.

## **1.6- Herramientas de evaluación de impacto ambiental**

### **1.6.1- Análisis Ciclo de vida**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta para evaluar los impactos potenciales sobre el ambiente atribuibles al ciclo de vida completo de un producto, proceso o actividad (Rieznik & Aja., 2005). Dentro de los impactos se pueden mencionar el cambio climático, la eutrofización, la acidificación, la erosión de la capa de ozono, el estrés toxicológico sobre la salud humana y de los ecosistemas, etc. El

estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de (I) extracción y procesado de materias primas; (II) producción, transporte y distribución; (III) uso, reutilización y mantenimiento; y (IV) reciclado y disposición del residuo. Permite planificar y generar estrategias para alcanzar beneficios comerciales con un criterio ambiental, es decir lograr producciones más limpias (P+L). El ACV está incorporado a la familia de Normas ISO 14000 (14040, 2006), que provee de homologación y transparencia internacional. Es un método ampliamente difundido en todo el mundo, y en los países desarrollados cobra cada vez mayor importancia para la gestión ambiental de productos, actividades o servicios. (M & Valeiro, 2015)

La norma ISO 14040:1997 establece que “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto o proceso, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto, en relación con los objetivos del estudio”. La metodología considera una serie de fases de trabajo interrelacionadas, que siguen una secuencia más o menos definida, aunque en ocasiones es posible realizar un estudio notan ambicioso obviando alguna fase.

De acuerdo con la ISO14040, el ACV consta de cuatro fases: definición de los objetivos y el alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados. Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos, son la segunda y la tercera. Las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido. El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza. (Trama & Trojano, 2002)

Según (Romero, 2003) La principal función del ACV es la de brindar soporte para tomar las decisiones que se relacionan con productos procesos o servicios; y más específicamente, la de conocer las posibles consecuencias ambientales relacionadas con el uso de un producto la ejecución de un proceso o con la configuración y utilización de un servicio. Las organizaciones consideran benéfico conocer, con el mayor detalle posible, los efectos (aunque sean involuntarios) que sus productos, servicios o actividades podrían causar en el medio ambiente; en especial, los que



provoquen impactos ambientales significativos adversos, para atender a las responsabilidades legales, sociales y políticas que ellos implican, además de las pérdidas económicas y de imagen empresarial. El ACV, realizado de acuerdo con los procedimientos estipulados en la serie de normas ISO14040, es una herramienta de gestión ambiental que brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental y que sigan realizando igualmente la función para la que fueron programados.

El ACV no sólo es un instrumento para proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales, sino un instrumento empresarial para reducir costos y mejorar posiciones en el mercado. El ACV es una poderosa herramienta de gestión ambiental que puede ser de suma utilidad para ayudar en la toma de decisiones por parte de quienes tienen a su cargo los destinos de las empresas, ya sea que se emplee sola o conjuntamente con otras herramientas tales como la evaluación del riesgo y la evaluación del impacto ambiental. (Romero, 2003)

Fases para la implementación de análisis de ciclo de vida (ACV)

#### 1) Definición de objetivos y alcance del estudio

Es la primera fase del estudio en que en ella se establecen las bases sobre las cuales se construirá el resto del ACV: la definición del propósito del estudio, la definición del ámbito del estudio, el establecimiento de una unidad funcional y el establecimiento de un procedimiento para garantizar la calidad de los datos. El alcance incluye el sistema de producción a estudiar, las funciones del sistema de producción, los sistemas involucrados (en el caso de estudios comparativos), la unidad funcional, los procedimientos de asignación, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación e interpretación de impactos, los datos requeridos, las suposiciones e hipótesis utilizadas, las limitaciones, la calidad de datos iniciales requeridos, el tipo de revisión crítica y el tipo y el formato del informe final (Sarduy, 2016)

El propósito inicial de una unidad funcional es proveer la referencia respecto a la cual las entradas y salidas serán relacionadas. Los límites del sistema definen la unidad de

producción a ser incluida en el sistema. Idealmente, el sistema de producción debe ser elaborado de tal manera que las entradas y salidas, así como los límites, sean flujos elementales (Panichelli, 2006).

## 2) Análisis de inventario de Ciclo de Vida (AICV)

La segunda fase es el análisis del inventario, incluye la recolección de datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes y las corrientes internas del sistema de producción. El AICV es la base para realizar evaluaciones comparativas de impactos ambientales e identificar oportunidades de mejora. En un AICV se genera una lista con las cantidades de contaminantes relacionadas con el medio ambiente y la cantidad de materia y energía consumida. Para facilitar y clarificar el estudio, se divide el sistema en diversos subsistemas (adquisición de recursos, fabricación, uso, gestión de residuos y transporte entre etapas), y los datos que se obtienen quedan agrupados en diversas categorías dentro de una tabla de inventario.

## 3) Evaluación de impacto de Ciclo de Vida (EICV)

La tercera fase es la evaluación de impacto ambiental, es un proceso que busca identificar y caracterizar los efectos sobre el medio ambiente del objeto de estudio, utilizando los resultados obtenidos durante la fase de inventario.

## 4) Fase de interpretación

La interpretación del ciclo de vida es la fase del ACV, en la cual se resumen los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto. La fase de interpretación brinda resultados que deben ser consistentes con la meta y el alcance, que permitan conclusiones, que expliquen las limitaciones y provean recomendaciones.

## **Capítulo II. Materiales y métodos.**

### **2.1- Descripción del proceso de análisis del ciclo de vida**

En el presente capítulo se muestran los aspectos metodológicos para la implementación del análisis de ciclo de vida como herramienta para evaluar el impacto ambiental. Se cumplieron los requerimientos de las normas de control (14040, 2006)

Para ello:

Se definen el objetivo, el alcance y las fronteras del estudio.

Se Describe del proceso de secado del arroz.

Se prevén las principales limitaciones y suposiciones.

Se realiza el inventario de ciclo de vida para cada alternativa.

Se Evalúa el impacto de ciclo de vida.

Se Valoran las alternativas de mejoras.

### **2.2- Aplicación de la metodología de análisis del ciclo de vida**

#### **2.2.1 Definición de objetivo, alcance y fronteras del estudio**

##### Objetivos

El ACV se aplica en la industria arrocera UEB "Tamarindo" en su proceso tecnológico de secado de arroz con el objetivo de determinar la alternativa con menor efecto negativo sobre el medio ambiente mediante un Análisis de Ciclo de Vida. Para ello se tomaron los datos referidos a noviembre de 2019 recogidos en los documentos primarios de la UEB.

##### Alcance

Para determinar el alcance del estudio se tomó como unidad funcional el secado de trescientas toneladas (300 t) de arroz cáscara húmedo, en el secadero "Tamarindos", durante cinco (5) días. La Unidad Funcional (UF) es el elemento clave del ACV que describe la función principal del sistema estudiado, de esta forma, la UF proporciona una referencia para todas las entradas y salidas, permitiendo la comparabilidad de los resultados entre sistemas similares (Brentrup et al., 2004).

##### Fronteras del sistema

Las fronteras del sistema son aquellos criterios que determinan qué procesos y etapas del sistema se incluyen dentro del ACV y cuáles no (ISO14040, 2006). En nuestro trabajo se consideró el proceso del secadero de arroz *Stein* de la UEB "Tamarindo",

que incluye las etapas de pesaje, recibo, limpieza, y secado. Además, se considera dentro de las fronteras el horno a base de cascarilla para el secado y un sistema de horno, caldera, turbina y generador para la producción de energía eléctrica. Como muestra la Fig 5

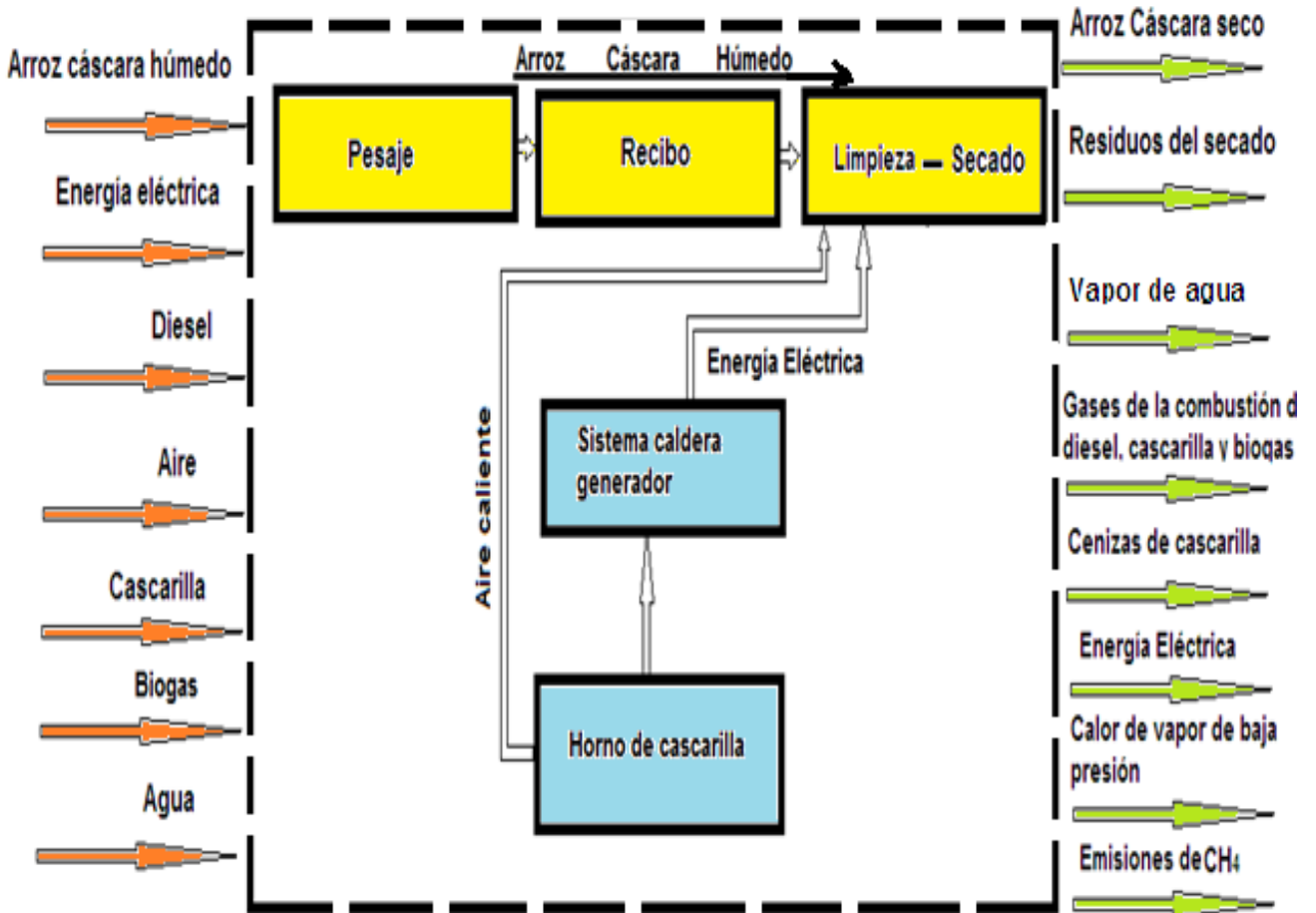


Fig. 5 Límites del sistema.

## 2.2.2 Descripción del proceso secado.

Diagrama de flujo del secadero Stein

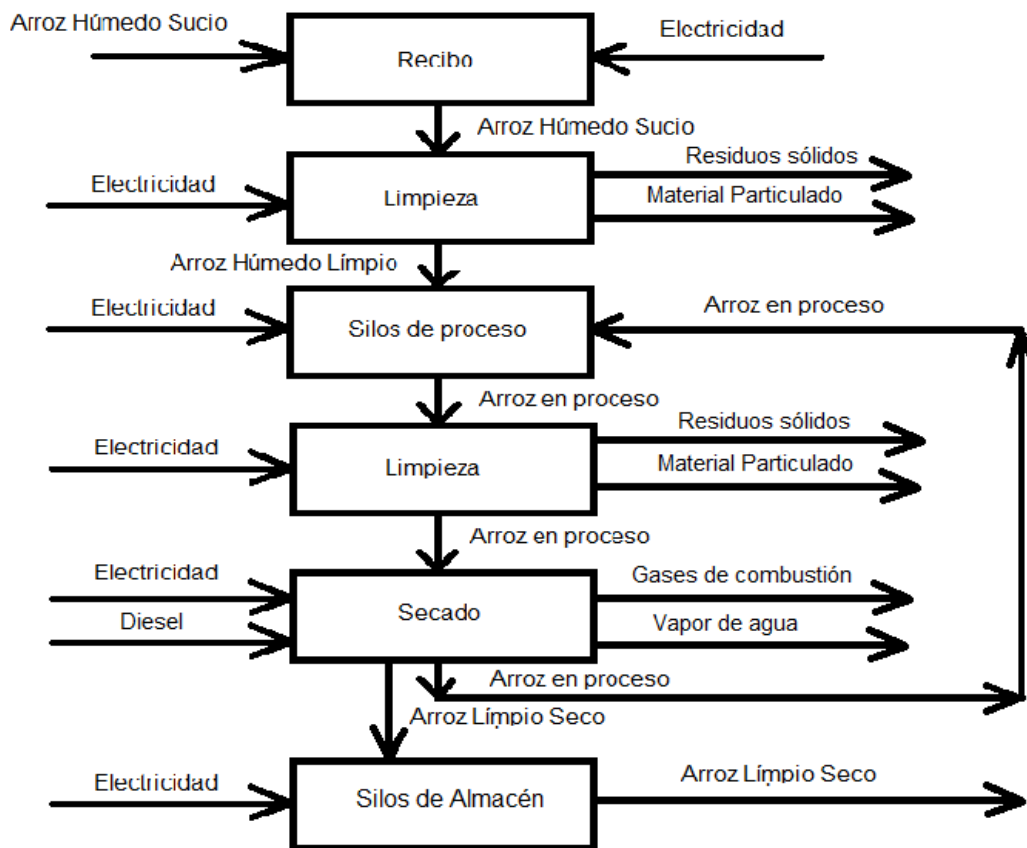


Fig. 6 Diagrama de flujo del proceso de secado.

El arroz cáscara húmedo procedente de campo llega a la industria en remolques que son pesados, constituyendo la primera actividad. Esta materia prima, que inicialmente tiene altos valores de impurezas y humedad pasa al área de recibo. Donde se toman muestras del producto y se determina experimentalmente sus grados de humedad e impurezas pasando al área de limpieza.

Este proceso consta de un tamizado doble con el objetivo de separar las impurezas de mayor y menor tamaño que el grano de arroz cáscara húmedo, acompañado a un proceso de venteado donde se extraen las impurezas menos pesadas que el grano. Se considera impurezas todo lo que entra al proceso que no sea el grano de arroz cáscara húmedo, así por ejemplo: restos de tallos y hojas, granos pelados partidos y enteros, granos vanos, semivanos y verdes lechosos, semillas extrañas, tierra entre otras. Por lo

general, el arroz húmedo sucio procedente del campo entra al proceso con un nivel de impurezas que oscila entre 12-17 % de su peso y termina con valores de entre 8-10%. Las impurezas separadas de proceso se denominan residuos sólidos o residuos del secado y son aproximadamente entre el 5-7% en peso del arroz húmedo sucio procedente del campo. Actualmente estos residuos se acumulan en un silo de donde se extraen, una parte para su utilización como complemento de alimento animal por los campesinos de la zona y la otra se vierte en el campo donde se incinera a cielo abierto provocando emisiones a la atmósfera, generando cenizas que contaminan los suelos y el agua del medio cercano.

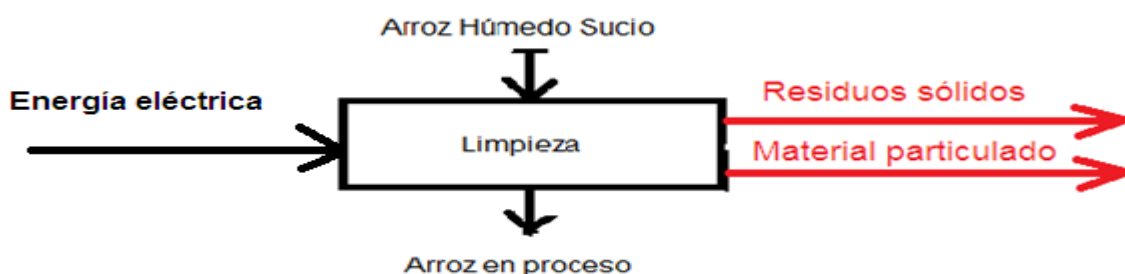


Fig.7 Etapa de limpieza.

Este arroz en proceso pasa a la etapa de secado, el secadero Stein trabaja en forma discontinua (por pases) a la entrada de cada pase al secador se realiza un proceso de limpieza donde se logra extraer aproximadamente un 1% en peso de residuos por cada pase. En la torre de secado se elimina alrededor de 2% en peso de agua por cada pase realizado. Al concluir esta etapa que oscila entre 2 y 5 pases, a razón de un pase por día, se obtiene el arroz cáscara seco que tiene una humedad de entre 11-13% masa. Y una impureza de entre 8-10% masa. Este producto terminado se almacena hasta que pase, después de un periodo no fijo, a la etapa de molinado.

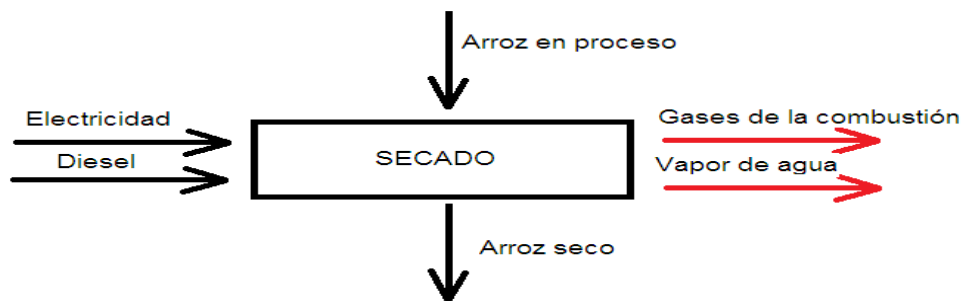


Fig.8 Etapa de secado.

En el año 2018 la UEB Tamarindo procesó 27 521 toneladas de arroz cáscara húmedo generando alrededor de 1 700 toneladas de residuos del secado y 4 400 toneladas de cascarilla del proceso de descascarado. Estos procesos, además, son altos consumidores de portadores energéticos, fundamentalmente electricidad y diésel.

### **2.2.3 Principales limitaciones y suposiciones.**

- ✓ Asumir que el secadero trabaja con 3 lotes diarios.
- ✓ Considerar que los tres lotes trabajan en igualdad de condiciones
- ✓ La densidad del diésel es variable. Se asumen los datos de la EAIG S.J. de densidad 0.841 kg/L y un factor de conversión 1.188,78 L/t con fórmula química:  $C_{12}H_{26}$
- ✓ El residuo del secado es igual en todas las alternativas, por lo que es descartable.
- ✓ Considerar, según estudio de potencial de biogás de la Universidad José Martí, que en el porcino Tamarindo se generan 466 m<sup>3</sup>/día. Esta cantidad cubre la demanda del secadero, las pérdidas del proceso y su consumo de electricidad.
- ✓ Asumir el 4% de pérdidas del biogás producido.
- ✓ Los flujos para la caldera se toman de bibliografía (López, 2019) con relación de 0.36 kWh/kg cascarilla, para las condiciones de operación necesarias.

### **2.2.4. Definición de las alternativas energéticas a evaluar.**

**Alternativa 1 (A-1):** Condiciones actuales (consumo de diésel y electricidad para el secado de los 3 lotes).

**Alternativa 2 (A-2):** Sustitución de 1/3 del diésel del secado por el biogás que puede generar el centro porcino.

**Alternativa 3 (A-3):** Sustitución del 100% del diésel de secado por el calor que se pudiera obtener con la combustión, en un horno, de cascarilla de arroz.

**Alternativa 4 (A-4):** Sustitución del 100% del consumo de electricidad de la red nacional por la que se pudiera generar con una caldera de vapor a base de cascarilla.

**Alternativa 5 (A-5):** Simultanear las alternativas A-3 y A-4 para sustituir el 100% del diésel y el 100% de la electricidad en el secado, por la energía que se pudiera obtener a partir de la quema de cascarilla.

### **2.2.5- Se realiza el inventario de ciclo de vida para cada alternativa**

El Inventario de análisis de Ciclo de Vida (IACV) consiste en la recopilación detallada de todos los insumos ambientales (materiales y energía) y salidas (aire, agua y emisiones sólidas) asociados a cada etapa incluida dentro de los límites del sistema y expresados en base a la UF. Para confeccionar nuestro inventario se recopilaron los datos necesarios y se determinaron, calcularon y cuantificaron las entradas y salidas al proceso, así como todas las corrientes internas, teniendo en cuenta las limitaciones y suposiciones previstas y considerando además los siguientes conceptos:

- ✓ Vigencia de los datos: En este caso se tomaron datos técnicos de la campaña arrocera 2019 de la propia UEB. Se trabajó con índices de consumo históricos de la empresa arrocera sur del jíbaro y la unidad. Y se recopiló en la literatura datos y términos actuales, necesarios para el trabajo. Otros datos de interés se obtuvieron experimentalmente y se realizaron balances de masa y energía para determinar flujos y corrientes desconocidas del proceso.
- ✓ Cobertura geográfica: Los datos obtenidos de la literatura y los calculados están en relación con los datos de la UEB Los Tamarindos.
- ✓ Precisión: Cuando los datos responden a un rango de valores, se trabaja con el valor extremo que contribuya al mayor impacto ambiental.
- ✓ Representatividad: Se usan datos reales específicos del proceso base, de bases de datos de la literatura referenciada y de los cálculos y balances realizados.

### **2.2.6 Evaluación de impacto del ciclo de vida**

Para el análisis del ACV se utilizó el software libre OpenLCA versión 1.10 con la Base de Datos (BD) ecoinvent 3.6. Se utilizó la metodología ReCiPe con categorías de impactos medios y finales en una perspectiva jerárquica (Goedkopp et al., 2008). Por lo tanto, fueron estudiadas las categorías de impacto "Calidad del Ecosistema", "Salud Humana" y "Recursos Fósiles", para el enfoque en punto final y se valoraron 18 CI para el enfoque en punto medio. Los impactos ambientales fueron cuantificados en "puntos" para las categorías de daño y para el "Impacto Total". Teniendo en cuenta que la metodología ReCiPe permite determinar la relación entre categorías intermedias y finales, se pudo determinar la relación entre ellas: "Salud Humana" y "Recursos Fósiles", así como su impacto total para el enfoque en punto final y se valoraron 18 CI para el



enfoque en punto medio en sus perfiles de normalización y caracterización. Teniendo en cuenta que uno de los flujos del proceso, ``Mercado de arroz``, para todas las alternativas, presenta impactos cuantificados mucho mayores que el resto de los flujos, definiendo el impacto sobre todas las CI y minimizando las diferencias entre las alternativas, se realizó un nuevo estudio sin incluir este flujo con el objetivo de definir con más claridad las mejoras que traen consigo la implementación de las alternativas propuestas sobre el proceso y cada CI analizada. Los impactos ambientales fueron cuantificados en ``puntos...

### **2.2.7 Estudio de sensibilidad.**

Teniendo en cuenta los resultados de perfil de normalización se realiza un estudio de sensibilidad para determinar posibles afectaciones al proceso debido a cambios en una de las variables, para ello se tomó la alternativa de menor efecto perjudicial y dentro de ella la CI más impactadas, se suponen cuatro nuevos escenarios de la variable de incertidumbre y se compara su impacto dentro de cada CI para cada nuevo escenario contra en el actual.

Escenarios de sensibilidad.

Escenario 1 (S1): Humedad de entrada del arroz de 26%

Escenario 2 (S2): Humedad de entrada del arroz de 22%

Escenario 3 (S3): Humedad de entrada del arroz de 20%

Escenario 4 (S4): Humedad de entrada del arroz de 18%

Caso base: Humedad de entrada del arroz de 24%

Una vez realizada la evaluación del impacto de ciclo de vida a las alternativas propuestas se proponen ejecutar las de menos impacto ambiental, en nuestro caso las alternativas reducen los consumos de combustible fósil, utilizando, alternativamente residuos de la producción lo que supone un impacto ambiental positivo. Aunque el análisis de ciclo de vida no tiene en cuenta el análisis económico es de suponer que este tendrá también resultados positivos por la diferencia de precio entre los dos combustibles.

### Capítulo III Análisis de los resultados.

En este capítulo se utiliza el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta para evaluar el impacto ambiental que provoca el secado de arroz en la UEB "Tamarindo", en las condiciones actuales y las mejoras que podrían traer las alternativas energéticas propuestas. La información proveniente de la Evaluación del Ciclo de Vida ayuda a centrar los esfuerzos y disponer de una estrategia para la toma de decisiones que tribute a mejoras ambientales del proceso.

A partir de los resultados del IACV (Anexo 1), se realizó la evaluación de impacto ambiental del secado de arroz, para las diferentes alternativas energéticas propuestas, teniendo en cuenta el ciclo de vida de todo el proceso con las consideraciones realizadas.

#### 3.1- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto final del ACV)

El punto final del ACV valora el impacto total, sobre el medio, de cada alternativa fundamentándose en tres CI: Salud humana, calidad del ecosistema y recursos fósiles. El impacto perjudicial total disminuye gradualmente desde la alternativa A1 hasta la A5 a medida que se van sustituyendo las fuentes convencionales de energía por las fuentes renovables de energía. Como muestra la figura 11, Obteniéndose una mejora de un 15% entre la A5 y A1 (sustitución del 100% del diesel de secado y el 100% de la electricidad de red por el uso de la cascarilla, contra las condiciones actuales)

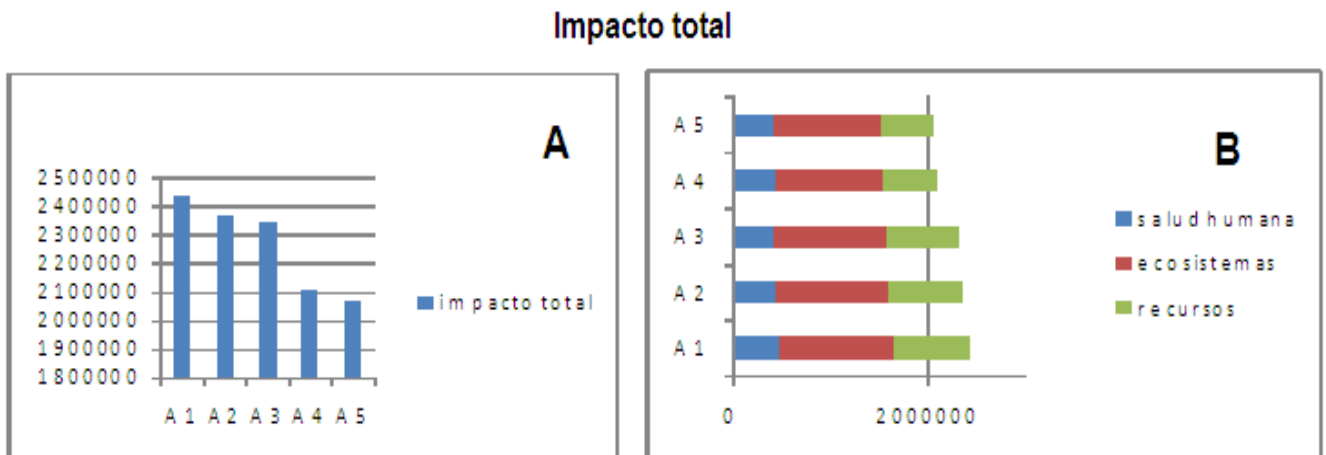


Fig.11 Impacto total. A: Impacto total, B Impacto total desglosado en CI

Cuando se analiza el impacto de cada alternativa sobre las tres CI se obtienen resultados similares al impacto total, con una mejora paulatina en los impactos desde la

A1 hasta la A5, como muestra la figura 12, debido también a la sustitución de los combustibles fósiles por los renovables. Hay que señalar que los valores elevados en estos análisis se deben principalmente al flujo “mercado” de arroz en su etapa agrícola, el cual trae consigo una alta carga ambiental al ser un cultivo que necesita de grandes volúmenes de fertilizantes y pesticidas, combustibles y agua.

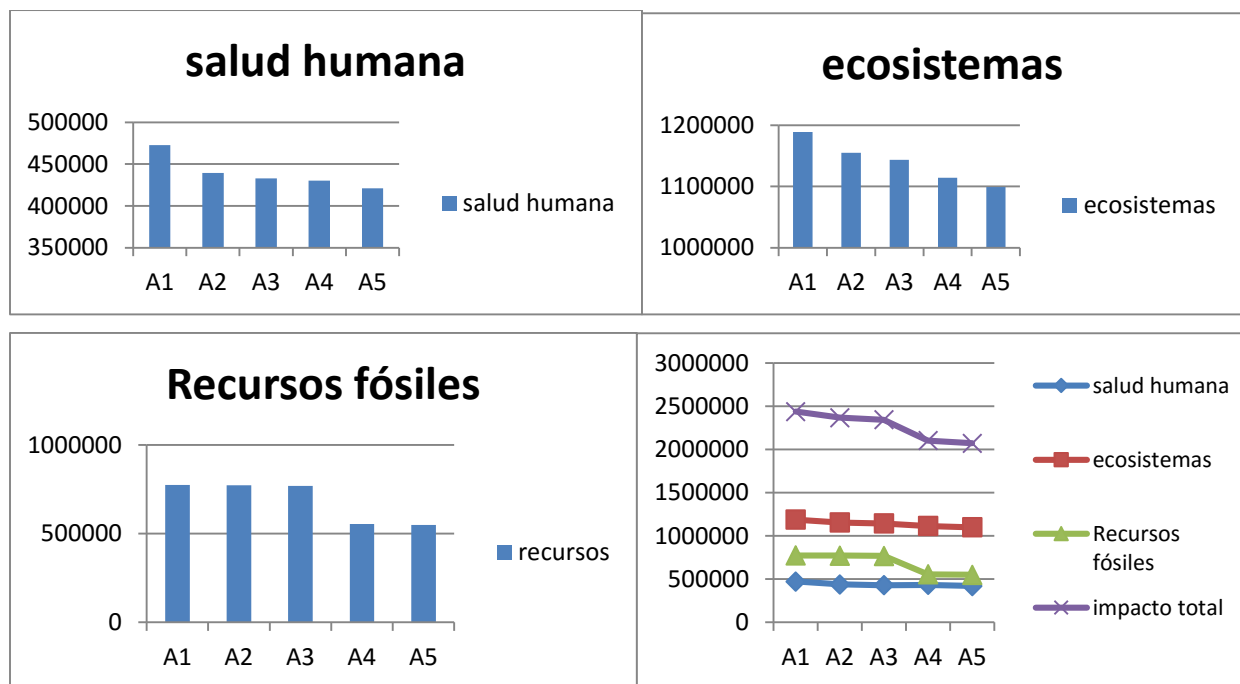


Fig12. Impacto de las alternativas energéticas por CI

### 3.2- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto medio del ACV)

El punto medio del ACV valora el impacto de las diferentes alternativas sobre 18 categorías de impacto por los que nos da una medida más detallada de las afectaciones sobre el medio. En nuestro estudio:

Para todas las alternativas y en cada CI, el flujo “mercado de arroz” proveniente del campo es el flujo con mayor impacto perjudicial, debido a la gran carga ambiental que infiere el proceso agrícola del arroz por considerarse un cultivo intensivo de altos consumos de fertilizantes, plaguicidas, fungicidas y agua, además de combustible fósil en las labores tanto agrícolas como fitosanitarias. Analizando por CI, se obtienen impactos beneficiosos en la CI toxicidad humana no-carcinogénica. Este comportamiento es debido al flujo “mercado del arroz”, flujo este, con mucho mayor valor que los restantes flujos que inciden sobre esta CI. La sustitución, en cada

alternativa, de los consumos de las energías convencionales por las fuentes renovables de energía, incorpora variaciones beneficiosas progresivas desde la alternativa A-1 hasta la A-5 como muestra la Fig.13.

Se obtienen impactos perjudiciales en las restantes categorías de impacto, donde la mayor influencia está dada por el flujo “mercado de arroz”, en su etapa agrícola. En todas las categorías de impacto la alternativa A-5 presenta el mejor comportamiento por la consideración de la generación de electricidad a partir de una fuente renovable en sustitución de una fuente fósil, exportando a la red nacional la demasía generada (producto evitado), así como la sustitución del 100% del diésel del secado por la cascarilla de arroz, considerada hoy residuo del proceso. Además, es considerado como producto evitado la utilización de calor de escape, de la caldera, en la cocción de alimento, evitando el consumo de combustible fósil (diésel). Además, el calor contenido en el vapor de baja presión pudiera ser utilizado en otras producciones como las mini industrias de alimentos en conserva, que forman parte del proceso de diversificación de las producciones que lleva a cabo nuestra empresa.

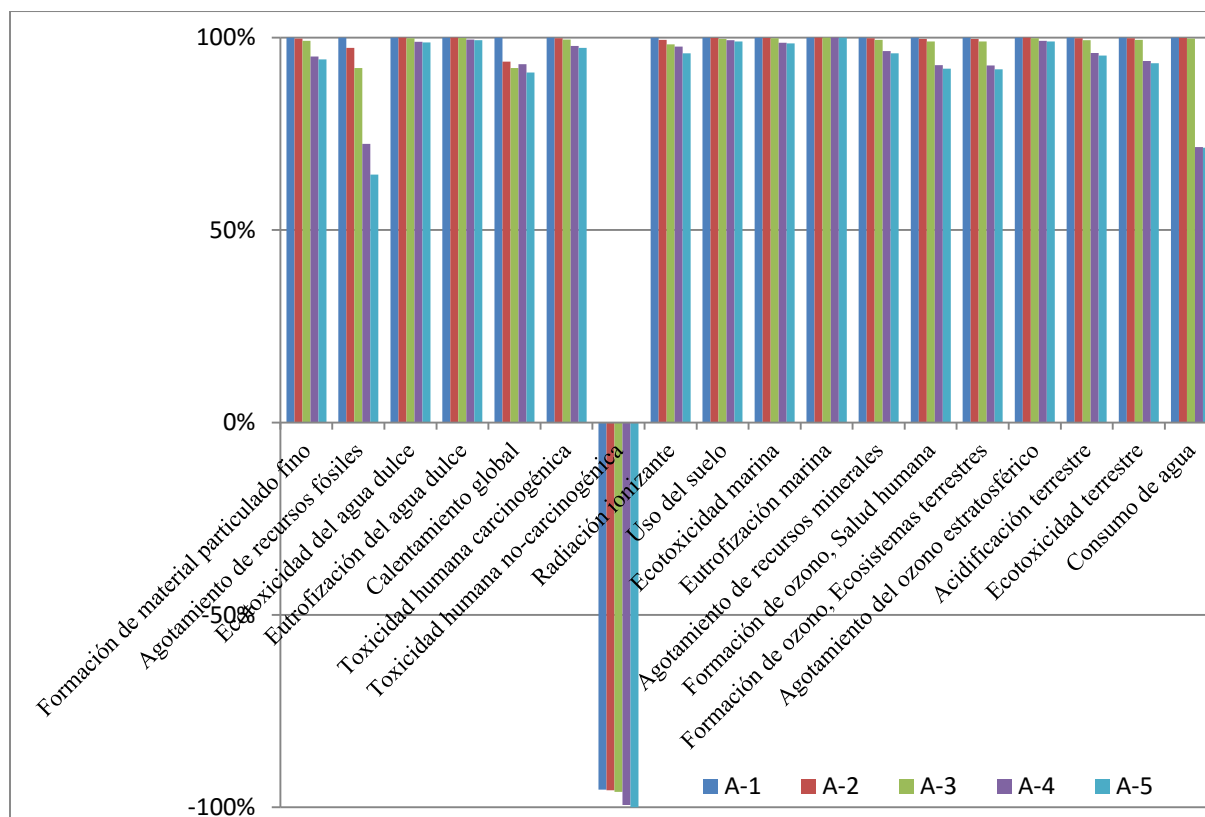
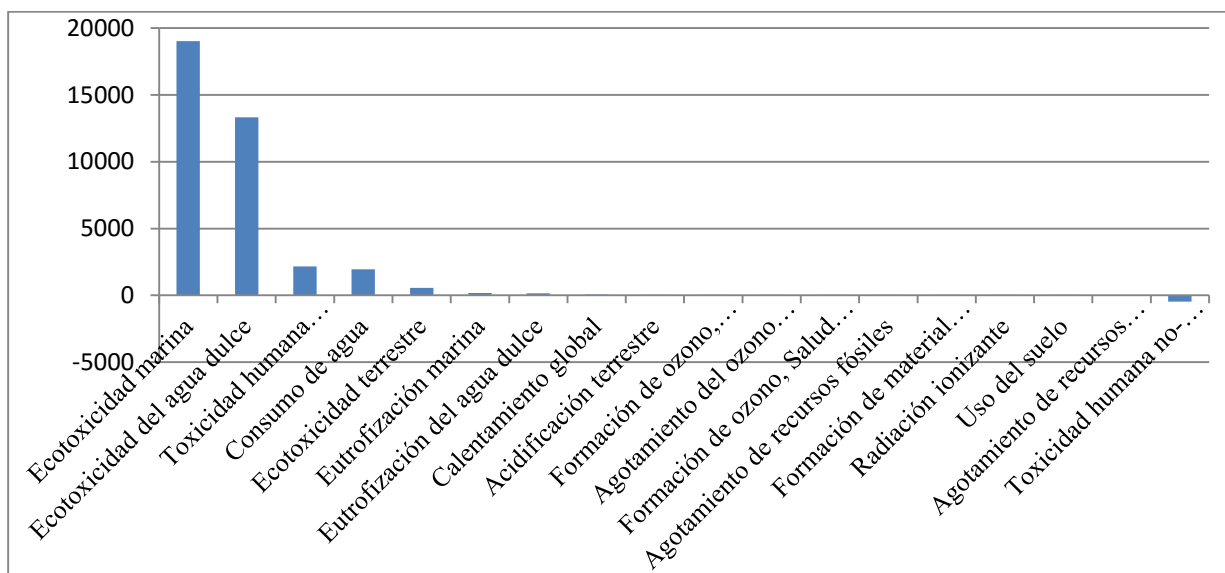


Fig.13.Perfiles ambientales por CI. Caracterización.

Teniendo en cuenta que la alternativa A-5 presenta los mayores impactos beneficiosos sobre el medioambiente para todas las CI, se le realiza el análisis de normalización donde se determina que la CI de mayor influencia perjudicial es la ecotoxicidad marina debido a las emisiones a los cuerpos acuáticos de metales como cobre, zinc, níquel y vanadio en el cultivo del arroz (Fig. 14.). En esta CI la sustitución de la electricidad generada a partir de fuentes renovables de energía impacta de forma beneficiosa. Otra CI impactada perjudicialmente es la ecotoxicidad del agua dulce, asociado fundamentalmente al cultivo del arroz. Le siguen las CI toxicidad humana carcinogénica y consumo de agua con similar comportamiento, debido a las emisiones de metales pesados y al consumo de agua en las labores agrícolas del cultivo de arroz. Las demás CI presentan, en menor grado, un comportamiento similar. La CI que presenta impactos beneficiosos es toxicidad humana no-carcinogénica, aspecto profundizado anteriormente. Todo esto se aprecia en la fig.14



**Fig.14** Perfil ambiental correspondiente a A-5. Normalización

### 3.3 Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de profundizar dentro de la alternativa A-5 y reducir impactos dentro de la variable de mayor incertidumbre se realiza un análisis de sensibilidad. Para este se tomaron como punto de partida las cuatro CI con mayores impactos perjudiciales al perfil ambiental (normalización). Estas son: ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua

dulce, toxicidad humana carcinogénica y consumo de agua. Para esto se realizaron 4 escenarios de humedad de entrada del arroz del campo comparándolas con el caso base (A-5, 24% humedad):

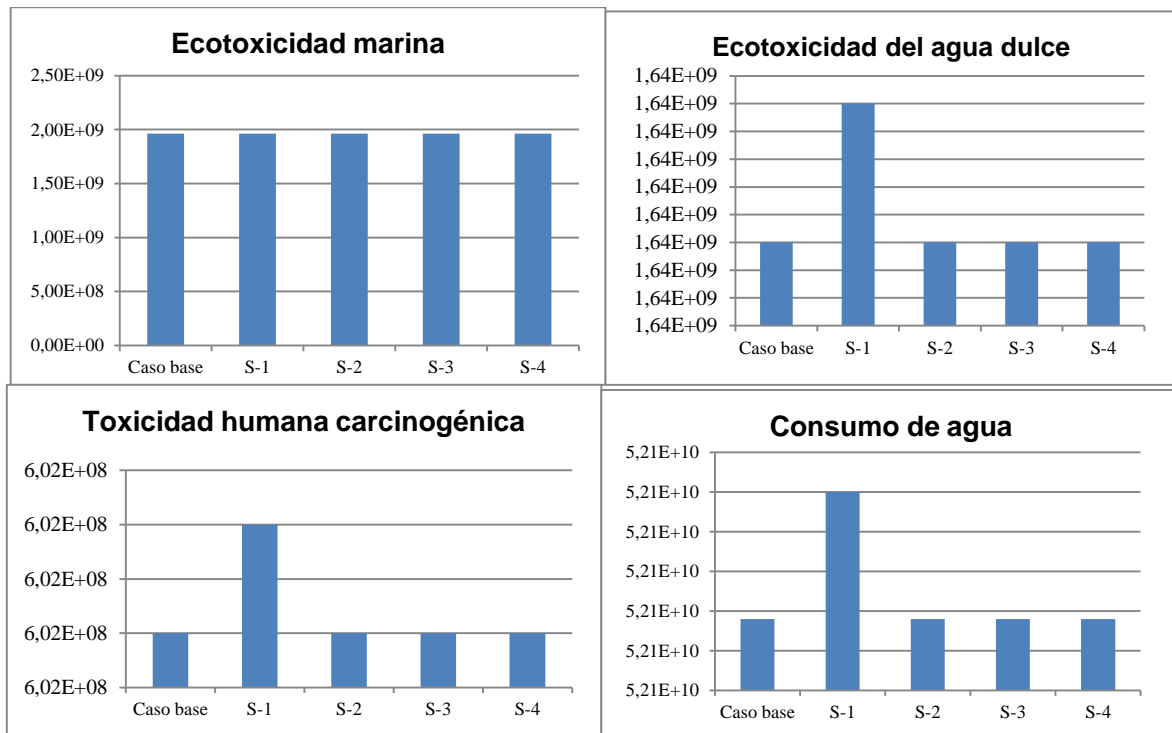
S-1: 26% de humedad del arroz a la entrada.

S-2: 22 % de humedad del arroz a la entrada.

S-3: 20% de humedad del arroz a la entrada.

S-4: 18% de humedad del arroz a la entrada.

Se observa que todas las CI presentan impactos perjudiciales (Fig. 15). En todas las CI estudiadas, el escenario que corresponde a un 26% de humedad en el arroz (S-1), presenta los mayores impactos perjudiciales debidos fundamentalmente a la mayor necesidad de portadores energéticos por UF, para extraerle al arroz mayor cantidad de humedad y obtener menor masa de arroz seco a la salida, es necesario destacar que el aumento en el impacto, en todos los casos, es del orden las unidades, en valores de entre  $10^9$  y  $10^{10}$ , lo que representa porcentos del orden de  $10^{-7}$ , casi imperceptibles, todo debido a la gran diferencia modular entre los valores que trae implícito el flujo "mercado de arroz" de su etapa agrícola con los demás flujos involucrados en el proceso de secado. Aun así, podemos decir que al aumentar el contenido de humedad en el arroz de recibo por encima de 24%, mayores serán los impactos ambientales esperados. En la CI ecotoxicidad marina, los resultados no presentan sensibilidad a los cambios de humedad, por lo que se asume que el proceso de secado no influye significativamente en esta CI y solo depende la etapa agrícola del cultivo.



**Fig.15.** Análisis de sensibilidad para variación de humedad en arroz de entrada.

Durante todo el capítulo y en cada análisis realizado el flujo “mercado de arroz” en su etapa agrícola presenta valores tan elevados (modularmente) respecto a los demás flujos que hace que estos últimos prácticamente no incidan sobre las diferentes CI al pasar de una alternativa energética a otra. Como muestra la tabla 9

Tabla 9 comparación de los valores del flujo "arroz" con otros flujos en varias CI. Según punto medio del ACV

Categoría de impacto	Prod.Elect. con gas N.	Prod.Elect. con diesel	Prod.Elect. fotovoltaica	Prod.Elect. bagazo	Mercado de diesel	Mercado de arroz
Formación de material particulado	<u>0,072</u>	<u>3,233</u>	<u>0,0077</u>	<u>0,39</u>	<u>4,005</u>	<u>487,464</u>
Calentamiento global	<u>291,689</u>	<u>3616,812</u>	<u>3,421</u>	<u>7,466</u>	<u>1544,479</u>	<u>484573,75</u>
Agotamiento de los recursos minerales	<u>1,155</u>	<u>15,845</u>	<u>1,220</u>	<u>1,412</u>	<u>38,041</u>	<u>19874,88</u>
Toxicidad humana no carcinogénica	<u>7,745</u>	<u>175,699</u>	<u>8,337</u>	<u>104,908</u>	<u>452.899</u>	<u>8606,05</u>

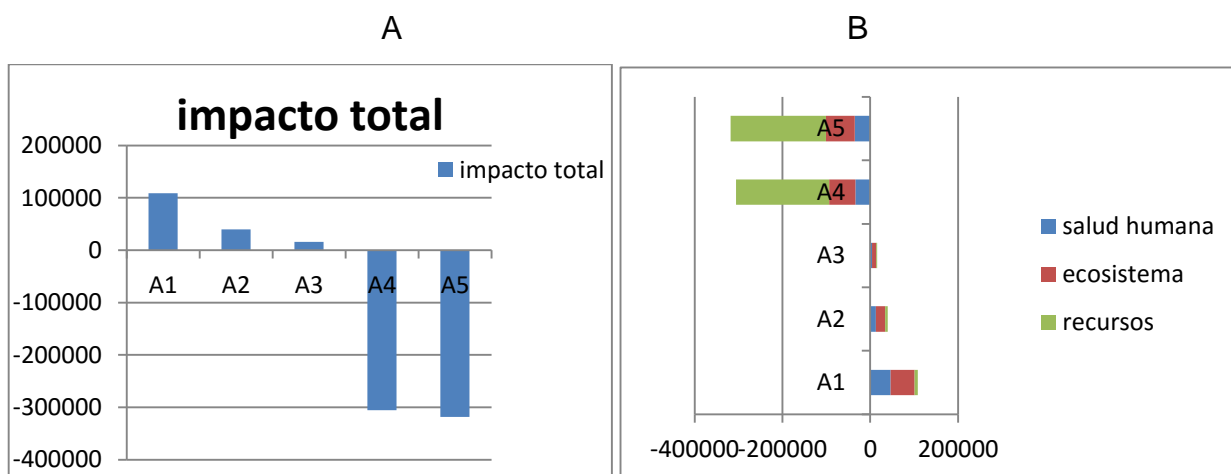
Y si tenemos en cuenta que el arroz es un flujo que no puede ser sustituido en el proceso, que su carga ambiental solo se pudiera regular en su etapa agrícola (fuera de los límites del sistema) y que para todas las alternativas este flujo se mantiene constante y con iguales características, se pudiera realizar un nuevo análisis descartando los datos que este flujo aporta, con el objetivo de apreciar con mayor nitidez, no solo las CI más afectadas, sino además el comportamiento de los otros flujos involucrados en las 5 alternativas planteadas, y determinar con más exactitud el impacto provocado por cada alternativa de mejora energética sobre las 18 CI, para obtener de tal forma las CI más beneficiadas.

Haciendo este análisis tenemos que:



### 3.4- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto final del ACV) sin considerar carga ambiental del flujo “mercado de arroz”.

Al igual que el análisis realizado en el epígrafe 3.1 el impacto total perjudicial disminuye cuando pasamos de la alternativa A1 a la A2 y la A3, al pasar a la A4 y A5 el impacto es beneficioso, siendo la alternativa de mejor comportamiento la A5 Como muestra la fig.16. Esto se debe a la sustitución paulatina de los combustibles convencionales, por el biogás y la biomasa. La A5 presenta el mejor comportamiento al sustituir el 100% del diesel de secado y la electricidad de la red nacional y además exportar a esta la demasía generada.



Igual comportamiento y por las mismas razones tienen las tres categorías de impacto que se analizan, como muestra la fig. 17

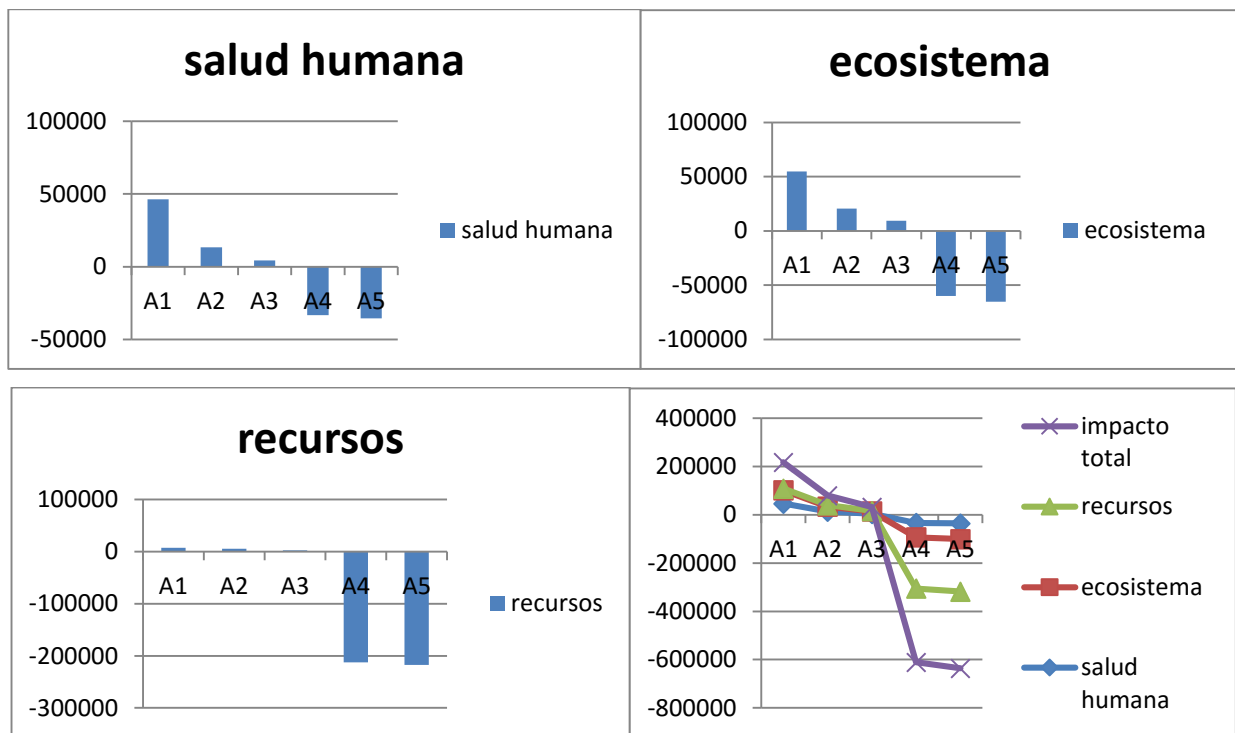


Fig17. Impacto de las alternativas energéticas por CI

### 3.5- Impacto ambiental por alternativas energéticas (según punto medio del ACV) sin considerar carga ambiental del flujo “mercado de arroz”.

Realizamos los análisis de caracterización y normalización al igual que en el epígrafe 3.2. Ahora sin incluir el flujo “mercado del arroz” se puede apreciar con más claridad, para todas las CI, como va disminuyendo el impacto negativo desde la A1-A2-A3, para luego en A4 y A5 tener impactos positivos, a medida que se van sustituyendo las fuentes convencionales de energías por las FRE. Coincidimos en que para toda CI la A5 tiene los mejores impactos positivos sobre el medio. Como se muestra en la figura

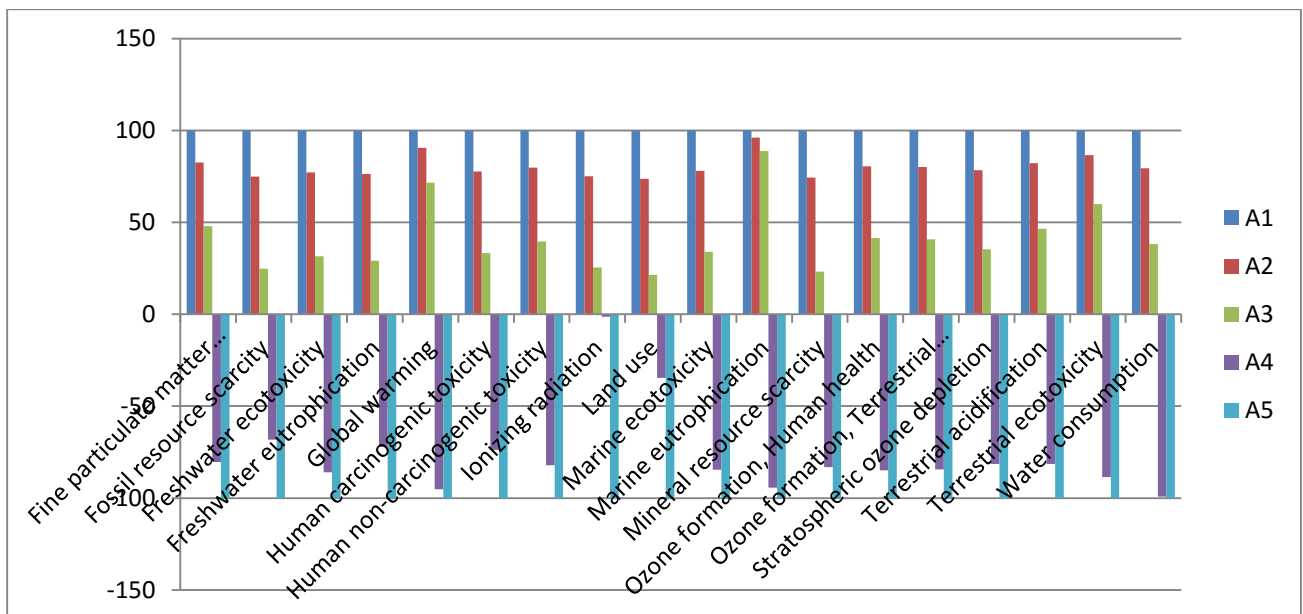


Figura18 Perfiles ambientales por CI. Caracterización. Sin considerar flujo “mercado de arroz”.

En el perfil de normalización para la A5 (fig.19) se observa que todas las CI son beneficiadas, con los mayores impactos en: calentamiento global y uso de los recursos fósiles, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua. En todos los casos la principal causa de esta mejora en el impacto ambiental está asociada a la venta a la red nacional de la energía eléctrica excedente obtenida a partir de la utilización de la biomasa como combustible.

Los resultados obtenidos de este análisis están acorde a lo esperado pues las CI más impactadas, beneficiosamente, responden a la aplicación de las alternativas energéticas donde se va sustituyendo paulatinamente las fuentes de energías convencionales por los renovables, así, por ejemplo a diferencia del análisis realizado considerando el flujo “mercado de arroz” se aprecia que se beneficia la CI “uso de los recursos fósiles” al ir disminuyendo el consumo de diésel y energía eléctrica hasta obtener una total autonomía energética del proceso. Por esta misma causa se dejan de emitir los gases contaminantes a la atmósfera y por tanto se ve beneficiada la CI “calentamiento global”. Al dejar de quemar en los campos a cielo abierto la cascarilla de arroz se benefician los suelos donde se realizaba esta actividad mejorando la capa vegetal y dejando de contaminarse con las cenizas, por lo que se ve beneficiada la CI

“ecotoxicidad terrestre”. La mejora en el consumo de agua está dada en gran medida por evitar la generación eléctrica a en las centrales termoeléctricas las cuales tienen un gran consumo de este producto.

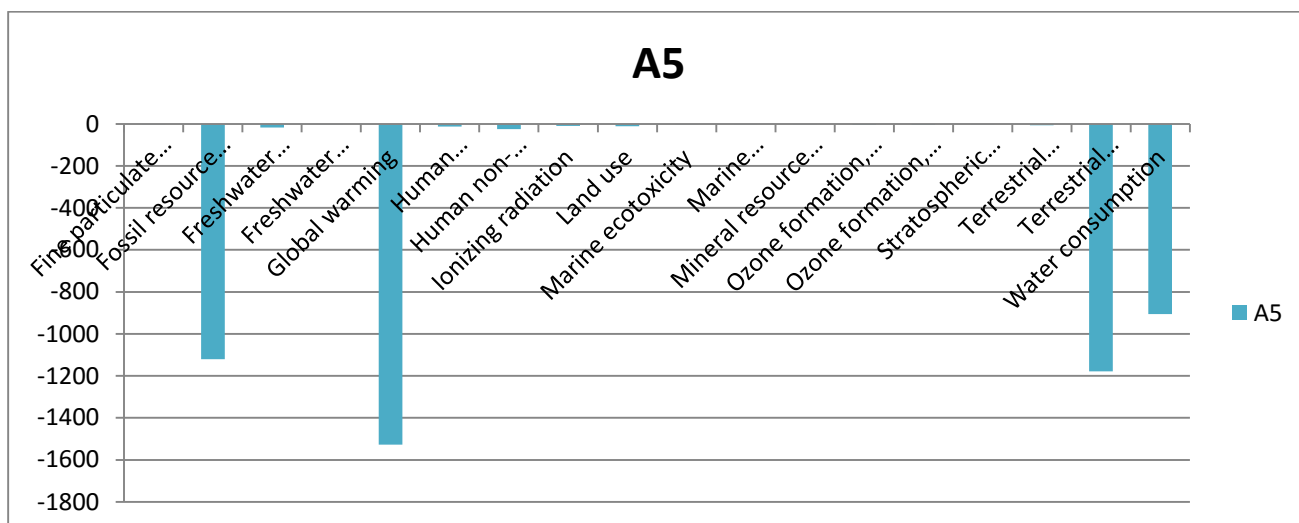


Fig.19 Perfiles ambientales por CI. Normalización. Sin considerar flujo “mercado de arroz”.

### 3.6- Estudio de sensibilidad. Sin considerar flujo mercado de arroz.

Para el nuevo perfil de normalización se tiene que las CI más impactadas son, calentamiento global, consumo de recursos fósiles, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua, por ese orden. Tomamos nuevamente la variable humedad de entrada del arroz como la de mayor incertidumbre y realizamos igualmente el estudio de sensibilidad para los cuatro escenarios de humedades comparándolas con el caso base:

S-1: 26% de humedad del arroz a la entrada.

S-2: 22 % de humedad del arroz a la entrada.

S-3: 20% de humedad del arroz a la entrada.

S-4: 18% de humedad del arroz a la entrada.

Se observa que en los cuatro escenarios y para cada CI( fig.20) los impactos son beneficiosos al medio ambiente, notándose una mejora paulatina al ir disminuyendo la humedad de entrada del arroz desde el escenario S1 hasta el S4, esta mejora en el impacto ambiental se debe a disminución del consumo de biomasa en el secado y por tanto menor emisión de gases de la combustión, disminuye además el consumo, en el

proceso, de la electricidad generada por lo que aumenta la energía eléctrica que se entrega a la red nacional. Por otra parte, mientras menor sea la humedad de entrada del arroz húmedo procedente del campo mayor será la masa obtenida de arroz seco. Es notable el beneficio del impacto ambiental que implica una disminución de la humedad de entrada del arroz. Ahora, esta disminución está dada por un secado del arroz en la planta bajo condiciones no reguladas lo que atenta contra la calidad del grano. Ejemplo: el secado natural del grano en la planta puede afectarse por días lluviosos donde vuelve a aumentar su humedad para luego seguir su proceso de secado natural, estos cambios bruscos de humedades provocan fisuras en el grano que en el proceso de molinado se traduce en granos partidos que afectan la calidad y la eficiencia de este proceso. Por lo que se pone un límite a las humedades de entrada del arroz procedente del campo, definiendo calidades del mismo, así, un arroz de primera calidad no puede bajar de 20% de humedad. Esto nos indica que hay que buscar un valor medio entre los resultados del ACV para el proceso de secado y los de la calidad del proceso de molinado.

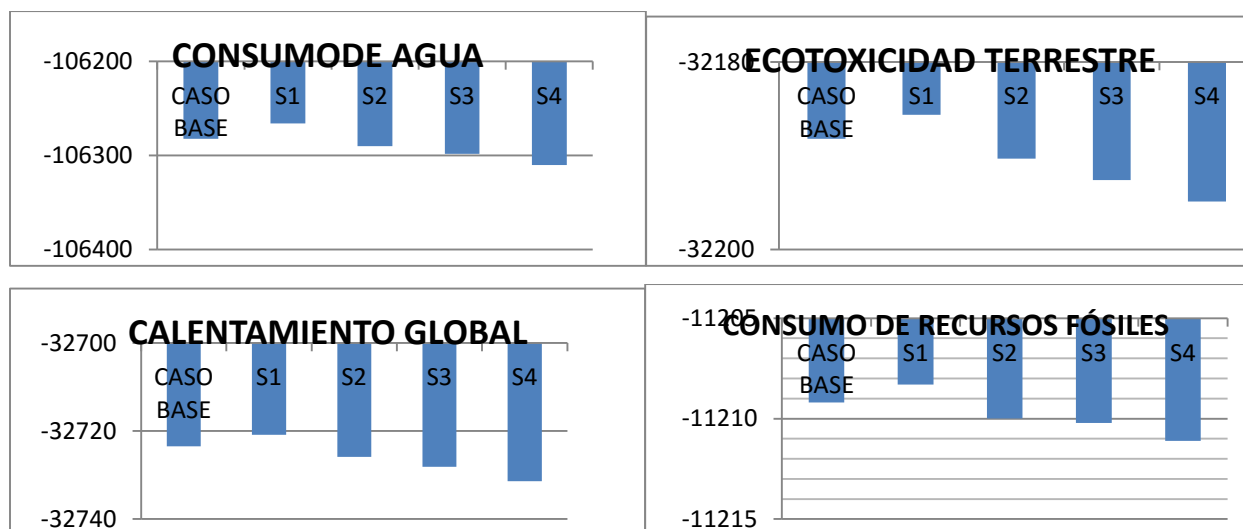


Figura 20 Análisis de sensibilidad para variación de humedad en arroz de entrada. Sin incluir flujo “mercado de arroz”.

### 3.7 Análisis de los resultados.

De la evaluación del impacto ambiental a través del ACV y el análisis de los resultados del software tenemos que:

En todos los análisis realizados el flujo de mayor contribución, y que prácticamente marca los resultados es el “mercado de arroz” en su etapa agrícola. Este cultivo es altamente dependiente de grandes cantidades de agroquímicos, pesticidas, agua y combustibles fósiles. Esta etapa está fuera de los límites o fronteras de nuestro proceso por lo que solo podemos proponer se realicen trabajos que incidan sobre el mismo. En consecuencia, con lo anterior y valorando el enfoque de punto final tenemos que:

Para todas las CI e impacto total, las condiciones actuales (A1) tienen los impactos perjudiciales más altos y la A5, donde se sustituyen el 100 % del diesel de secado y la electricidad del proceso, exportando a la red nacional la demasía generada, tiene los menores impactos perjudiciales. Otros flujos que impactan positivamente dentro de la A5 son: La venta de las cenizas de la combustión como materia prima de construcción y la utilización del vapor de baja presión para la cocción de alimentos, ambos considerados productos evitados.

Todas las alternativas impactan negativamente sobre el medio ambiente, notándose una disminución paulatina en el impacto perjudicial desde la alternativa A1 hasta la A5 en las tres CI analizadas y en el impacto total.

Los siguientes resultados expresados como porcentaje de mejoras contra A1 muestran la disminución del impacto perjudicial al pasar desde la A2 a la A5.

CI	A2	A3	A4	A5
Salud humana	7,01	8,43	8,93	10,88
Ecosistemas	2,87	3,82	6,30	7,55
Recursos	0,23	0,68	2,84	2,90
Impacto total	2,83	3,81	13,73	15,03

Tabla 10 Relación en porcentajes de las alternativas de mejoras contra las condiciones actuales.

Según el enfoque de punto medio sigue siendo el flujo de arroz en su etapa agrícola el que marca los resultados del análisis, así, según el perfil de caracterización:

De las 18 CI analizadas solo la toxicidad humana no carcinogénica se ve impactada positivamente por las cinco alternativas. Las 17 CI restantes son impactadas perjudicialmente.

Para las 18 CI la alternativa con mayor impacto perjudicial es el de las condiciones actuales. Consumo de diésel y electricidad de la red para el proceso de secado. Y la de menor impacto perjudicial es la A5.

Para las 17 CI con impacto perjudicial, este va disminuyendo desde la A1 hasta la A5, en el caso de la CI con impacto beneficioso, este aumenta desde la A1 hasta la A5. En ambos casos el flujo que más aporta a las variaciones es el de generación y transmisión eléctrica a partir del petróleo y su sustitución por la biomasa.

Del perfil de normalización realizado a la A5 se tiene que:

Las CI con mayor impacto perjudicial fueron en este orden: ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, toxicidad humana carcinogénica y consumo de agua.

La CI con impactos beneficiosos es toxicidad humana no carcinogénica.

En ambos casos el flujo de arroz determina los resultados, independientemente de las mejoras por el cambio de alternativa energética.

EL estudio de sensibilidad realizado sobre las cuatro CI mayormente impactadas en la A5 y tomando cuatro nuevos escenarios de humedades de entrada del arroz, arrojó:

La CI ecotoxicidad marina no depende de la humedad de entrada del arroz. Este solo depende de la etapa agrícola del cultivo.

Para los tres restantes CI el escenario de mayor humedad (26%), S1, presenta los mayores impactos. Debido fundamentalmente a la utilización de mayor masa de combustible por UF para obtener al final menor masa de arroz seco. Por el contrario, el escenario de menor impacto negativo es el correspondiente al de menor humedad (18%), S4.

Para las tres CI impactadas en los nuevos escenarios, el impacto perjudicial disminuye a medida que baja la humedad de entrada, por la misma razón anterior.

Atendiendo a la puntuación que atribuye el software a los cambios en el impacto en cada CI, para cada escenario, relacionándolos con los que le brinda a los flujos que inciden sobre cada CI, que están en el orden de las unidades respecto a valores de  $10^9$

implica cambios del orden de  $10^{-7}\%$ . Estos valores son muy pequeños y se pueden apreciar en la figura 15 solo por la escala considerada.

El flujo de mayor impacto y que marca estos resultados es el del arroz en su etapa agrícola.

El proceso de secado de arroz no presenta un consumo de agua y no genera residuos que vayan a parar a cuerpos acuáticos, mucho menos al mar, por lo que podemos afirmar que las CI más afectadas dentro de la alternativa de menor impacto perjudicial (ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce y consumo de agua) no son representativas de nuestro proceso. Y sí de la etapa agrícola del cultivo, caracterizada por los grandes consumos de agua y la contaminación de la misma con agroquímicos y pesticidas que en un final van a terminar en los mares.

Al realizar el estudio sin considerar las puntuaciones que emite el flujo de arroz, según el enfoque de punto final tenemos:

Existe una disminución en el impacto perjudicial para las tres CI y el impacto total desde la A1 hasta la A3 al sustituir el diésel de secado por el biogás y la biomasa. En este caso el flujo de mayor incidencia es el del mercado de diésel.

Las A4 y A5 tienen un impacto beneficioso sobre las tres CI y el impacto total notándose un aumento en el impacto de A4 a A5. En este caso el flujo que más influye es la exportación a la red nacional de la electricidad generada a partir de la cascarilla, además, aunque en menor medida, la venta de las cenizas y la utilización del vapor

En el proceso de secado de arroz los flujos de más repercusión perjudicial dentro del análisis son, de entrada: arroz de la etapa agrícola, electricidad a partir del petróleo y diésel en ese orden. De salida: gases productos de la combustión y residuos del secado. Para la A5 todos estos flujos son eliminados y se incorpora un nuevo flujo de salida "electricidad a la red nacional" la cual repercute beneficiosamente. Es por esta razón que los resultados de este análisis arrojan resultados beneficiosos tan elevados. Comparados con el análisis considerando el flujo de arroz que incorpora valores que contrarrestan estos resultados.



## **Conclusiones**

De la realización de este trabajo podemos concluir que:

1. El proceso de secado del arroz en nuestro país es dependiente de los portadores energéticos diésel y electricidad.
2. El proceso de secado del arroz es un gran generador de residuo.
3. Los residuos industriales del secado de arroz tienen un potencial energético capaz de sustituir los combustibles convencionales.
4. El inventario de ciclo de vida para las alternativas propuestas nos permitió cuantificar las principales corrientes de entrada y salida del proceso.
5. Al evaluar el impacto ambiental de las alternativas energéticas propuestas, se constató que todas, en alguna medida, mejoran el impacto ambiental del proceso de secado.
6. En todas las variantes analizadas la alternativa A5, donde se sustituye el 100% del diésel y la electricidad de la red nacional presenta los mejores resultados ambientales.
7. La producción de energía eléctrica a partir de la biomasa para el proceso y para exportar a la red nacional tiene los mejores efectos ambientales de los analizados.
8. En todas las alternativas, y para cada CI el flujo “mercado de arroz” aporta las mayores puntuaciones al análisis.
9. El recibo del arroz con la menor humedad posible, sin afectar la calidad del producto, influye positivamente en el impacto ambiental del proceso de secado.

## **Recomendaciones**

Analizar otras alternativas energéticas en el proceso desecado como la codigestión anaerobia de los residuos del secado y los residuos porcinos, así como la gasificación de la cascarilla de arroz.

Realizar un estudio de factibilidad técnico-económico de la alternativa A5 buscando una total autonomía energética del proceso de secado de arroz.

Expandir las fronteras del trabajo al área de molinado para analizar todo el proceso industrial del arroz.

Realizar estudios ambientales el cultivo del arroz para disminuir su carga ambiental.

## Referencias Bibliográficas

- 14040, I. (2006). ISO 14040. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de Referencia. AEN/CTN 150 Gestión Medioambiental.
- (IPCC), G. I. d. E. s. C. C. (2007).
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., & Kulmann, H. (2004). Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA).
- Centro de Gestión de la Información Económica, M. y. S. d. C. (2018). Informe Panorámica Medioambiental de Cuba. Junio 2018.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. Renewable and Sustainable Energy.
- CMCC. (2005). Guía de Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto.
- Comisión de Comunidades Europeas. (1992).
- Contreras, L. M. (2013). *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera cubana para la producción de biogás* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas].
- Díaz, M. (2011). Conferencia. 5to Encuentro Internacional de Arroz. [Conferencia].
- Fernández, E. (2019). "Generación de Energía Eléctrica mediante Gasificación de la Cascarilla de Arroz para un Molino en Lambayeque.
- Gadde, B., Christoph, M., & 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. <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/rice-straw-as-a-renewable-energy-source-in-india-thailand-and-the-yLTED0KzK0>
- Goedkopp, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. D., Struijs, J., & Zelm, R. v. (2008). ReCiPe. A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08). Report I: Characterization. May 2013 pp. 7 y pp. 71 -72.

- IEA. (2020). (International Energy Agency, 2020).
- León, J., & Carreras, R. (2002). Calidad del arroz: criterios para una adecuada valoración. *Vida Rural*, 145, 38-40.
- Linares, O., & Meneses, C. (2011). Comunicación personal con el Director y subdirector de Industria: Complejo Agroindustrial Arroceros CAI "Sur del Jíbaro". Sancti Spiritus, .
- Linares, Y. m. (2017). Análisis del Ciclo de Vida de los alimentos incluyendo las categorías falta de inocuidad alimentaria. .
- López, J. C. (2019). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz para la cogeneración eléctrica.
- López, L., Manso, J. M. R., Velázquez, L. M. C., Garciga, J. P., & García, O. H. (2019). Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo
- M, A. M., & Valeiro, A. H. (2015). El análisis del ciclo de vida y su utilidad para determinar puntos de ineficiencia en sistemas agroindustriales
- Méndez, A. (2010). Gasificación de Cascarilla.
- Miller, G. (2007). *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.
- Moreno, F. L. A. (2014). Importancia de las energías renovables en la seguridad energética y su relación con el crecimiento económico.
- Navarro, P. L. D., González, J. R., & Nuñez, D. R. (2016). Propuesta de diseño de un horno para el secado del arroz, en la UEB Victoria de Girón, empleando como combustible la cascarilla del grano (Doctoral dissertation, Universidad de Pinar del Río " Hermanos Saíz Montes de Oca". Centro de Estudio de Energía y Tecnología Sostenible).
- OCDE/AIE. (2015). Organización para el comercio y el desarrollo económicos
- Panichelli, L. (2006). (ACV)de la producción de biodiesel (B100) en Argentina.
- Peralta, C. M. C. (2016). Propuesta de un biodigestor tubular de polietileno para producir biogás a partir de paja de arroz y agua del río Utcubamba en la ciudad de Bagua Grande, Amazonas.
- Pereda, I., & Díaz, J. P. (2015). Anaerobic Biodegradation of Solid Substrates from Agroindustrial Activities-Slaughterhouse Wastes and Agrowastes. .

- Pichs, R. (2012). Recursos naturales, economía mundial y crisis ambiental. La Habana: Editorial Científico-Técnica. .
- Quinceno, D. (2010). Alternativa tecnológica para el uso de la cascarilla de arroz como combustible. Trabajo de diploma. Programa de ingeniería mecánica. Departamento de energética y mecánica. Universidad autónoma de accidente. Santiago de Cali. .
- Rieznik, L., & Aja., A. H. (2005). Ciudades para un futuro más sostenible. Análisis del ciclo de vida. .
- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la Gestión Ambiental. Julio 2003.
- Romero, B. I. (2003). El análisis del ciclo de vida y la Gestión Ambiental. Julio 2003.
- Sánchez, A. (2017). Diseño de una planta de gasificación con cogeneración para el aprovechamiento energético de la cascarilla de arroz en un proceso industrial. Madrid, 2017.
- Santos, N. (2015). El vertimiento de la cascarilla de arroz y el medio ambiente. Revista científica Avances. No.2, Vol.17, ISSN1562-397.
- Sarduy, A. (2016). *Impacto Ambiental de Alternativas de Producción Porcina existentes en la provincia de Sancti Spíritus* [Tesis para optar por el Título de Máster en Eficiencia Energética,
- Sierra, J. (2009). Altrnativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz como combustible.Trabajo de diploma. Departamento de ingeniería agrícola. Facultad de ingeniería. Universidad de Sucre. .
- Spíritus, G. P. d. B. S. (2020). "Programa General para el Desarrollo local en el uso del BIOGÁS como fuente energética y de disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus. .
- Torres, A., Almazán, O., & Hernández, B. (2014). Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano.
- Trama, L., & Trojano, J. C. (2002). "Análisis del Ciclo de Vida según las normas de la subserie IRAM-ISO 14040". Departamento de Energía y Asuntos Ambien-tales, Instituto Argentino de Normalización. Revista Construir, No. 57, 2002, p. 6.

UNFCCC. (2020). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Valverde, G., Sarria, L., & Monteagudo, Y. (2007). Análisis comparativo de las características físico-químicas de la cascarilla de arroz”. *Scientia et Technica* Año XIII, No 37. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701

Wasserman, T., Miller, M., & Golden, W. (1965). Heated air drying of California rice in column dryers, California Agricultural Experiment Station, Extension Service.

Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. Mini-review. *Appl Microbiol Biotechnol*.

## ANEXOS

### Anexo1. Resumen del inventario del ACV

Entradas /Salidas	U/M	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
<b>Entradas de la tecnosfera</b>						
Arroz húmedo sucio (24% Hdad)	t	300,00	300,00	300,0	300,00	300,00
Agua desmineralizada	t				0,2	0,2
<b>Entradas de la ecosfera</b>						
Aire ambiente	t	50,78	50,24	51,71	202,37	203,29
Oxígeno del Aire	t	10,65	10,52	10,83	42,50	42,68
<b>Entradas de energía</b>						
Electricidad	MW h	5,21	5,21	5,21	-	-
Biogás	m <sup>3</sup>	-	2.204,1 2	-	-	-
Biomasa	t	-	-	9,97	29,28	39,25
Diesel	t	3,06	2,04	-	3,06	-
<b>Salidas a la tecnosfera</b>						
Arroz limpio seco (12.5% Hdad)	t	244,52	244,52	244,5 2	244,52	244,52
Energía eléctrica	MW h	-	-	-	63,20	63,20
Cenizas de cascarilla	t	-	-	1,99	5,86	7,85
Calor excedente		-	-	-	468.486,2	468.486,2
<b>Salidas a la ecosfera</b>						
Residuos de secadero (impurezas)	t	19,23	19,23	19,23	19,23	19,23
Vapor de agua del secado	t	35,98	35,98	35,98	35,98	35,98
Vapor de agua de la combustión fósil	t	4,22	2,81	-	4,22	-
Emisiones de CO <sub>2</sub> fósil	t	9,48	6,32	-	9,48	-

Vapor de agua biogénica	t	0,05	1,98	4,15	12,18	16,32
Emisiones de CO <sub>2</sub> biogénico	t	1,57	3,87	13,76	40,41	54,17
Emisiones de CH <sub>4</sub>	t	0,90	0,04	0,90	0,90	0,90

**Anexo2.** Inventario para el análisis de sensibilidad.

Entrada/salida	U/M	S-1	S-2	S-3	S-4
<b>Entradas de la tecnosfera</b>					
Arroz húmedo sucio (24% Hdad)	t	300	300	300	300
Agua desmineralizada	t	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Entradas de la ecosfera</b>					
Aire ambiente	t	214,63	194,1	184,19	169,96
Oxígeno del Aire	t	45,09	40,88	38,69	35,71
<b>Entradas de energía</b>					
biomasa (cascarilla)	t	41,47	37,6	35,58	32,83
<b>Salidas a la tecnosfera</b>					
Arroz limpio seco (12.5% Hdad)	t	238,08	251,22	257,67	264,09
Energía eléctrica	MW h	62,19	64,19	65,19	66,19
Cenizas de cascarilla	t	8,29	7,52	7,11	6,57
Calor excedente		468.486,2	468.486,2	468.486,2	468.486,2
<b>Salidas a la ecosfera</b>					
Residuos de secadero (impurezas)	t	19,16	19,29	19,35	19,55
Vapor de agua del secado	t	42,49	29,47	22,97	16,33
vapor de agua biogénica	t	17,25	15,63	14,80	13,65
Emisiones de CO <sub>2</sub> biogénico	t	57,24	51,89	49,11	45,31
Emisiones de CH <sub>4</sub>	t	0,90	0,90	0,90	0,90