



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



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

**Evaluación del impacto ambiental de Alternativas Energéticas para el
secado de arroz en la Unidad Empresarial de Base “Los Españoles”.**

Autor: Ing. Sively Domínguez Gómez

Tutor: Dr.C Ernesto Luis Barrera Cardoso

Sancti Spíritus, junio 2022

Pensamiento

*El mundo es un lugar peligroso, no a causa de los que hacen el mal
sino por aquellos que no hacen nada para evitarlo.*

- Albert Einstein

Agradecimientos

A Jose, por ser mi inspiración cada día

A mi familia y compañeros de trabajo, por incitarme a la constancia

A Liván, Nesty y Marianela, por estar siempre presente

A Dany, por su paciencia infinita

A mi tutor, por su dedicación y apoyo.

Dedicatoria

A quienes perduran en mi mente y en mi corazón: Mis padres.

Resumen

La producción de arroz ocupa un lugar importante en la alimentación mundial, pero el beneficio de este cereal para su consumo final, genera una gran cantidad de desechos, y requiere significativos consumos diésel. En este trabajo se realiza una evaluación de impacto ambiental (EAI) de cinco alternativas para suplir los requerimientos energéticos del proceso de secado en la UEB Los Españoles. Para lograr este objetivo se utilizaron las herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV), y el software Open LCA en su versión 1.10 para el procesamiento y análisis de los datos, resultado del balance por alternativas, así como el método ReCiPe con base de datos Ecoinvent 3.6. Se definió el objetivo y alcance del estudio, se elaboró el inventario de ciclo de vida para las alternativas propuestas, cuantificando los recursos consumidos y las emisiones al medio. Se consideraron los efectos intermedios (midpoint) y los efectos finales (endpoint), lo que permitió comparar los impactos de las alternativas sobre categorías de impacto (CI) evaluadas en estos enfoques. Se comprobó que la alternativa con más beneficios es la A-5, que refiere el uso del biogás, para generar electricidad, combinada con el empleo de cascarilla como combustible para el secado de arroz. Esta alternativa contribuye a una reducción del impacto ambiental del proceso, reflejado en la CI toxicidad humana no-carcinogénica, por la utilización de un proceso menos intensivo en cuanto al consumo de recursos y generación de emisiones, entre ellas las de zinc al suelo. Al realizar un análisis de sensibilidad para la Alternativa más beneficiosa (A-5), evaluando el efecto de esta sobre las categorías de impacto más perjudicadas (análisis por normalización del enfoque midpoint), se plantearon nuevos escenarios que consideraron cambios en la variable de mayor incertidumbre (suministro de cascarilla para el horno de secado). De esta forma se determinó que el tercer escenario propuesto (Sens3), es el que más impacta de forma negativa, reflejando que un aumento en el consumo de diésel, por no aprovechar la capacidad de carga de los equipos de transporte de cascarilla, impacta de forma perjudicial en el perfil ambiental, comparado con los otros escenarios considerados.

Abstract

Rice production occupies an important place in the world diet, but the benefit of this cereal for final consumption generates a large amount of waste and requires significant diesel consumption. In this project, an environmental impact assessment (EAI), is carried out to meet the energy requirements of rice drying process in "UEB Los Españoles". To achieve this objective, the Life Cycle Analysis (LCA) tools were used, and the Open LCA software in its version 1.10, for the processing and analysis of the data, the result of the balance by alternatives, as well as the ReCiPe method, based on data Ecoinvent 3.6. The objective and scope of the study were defined, the LCA inventory was prepared for the proposed alternative, quantifying the resources consumed and the emissions into the environment. The midpoint and endpoint effects were considered, which allowed comparing the impacts of the alternatives on the impact categories (IC) evaluated in this approaches. It was found that the most beneficial alternative is A-5, which refers to use of biogas to generate electricity, combined with the use of husks as fuel for drying rice. This alternative contributes to the environmental impact of the process, reflected in the IC non-carcinogenic toxicity, by using a less intensive process in terms of resources consumption and generation of emissions, including those of Zinc to the ground. When carrying out a sensitivity analysis for the most beneficial alternative (A-5), evaluating its effect on the IC most affected (analysis by normalization of the midpoint approach), new scenarios were proposed with changes in the variable of greatest uncertainty (supply of husk for the drying oven). In this way, it was determined that the third scenario proposed (Sens3), has the most negative impact, reflecting that an increase in diesel consumption, due to not taking advantage of the load capacity of the husk transport equipment, impacts detrimentally in the environmental profile, compared to the other scenarios considered.

Índice

Introducción.....	2
Capítulo 1. Marco Teórico	7
1.2 Situación medioambiental en Cuba.....	8
1.3 Impacto ambiental de la Producción de Arroz.....	9
1.4 Producción de biogás como alternativa para la reducción de impactos ambientales.....	10
1.4.1 Producción de biogás a partir de residuos arroceros. Codigestión.	12
1.4.2 Producción de Biogás a partir de residuos arroceros en Cuba.....	15
1.4.3 El biodigestor de Archea.....	16
1.4.4 Producción de biogás a partir de residuos vacunos y porcinos.	17
1.5 Uso de la cascarilla de arroz para reducir el impacto ambiental de la producción arroceras.	18
1.6 Evaluación de Impacto Ambiental (EAI).....	20
1.6.1 Análisis Exergético.....	21
1.6.2 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	22
Capítulo 2. Materiales y Métodos	27
2.1 Aplicación de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a las alternativas de aprovechamiento energético en la UEB Los Españoles.	27
2.1.1 Definición del Objetivo	27
2.1.2 Definición del alcance y la frontera del estudio.....	27
2.1.3 Elaboración del inventario de ciclo de vida para cada alternativa.....	30
2.1.4 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.	32
2.1.5 Interpretación de los resultados.....	32
Capítulo 3. Resultados del ACV para las alternativas propuestas	34
3.1 Definición de los límites del sistema.	34
3.2 Inventario calculado para cada alternativa.....	34
3.3 Resultados del ACV	35
3.3.1 Enfoque "midpoint"	35
3.3.2 Enfoque Endpoint	40
3.3.3 Análisis de Sensibilidad	41
Conclusiones:.....	43
Recomendaciones:.....	45
Referencias Bibliográficas	46

Introducción

En el mundo actual, el gran reto de la humanidad radica en alcanzar su desarrollo con la mínima degradación posible a la naturaleza que lo deja vivir pues es evidente que la actividad económica del hombre ha propiciado el deterioro del medio ambiente, manifestado sobre todo en el impacto del cambio climático.

Según el informe del PNUD 2019 sobre el desarrollo humano, el cambio climático tendrá numerosas consecuencias perjudiciales para el hombre, más allá de la pérdida de cosechas y de los desastres naturales. Se calcula que entre 2030 y 2050 provocará 250.000 muertes adicionales por año debido a la malnutrición, la malaria, la diarrea y el estrés térmico. En este informe se agrega además que cientos de millones de personas más podrían verse expuestas a un calor mortal de aquí a 2050, y es probable que el rango geográfico de los vectores de enfermedades —como los mosquitos que transmiten la malaria o el dengue— cambie y se expanda golpeando en primer lugar y con mayor dureza los trópicos donde residen la mayor cantidad de países en desarrollo.

Todo esto ha llevado al hombre a pensar en un desarrollo que no comprometa la estabilidad del planeta, enmarcado en el concepto de Desarrollo Sostenible (DS), presentado por la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo de Naciones Unidas en 1987, 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”.

Cuba, como país que trabaja en la construcción de una sociedad mejor para sus ciudadanos, dirige su política medioambiental de forma tal que permita lograr mitigar los efectos que sobre el medio tiene el crecimiento industrial y también ha hecho suyo los principios acordados en la Asamblea General de la ONU, en su Agenda 2030 en aras de lograr un Desarrollo Sostenible.

En su Informe Voluntario sobre DS 2019, nuestro país aborda como se tiene en cuenta en los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, la atención prioritaria al tema medioambiental, particularmente en el lineamiento 107, y en las Bases del Plan de Desarrollo Económico y Social al 2030, se determinan las principales líneas de acción respecto al enfrentamiento al cambio climático, que expresan además: “Elevar la eficiencia energética y el

desarrollo de fuentes renovables de energía, lo que contribuye, entre otros beneficios, a reducir la generación de gases de efecto invernadero, a mitigar el cambio climático y a promover un desarrollo económico menos intenso en carbono. La evolución de estas políticas, y de los conocimientos científicos que las sustentan, da lugar a la formulación y aprobación, en abril de 2017, del Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático, comúnmente conocido como "Tarea Vida". El Plan se estructura en 5 Acciones Estrategias, y 11 Tareas Específicas para garantizar entre otros aspectos la protección de los asentamientos costeros y la adaptación en la actividad agropecuaria.

El fomento de la agricultura es indispensable en Cuba y en ella juega un papel primordial las producciones agroindustriales que son responsables del 14 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.(Pereda & Díaz, 2015), así como de la degradación de los suelos, pérdidas de áreas boscosas y contaminación de las aguas con agroquímicos y pesticidas. Esto nos indica la urgente necesidad de tomar medidas para lograr producciones más amigables con el medio ambiente.

El arroz se considera el tercer cultivo agrícola de importancia a nivel mundial y su beneficio industrial es significativo por los requerimientos energéticos que demanda y el impacto ambiental de sus producciones.

Específicamente de la actividad agro-industrial del arroz se estima que a nivel mundial se tienen anualmente 731 millones de toneladas de paja arroz (Zhao & Zhsang, 2010) y más de 113 millones de toneladas métricas de cáscara.(Yu et al., 2009)

En Cuba se cultiva arroz en casi todas las regiones 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 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.

Los volúmenes de residuos que se generan en el proceso son significativos. El producto húmedo que entra a la industria y que procede del campo viene con una determinada cantidad de materias extrañas que oscilan entre un 10 y un 15 % del arroz húmedo. Estas materias extrañas o impurezas, como comúnmente se le conoce, están compuestas por todo aquello que acompaña al arroz húmedo cosechado, pero que no tiene que ver botánicamente con la planta de arroz, además de restos vegetales presentes tales como paja, tallos, hojas y granos vanos y semivanos, granos verdes lechosos, granos pelados partidos y no pelados partidos.

El residuo de secado obtenido en ocasiones arde espontáneamente debido a la combinación de las altas temperaturas y la humedad que almacena. El residuo quemado se esparce por toda el área alrededor de la instalación contaminando el aire y no solo esta sino también parte de la paja que no se quema.

Se han logrado varios destinos para usar la cascarilla de arroz procedente del proceso de molinado, sin embargo, esto no ocurre con el residuo del secado de arroz.

En la zona central de Cuba, provincia Sancti Spíritus, se encuentra una zona alta productora de arroz, a cargo de Empresa Agroindustrial de Granos (EAIG) “Sur del Jíbaro”. En la Unidad Empresarial de base (UEB) “Los Españoles”, perteneciente a esta empresa, no se aprovecha el residuo de secadero en su totalidad. En ocasiones los habitantes de los poblados aledaños limpian manualmente este producto y lo aprovechan en la alimentación porcina fundamentalmente, aunque es difícil obtener grandes cantidades del mismo por esta vía. No obstante, el departamento de Ganadería de la EAIG Sur del Jíbaro, realizó varias pruebas para utilizar este residuo, mezclado con el pienso animal, en proporción 40:60, para alimentar los cerdos de ceba en los centros porcinos de la empresa.

El aprovechamiento energético por la ruta del biogás de los residuos que se generan durante la actividad agropecuaria, puede constituir una opción para disminuir el impacto ambiental de los mismos y evitar la emisión de gases de efecto invernadero, reduciéndolas emisiones de CO₂ equivalente por sustitución de combustibles fósiles. Adicionalmente, se obtiene del proceso un residuo digerido con propiedades como fertilizante orgánico que permite mantener la productividad del suelo lo más cercano posible a su potencial, devolviendo los nutrientes de forma más asimilable por las plantas. (Weiland, 2010)

En investigación realizada para buscar alternativas de tratamiento a los residuos de la producción de arroz en Cuba se definieron los parámetros fundamentales del proceso de digestión anaerobia de estos residuos como única fuente de carbono y se identificó este proceso como una variante biotecnológica sencilla que permite disminuir la carga contaminante del residuo y generar productos valiosos. Además se realizó la caracterización físico-química de estos residuos y se determinó el potencial de biogás de los mismos, concluyendo que la paja de arroz y el residuo de secadero pueden ser tratados por vía anaerobia con rendimientos similares a otros materiales reportados en la literatura (Contreras, 2013).

En estudios recientes se demostró que la codigestión del residuo del secadero (RS) y el residuo porcino (RP) tuvo un efecto sinérgico para la mezcla RS95:RP5, con un incremento en un 18 % del rendimiento de metano respecto al valor esperado por la contribución individual en la mezcla (López et al., 2019).

La entidad donde se encuentra el objeto de investigación de este proyecto es la UEB Los Españoles, perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos Sur del Jíbaro, del municipio la Sierpe, provincia Sancti Spíritus.

Esta entidad, se produce anualmente un promedio de 32 000 toneladas de arroz seco, según sus datos estadísticos. Paralelamente se obtienen en el mismo período de 2 500 a 3 000 ton de residuos de este proceso que se vierten al medio ambiente.

Esto nos da la medida de la necesidad de resolver este problema y buscar una alternativa para procesar dichos residuos y propiciar una solución como parte de las Producciones Más Limpias, contribuyendo además a sustituir parte del consumo de diésel en el proceso de secado por biogás.

Para corroborar estos aspectos se realizará en este proyecto el estudio de impacto ambiental del ciclo de vida de las alternativas de requerimientos energéticos para el proceso de secado de arroz en la unidad empresarial de base (UEB) “Los Españoles” lo que constituye el objetivo fundamental de este proyecto.

Objetivo general:

Evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida de las alternativas energéticas para el proceso de secado de arroz en la Unidad Empresarial de Base (UEB) "Los Españoles", perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos (EAIG) "Sur del Jíbaro".

Objetivos específicos:

- ✓ Desarrollar el inventario de ciclo de vida para las alternativas energéticas de secado de arroz en la UEB "Los Españoles".
- ✓ Determinar el impacto ambiental de las alternativas energéticas para el secado de arroz.
- ✓ Valorar la sensibilidad del impacto ambiental del ciclo de vida ante cambios en variables

Hipótesis:

- Si se utiliza la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a las alternativas energéticas de secado en la UEB Los Españoles, se podrá evaluar el impacto ambiental de las mismas.

Objeto de Estudio: El proceso de secado de arroz en la UEB Los Españoles.

Campo de Acción: El impacto ambiental de las alternativas energéticas para el secado de arroz en la UEB Los Españoles.

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1 Situación Medioambiental actual

Según el diccionario terminológico de la contaminación ambiental, este fenómeno está dado por la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico o biológico) que provoque un daño y tiene su origen por manifestaciones de fuentes naturales o a diferentes procesos productivos del hombre, denominados fuentes antropogénicas.

Cuando estos daños provocan una variación estadísticamente significativa en las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, durante un período prolongado, estamos en presencia del cambio climático.

A nivel mundial, los problemas de contaminación tanto en suelos como en agua y aire se deben principalmente a acciones antropogénicas.

Algunos de los aspectos de la contaminación ambiental mundial en la actualidad han sido abordados en la (CMCC, 2005), Guía de la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, 2005; El informe elaborado sobre el cambio climático por el IPCC en el 2007, en artículos del Programa Medioambiental de Naciones Unidas 2012 y 2014.

La mayoría de estos artículos coinciden en que ha aumentado la temperatura en la superficie de la capa de permafrost a 3°C desde la década de los 80 en el Ártico, produciéndose una retirada masiva de los glaciares en las montañas y disminuyendo la cantidad de hielo sobre la tierra. En el mar se han manifestado profundos cambios en su nivel aumentando en 19 cm e incremento de la salinidad sobre todo en las latitudes medias, trópicos y subtropicos donde predomina la evaporación. La incorporación del carbono antropogénico, a partir de la revolución industrial, ha provocado un aumento en la acidez oceánica, disminuyendo el PH en 0.1 unidades como promedio en su superficie. (Useros, 2012), (Orozco, 2013). Paralelamente las sequías son cada vez más intensas y largas en ciertas áreas y los huracanes tropicales son cada vez más frecuentes y con períodos de vida más largos y de mayor intensidad.

Otros fenómenos observados son la alteración del régimen de precipitaciones y modificaciones en las variables del ciclo hidrológico, así como incremento de la temperatura media global y las concentraciones de gases de efecto de invernadero (Dióxido de Carbono, Metano y Óxido Nitroso) específicamente de Dióxido de Carbono (CO₂) que excede actualmente las 390 partes por millón, casi un 40% por encima de los niveles preindustriales. (Alonso & Clark, 2015)

Recientemente la Organización Mundial de la salud, ha emitido advertencias sobre el calentamiento global y las repercusiones que se han observado sobre la salud humana de este fenómeno.

Estos aspectos constituyen evidencias científicas incuestionables de las manifestaciones del cambio climático de modo que urge tomar acciones de mitigación de estos cambios en todas las áreas de las esferas políticas, sociales y económicas.

1.2 Situación medioambiental en Cuba

Cuba, como país insular tiene características que la hacen vulnerable a los efectos del cambio climático y ha sido afectada considerablemente por las variaciones ambientales, cambios en el nivel del mar y eventos extremos. (Alonso & Clark, 2015).

Según (Gutiérrez, 2016), nuestro país viene trabajando desde el 1997, para cumplir los compromisos contraídos como miembro de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático. Los cambios medioambientales más relevantes en Cuba según este autor, están relacionados con:

- la degradación de los suelos: teniendo en cuenta que el 65% de los suelos tienen menos de 50 % de rendimiento potencial por erosión, 3.4 millones de hectáreas con alto grado de acidez, 1 millón de hectáreas con alto grado de salinidad, 2.7 millones de hectáreas con problemas de drenaje.
- Contaminación de agua, aire y tierra producto de la existencia de instalaciones industriales en zona urbanas, falta de recursos financieros para tratamiento y reutilización de residuales, deficiente monitoreo de emisiones a la atmósfera, agua y suelos.
- Pérdida de diversidad biológica: debido a la deforestación, inadecuadas prácticas agrícolas y manejo de suelos, pesca indiscriminada e inadecuados mecanismos de regulación.
- Escasez de agua: Debido al cambio climático en sí, bajas precipitaciones, reducción de un 15 % comparado con períodos anteriores a 1972.

La panorámica medioambiental de Cuba se encuentra exhaustivamente reflejada en informe realizado en junio del 2018, por el Centro de Gestión de la Información Económica, Medioambiental y Social, donde a través de un gran número de indicadores se detalla la situación ambiental cubana y las acciones a realizar para instrumentar prácticas sustentables de desarrollo.

Se observa en esta publicación como desde 2014 y hasta 2017, existe en Cuba una ligera disminución del dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en la atmósfera. Ambos registros están por debajo de los 50 y 40 microgramos por metros cúbicos respectivamente, establecidos como valores límites para estas sustancias. El PH de las lluvias anuales se mantiene en el entorno de los 6.5 y los gases de efecto invernadero disminuyen discretamente del 2012 al 2017, con la mayor emisión producto del sector energético. Las sustancias controladas, es decir hidroclorofluorocarbonos, reportan una disminución en la atmósfera para el período anteriormente mencionado.

Por otra parte, es de señalar que se refleja en esta publicación un aumento en Cuba de los gastos de inversión para la protección al medio ambiente, por actividad ambiental desde el 2013 y hasta el 2017 en 125 282.8 Miles de pesos, lo que evidencia la preocupación del gobierno cubano en este sentido.

En el Informe Nacional redactado en el 2019, sobre la Implementación de la Agenda 2030 en Cuba, se expresa la política de la isla, a seguir para cumplir con el objetivo de desarrollo sostenible número 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, apoyada en la Tarea Vida, que constituye el plan del estado para el enfrentamiento a esta problemática con amplia ejecución por los organismos involucrados.

1.3 Impacto ambiental de la Producción de Arroz

La producción de arroz, como actividad humana, genera también un impacto económico, social y ambiental, de ahí la necesidad de desarrollar un estándar de sustentabilidad de la actividad que permita reconocer los impactos negativos de la misma, para gestionarlos de la mejor manera posible. (Carbonell, 2017)

Según (Gadde et al., 2009), el cultivo de arroz es una de las actividades que aporta a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial

Como resultado del proceso agroindustrial del arroz, se generan una gran cantidad de subproductos que encuentran un uso adecuado, pero se obtiene además un alto volumen de residuos que aún no se aprovechan en su totalidad y se vierten al medio ambiente (Ribero, 2010). El manejo o disposición de los residuos de este proceso agroindustrial, es una problemática que aún no encuentra una solución efectiva, a pesar de los estudios realizados sobre el potencial energético y alternativas de uso de estos residuos ofreciendo soluciones energéticas y medioambientales. Algunas de estas soluciones han sido expuestas

por (Weiland, 2010); (Lübken et al., 2010) (Ribero, 2010); (Contreras, 2013) (López et al., 2019)

Los países grandes productores de arroz requieren del uso de la aviación para sembrar las extensas áreas agrícolas, así como para sus atenciones fitosanitarias.

En la etapa de cosecha de arroz se genera el primer residuo orgánico del proceso, constituido por los restos de la planta después de la cosecha, resultado de la limpieza de las máquinas cosechadoras denominado paja de arroz. El índice de generación de este residuo es de 4.86 t/ha (Ribero, 2010) y queda depositado en el suelo. En algunos casos se quema al aire libre con la consecuente emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (García et al., 2012). En el mejor de los casos este residuo se emplea como alimento animal, formando parte de pacas que se almacenan para períodos de sequía.

En el proceso industrial, donde se beneficia el arroz, se encuentran las etapas de secado y molinería. Ambas etapas son altas consumidoras de combustible y electricidad, con índices de consumo de 15 Litros de diesel/ toneladas de arroz y 22 kWh/toneladas de arroz en el secado así como 45 kWh/toneladas para molinar el grano, según las normas para el arroz cáscara seco NP 1623-12:86. Como resultado se obtiene el arroz para el consumo humano, así como los subproductos salvado o polvo de arroz y la cabecilla, con amplio uso en el consumo animal y los desechos compuestos por las impurezas que se extraen en los procesos de limpieza en el secado y la cascarilla que surge en el proceso de molinado propiamente dicho. La cascarilla resulta un material muy estable, de alto contenido de lignina, de baja tasa de mineralización y un buen valor calórico. Posee baja densidad (128 Kg/m³), es muy ligero y de buen drenaje (Ribero, 2010). El flujo de producción de arroz e impactos medioambientales, se muestran en el **Anexo 1**.

1.4 Producción de biogás como alternativa para la reducción de impactos ambientales.

El biogás se produce mediante un proceso de degradación de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas, o sea en ausencia de oxígeno. La digestión anaeróbica es producto de la acción de bacterias, las cuales se denominan metanogénicas, que degradan la materia, liberando metano en el proceso. Dichas bacterias metanogénicas son el último eslabón de una cadena de

microorganismos encargados de degradar las materias orgánicas y devolver los productos descompuestos al medio ambiente

El biogás consiste en una mezcla de metano (60%), dióxido de carbono (40%), vapor de agua en nivel de saturación, trazas de sulfuro de hidrógeno y amoníaco, además puede contener hidrógeno (0 – 2%), monóxido de carbono (0 – 1%), nitrógeno (0 – 1%) y oxígeno (0 – 1%). El hidrógeno es un intermediario en el metabolismo anaeróbico y algunas bacterias pueden producir trazas de CO. (Carrillo, 2003); (Wilkie, 2005).

El biogás se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos. (Fernández & Saavedra, 2007)

El proceso de digestión anaeróbica, a través del cual se genera biogás, se conoce y se aplica desde la antigüedad, aunque no precisamente para reducir impactos ambientales, sino en interés de sus productos finales, como obtención de etanol, ácido láctico o para curtido de cueros. (Soncco, 2019)

Ya en el año 1881 comenzó a utilizarse el biogás como fuente de energía para calefacción e iluminación, en Francia por Louis Pasteur, en Inglaterra por Donald Camerón y en Estados Unidos de Norteamérica por el Dr. Louis Kinnincutt. En el año 1900 se empleó el biogás para poner en funcionamiento un motor en Bombai, India, por Charles James (Antonio, 1996)

A partir del año 1980 se comenzaron a fomentar estudios sobre el uso de energías renovables, entre ellos la tecnología del biogás, con el objetivo específico de reducir la carga contaminante y la sustitución de abonos químicos, con el empleo de los efluentes del proceso de digestión anaeróbica en los digestores. (Apes, 2010)

El uso de biogás resulta ser una solución efectiva a la dependencia energética y a la contaminación de fuentes de agua, al brindar un sistema de tratamiento de aguas residuales (aguas verdes), previo a su utilización como fertilizantes. A esto se agrega que el gas, que tiene un alto contenido de metano, puede emplearse como fuente de energía, para calentar agua y generar electricidad (Lagos & Manuel, 2013). El digestato obtenido es aplicable al suelo como mejorador de las características físicas, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad y de filtración de agua y de intercambio catiónico, aportando nutrientes para el desarrollo de núcleos microbianos que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo (Metcalf et al., 2003)

El uso del biogás en la reducción de impactos ambientales, está cada vez más difundido en países como Alemania donde el número de plantas superan ya las 3 000. Dinamarca y Holanda poseen sistemas avanzados para el tratamiento de desechos orgánicos húmedos, al igual que Nepal, Sur Corea, Brasil y Tailandia. China e India presentan también plantas que produce biogás a gran escala, como iniciativa para reemplazar el uso de combustibles fósiles y, tratamiento de residuales, con el consecuente establecimiento de una fuente adicional de ingresos económicos, no sólo para las instalaciones a gran escala, sino también para agricultores de zonas rurales (Camargo, 2013)

Entre los sustratos más susceptibles a usar en la producción de biogás se encuentran además de los residuos de origen animal, la biomasa. Clasifican como biomasa residuos agroindustriales, residuos de cosecha y residuos forestales. (Carrillo, 2003)

Según (Weiland, 2010), (Lübken et al., 2010), el biogás, producto del tratamiento anaerobio de la biomasa orgánica se considera una forma de energía limpia y renovable que puede sustituir fuentes de energía convencionales, especialmente en áreas rurales y una solución que abarca ambas aristas: medioambiental y energética.

1.4.1 Producción de biogás a partir de residuos arroceros. Codigestión.

Es evidente que el uso de los residuos arroceros para producir biogás y generar energía tiene una incidencia directa en la reducción del consumo de combustibles fósiles para generación eléctrica, con un efecto positivo desde el punto de vista económico y además por la contribución a la disminución de los GEI. Dentro de los residuos arroceros se encuentran la paja de arroz, resultado de la cosecha del cereal, los residuos de secado, provenientes del proceso de beneficio industrial en secaderos y la cascarilla o cáscara de arroz, resultado de la molinería del grano. Desde 1986 fueron evaluados por (Kalra & Panwar, 1986) los residuos del cultivo del Arroz (paja y cascarilla) como sustratos de la digestión anaerobia para la producción de metano con resultados alentadores.

En investigación científica, (Contreras, 2013); demostró que la paja de arroz y el residuo de secado, como única fuente de sustrato, tienen un potencial de biogás importante, hasta 0,5 m³kgSV⁻¹) en la paja en régimen termofílico, mientras que la cascarilla reportó un rendimiento de biogás muy bajo, en las condiciones de estudio, por lo que no se considera efectivo su uso en la digestión anaerobia. Así

mismo en el análisis que se realizó sobre cinética y biodegradabilidad de estos residuos, se determinó que los mejores valores se reportan para la paja de arroz, seguida del residuo de secadero, operando en régimen termofílico.

En estudio realizado por (López et al., 2019), se concluyó que la codigestión del residuo de secado (RS) y el residuo porcino (RP), evidenció un efecto sinérgico para la mezcla RS95:RP5, con un incremento de un 18 % del rendimiento de metano, respecto al valor esperado por el aporte individual en la mezcla.

En la revisión bibliográfica realizada, sobre la producción de biogás con residuos arroceros, la mayoría de las investigaciones reportadas, coinciden en que este proceso de digestión anaerobia reporta mejores resultados a través de la codigestión y no con el residuo individual como único sustrato, por lo que abordaremos este tratamiento a la par de las investigaciones que lo afirman.

Codigestión

El proceso de codigestión anaeróbica tiene lugar con la participación de uno o varios sustratos de diferente origen. El resultado de esta combinación en las proporciones adecuadas es mayormente beneficioso al permitir el incremento la producción de biogás, así como el valor del fertilizante obtenido como subproducto final del proceso. Así mismo la codigestión puede reducir el efecto de compuestos que pueden resultar tóxicos e inhibitorios sobre el proceso. (Cendales, 2011)

Según (Pereda & Díaz, 2015) para lograr el objetivo de la codigestión se debe determinar la mezcla apropiada de los sustratos que se combinan, en base a la materia orgánica que cada uno es capaz de aportar, obteniendo un mejor balance en los parámetros de alimentación como la relación carbono-nitrógeno, pH-alcalinidad, macro y micronutrientes entre otros.

(Gutiérrez et al., 2012); en su investigación: “Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía” utilizó residuos como pasto seco, paja de maíz seca, cascarilla de arroz seca, camalote seco, camalote húmedo, estiércol de cerdos, estiércol de gallinas y estiércol de vacunos para incursionar en el campo de los biocombustibles en aras de obtener mejores rendimiento y calidad en cuanto a su producción para reducir la contaminación ambiental. Llegaron a la conclusión que el biogás es una alternativa ecológica viable para ser usado como combustible.

(Bishir & Ekewenchi, 2012), en su investigación: “Estudios cinéticos de la producción de biogás por hongos a partir de determinados residuos agrícolas”

basada en un estudio sobre la degradación anaeróbica de la caña de azúcar y la cáscara de arroz por hongos celulíticos, llegaron a la conclusión que las tasas medias de producción de biogás determinados para la caña de azúcar y la cáscara de arroz fueron 57 cm³ por día y 47 cm³ por día, mientras que el rendimiento de biogás evaluados pareció ser alto, 15,2% de la caña de azúcar y 12,5% de cáscara de arroz. Asimismo, los rendimientos de otros residuos agrícolas fueron inferiores a estos valores. Estos resultados demostraron que el biogás de la cáscara de arroz es de mejor calidad que la de la caña de azúcar debido a su menor contenido de CO₂ y se encontró que cuando la cantidad de los substratos se duplicaron, respectivamente, la tasa media de la producción de biogás se duplicó, lo que implica que cinéticamente, la degradación es probablemente de primer orden. El rendimiento del biolíquido de la caña de azúcar se determinó en 94% y cáscara de arroz fue de 68%.

(Ezekoye et al., 2014), en su investigación: “Caracterización de biogás producido a partir de cascarilla de arroz y algas utilizando un biodigestor de domo fijo” llegaron a la conclusión que de un total de 35 kg de suspensión a base de 5 kg de cáscara de arroz y 30 kg de algas mezcladas con agua en una proporción de 1:6 llevada a cabo en una digestión anaeróbica de tipo Batch y a temperaturas mesófilicas de 29,00°C a 33,45°C en un lapso de tiempo de 75 días, se produjo 156,25 litros de biogás.

(Chandra et al., 2012) (citado en Contreras *et al*, 2012) “reportan para la paja un rendimiento de metano 167 kg CH₄T-1” En esta investigación se obtuvo 334 Kg de biogás por tonelada de paja de arroz utilizando paja de arroz y agua del río Utcubamba en época seca bajo condiciones mesofílicas, los resultados difieren de los de Contreras et al, 2012, porque Chandra *et al*, calcularon sus resultados en Kg de CH₄. Si se tiene en cuenta que el biogás está compuesto en un 50 a 70 % de CH₄, los resultados serían similares.

(Hernández, 2014) realizó una investigación en la que adicionaron arcillas residuales industriales para estimular la producción de metano durante la codigestión anaerobia de residuos porcinos y paja de arroz, resultando un aumento en la producción de biogás en un 40%. Esto demostró el efecto positivo de la adición de co-sustratos orgánicos de naturaleza agrícola.

(Toledo., 2017) diseñó un biodigestor tubular de polietileno para producir biogás a partir de la paja de arroz y agua de río en la ciudad Bagua Grande-Amazonas en Perú. La producción resultó ser 7.69 m³ de biogás por día, de bajo costo

contribuyendo a la sustitución del consumo de leña de una familia promedio y disminuyendo la contaminación ambiental en esa zona.

1.4.2 Producción de Biogás a partir de residuos arroceros en Cuba

Los residuos arroceros en Cuba están débilmente explotados, a pesar de que se han realizado importantes investigaciones que demuestran lo efectivo de sus usos formando parte de las fuentes renovables de energía, al clasificar como biomasa, viable para producir energía en forma de calor y en la producción de biogás a partir de la determinación de sus potenciales.

(Contreras & Pereda, 2012) en su investigación: “Aprovechamiento energético de residuos arroceros por bio-conversión. Caso de estudio Cuba” realizaron una caracterización bioquímica de paja de arroz, cáscara de arroz y residuo del proceso de secado, provenientes de la región central de Cuba con el objetivo de evaluar su potencial energético mediante la ruta de bio-conversión a biogás y para la determinación del potencial bioquímico de biogás de cada residuo arrocero analizado en el Instituto Agrario de Bornim-Potsdam (ATB) en Alemania. Llegaron a la conclusión que los residuos arroceros poseen una composición química adecuada para la producción de biogás, con limitaciones solamente en la relación C/N, además el análisis del uso energético de estos residuos vía biogás demostró que por este concepto se podrían generar un índice de 0,73 MWht-1 de residuo y hasta un 1,5% del consumo de electricidad de país, a la vez que se contribuiría a disminuir en un 0,5% las emisiones netas del país y hasta un 7,2% las del sector energético.

(Navarro et al., 2016) elaboraron una metodología para obtención de biogás a partir de residuos de cosechas del arroz utilizando como inóculo aguas residuales. Se realizó además la caracterización físico-química de los residuales del arroz y el diseño de un reactor de mezcla completa con agitación continua y recirculación de 20 m³ utilizando la mezcla de paja de arroz, cáscara y otros residuales del proceso de secado del arroz (casarillas y polvo) como sustrato y un biol residual efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales como inóculo.

En la central provincia Sancti Spíritus, se elaboró en el año 2020, (Spíritus, 2020) el Programa General para el Desarrollo Local en el uso del Biogás como Fuente Energética y disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus, como parte de las acciones a realizar para dar cumplimiento a la política energética del país en cuanto al incremento de las fuentes renovables de energía, que posibiliten reestructurar la matriz energética. Las bases para la ejecución de

esta política energética están abordadas en los Lineamientos de la Política Económica y Social de Cuba, establecidas en el 2011 y actualizadas en el 2016. En este sentido se incluye en este programa el uso de los residuos para la producción de biogás, incluyendo los agrícolas que no son ampliamente difundidos en Cuba, sin embargo se determinó que en esta zona central, existe un potencial para la paja de arroz de 22 394 m³/día, con los que se podría sustituir 13 205 litros de diésel diarios en la actividad de secado de arroz, de gran envergadura en la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” ubicada en esta región, con la consecuente disminución del efecto ambiental negativo que tiene la presencia de estos residuos arroceros en los suelos.

1.4.3 El biodigestor de Archea

El biodigestor diseñado y elaborado por Archea Biogastechnologie GmbH, es una planta con un valor de 1.07 Miles de Euros. En ella se prevé combinarán los residuos del proceso de secado con la excreta de cerdos y gallinas de dos instalaciones que se encuentran dentro de área de la misma entidad (UEB Los Españoles) para producir energía eléctrica y térmica.

La planta consta de los siguientes componentes:

- Alimentación desde el secadero de arroz
- Unidad para la alimentación de sustratos sólidos
- Tornillos sinfín de alimentación
- Digestor horizontal: Etapa de Hidrólisis
- ThermDes
- Digestor vertical: Etapa de metanización
- Aprovechamiento del biogás

La planta debe generar una potencia de 250 kW, con un rendimiento eléctrico de un 35 %. La potencia térmica generada debe estar en el orden de los 230 kW con igual rendimiento térmico (35%) y una potencia térmica nominal total de aproximadamente 575 kW.

Fuente: Datos suministrados por ARCHEA.

Las posibilidades energéticas de esta planta permiten estimar una generación de electricidad máxima de 1 781 MWh al año, que puede ser inyectada a la red nacional, e igual cantidad de energía térmica que se emplearía en el proceso de secado de arroz, disminuyendo el consumo de diésel actual.

El residuo sólido del proceso (digestato) es un material homogéneo, rico en materiales tales como: nitrógeno, fósforo y potasio, que le atribuye gran valor como biofertilizante, proporcionando una alternativa para sustituir agroquímicos.

1.4.4 Producción de biogás a partir de residuos vacunos y porcinos.

La producción de biogás a partir de excretas pecuarias, ha sido ampliamente difundida en el mundo. Los residuos de origen pecuario constituyen una fuente importante de residuos orgánicos biodegradables, aunque con dificultades en la forma de gestionarlos al no poseer en muchos casos una infraestructura adecuada que permita su recolección para reutilización (Cendales, 2011)

En un proceso de producción de biogás a partir de estiércol vacuno, con un tiempo de retención hidráulica de 15-30 días, solo una parte de las fibras del residuo se degrada ya que constituye un sustrato complejo con considerable contenido de materiales orgánicos disueltos y particulados. Una opción viable para aumentar el rendimiento de biogás es la codigestión con residuos agrícolas, debido a la acción sinérgica que presentan el gran contenido de nutrientes disponibles para el desarrollo de las poblaciones microbianas responsables del proceso (Cendales, 2011).

Por su parte la producción de biogás a partir de residuos porcinos, ha encontrado también una amplia representación, al ser la producción porcina de las mayores en el mundo debido a que la carne de cerdo es actualmente la de mayor consumo, por su gran calidad y sabor (Navarrete, 2012)

De esta forma el tratamiento de los desechos porcinos a través de la digestión anaerobia, es cada vez más requerido por los aumentos en sus volúmenes que propician degradación de agua, suelo y aire y generación de olores indeseables cuando no poseen una disposición ambiental adecuada. (FAO; INTA, 2012)

Se estima que, en el mundo, la producción de cerdos genera alrededor de 668 millones de toneladas de CO₂-eq, que representan el 9% de las emisiones del sector pecuario (FAO; INTA, 2012)

La producción de biogás a partir de desechos porcinos como único sustrato es ampliamente utilizada, pero indudablemente la codigestión proporciona mayores rendimientos.

Otros estudios de codigestión en sustratos ganaderos fueron realizados por (Ahring, 1992) mezclando estiércol ganadero con residuos de elaboración de piensos. De igual forma se han obtenidos resultados alentadores al mezclar

estiércol vacuno y residuos de hojas machacadas, paja de trigo y restos de vegetales pretratados con hidróxido de sodio por (Dar & Tandom, 1992) .

Otro ejemplo es la mezcla de residuales porcinos con otras pajas dando resultados positivos de potencial de biogás (Masciandaro et al., 1994), (Callaghan et al., 1999), mezcló residuos vacunos con residuos de frutas y verduras con buenos resultados de potencial de biogás.

En Cuba, la mayoría de los biodigestores que existen, producen biogás a partir de residuos vacunos y sobre todo porcinos. Según el Programa General para el Desarrollo Local en el uso del Biogás como Fuente Energética y disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus, el potencial de biogás de esta región, a partir de residuos vacunos es de 3 854 m³/día y a partir de residuos porcinos es de 11 662 m³/día, representando el 9.55 % y 3.15 % respectivamente.

1.5 Uso de la cascarilla de arroz para reducir el impacto ambiental de la producción arrocerá.

De los residuos obtenidos en la producción de arroz, la cascarilla es el que más uso ha encontrado, con fines energéticos mayormente, con la consecuente sustitución de combustibles fósiles y, por ende, disminuyendo el impacto ambiental de este residuo.

(Sierra, 2009) en Colombia, propuso varias alternativas de uso para la cascarilla, con el objetivo de mitigar el manejo inadecuado de este residuo y disminuir el grado de contaminación que proporciona al aire y suelo el vertimiento de este desecho arrocerá. Algunas alternativas son: como combustible, en la construcción, como sustrato en hidropónicos, en compost, jardinería y otros.

(Quinceno, 2010), propuso utilizar la cascarilla como combustible en Colombia, a partir de investigaciones y experiencias existentes en España, China, Brasil y Colombia, donde se construyeron hornos de lecho fluidizado donde como resultado de la quema de este residuo, se obtienen cenizas para reforzar materiales de la construcción, elaborar aislantes térmicos. Así mismo refiere este autor como en España el Instituto Tecnológico Agroalimentario y la Universidad Valenciana, utilizan este residuo que se desecha, en la cogeneración eléctrica, (Toledo., 2017), evaluó la posibilidad de usar cascarilla como camada en la crianza de cerdos, mejorando el bienestar animal con el consecuente impacto ambiental positivo con el uso de este residuo.

(Rojas, 2018) propuso generar biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en La Piladora “La Merced S.R.L” en Perú empleando biodigestores de cúpula fija, ya que representa una opción viable a la generación de energía limpia, el cuidado del medioambiente y la disminución del efecto invernadero.

En Cuba, se han realizado estudios para ampliar el uso de la cascarilla de arroz, aunque su aprovechamiento es similar a otras partes del mundo, es decir como combustible en primera instancia, por la alta demanda energética de las tecnologías instaladas específicamente para la producción de arroz.

En un inicio las tecnologías de combustión de cascarilla que aisladamente se aplicaban, eran bastante ineficientes y emitían a la atmósfera muchas cantidades de partículas volátiles, sobrepasando los límites establecidos. La ceniza obtenida contenía sólidos que no le permitían una calidad adecuada para ser usada en otras industrias, con el consecuente daño al medio ambiente (Andino et al., 2007) Actualmente se ha considerado el uso de la cascarilla utilizando tecnologías de gasificación, aplicable a biomásas en todo el mundo con una mejor conversión del residuo y menor impacto ambiental. Es así que en la instalación industrial Emilio Lastre en Granma se propuso usar un quemador doble turbulizador estático (QDTE) para la combustión de la cascarilla y satisfacer las necesidades energéticas de la unidad de secado de esta entidad. (Andino et al., 2007)

Con la participación del Grupo Bioenergía de Cubaenergía, se han ejecutado, desde el 2015, plantas de gasificación de cascarilla en la Empresa Agroindustrial de Granos “Los Palacios” de Pinar del Río; se ha ejecutado el proyecto Biomás Cuba, encabezado por la Estación Experimental de Pastos y Forraje Indio Hatuey, con la instalación de plantas gasificadoras en Hollo Colorado y Jucarito para sustituir diésel de secado y aportar a la generación eléctrica, una vez que se han cubierto las necesidades básicas de estas instalaciones.

(Navarro et al., 2016) propusieron y diseñaron un horno para calentar aire requerido en el proceso de secado de la Unidad Económica Básica Victoria de Girón utilizando cascarilla como combustible, con el consecuente aprovechamiento de este residuo arrocero. Con tecnología similar se aprovecha la cascarilla para secar arroz en los secaderos de tecnología IMAD en la empresa Agroindustrial de Granos de Camagüey.

1.6 Evaluación de Impacto Ambiental (EAI)

Se dice que hay un Impacto Ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes del medio. (Hernández, 2012)

Según este autor, (Hernández, 2012), el procedimiento tiene la finalidad de evitar o mitigar la ocurrencia de efectos ambientales no deseados, que tienen lugar producto a planes, programas y proyectos de obras que se ejecutan, mediante una estimación de posibles modificaciones al medio ambiente causadas por dichas obras, que al final reciben la autorización o licencia ambiental para realizarlas o el no otorgamiento de la mencionada licencia según proceda.

La evaluación de impacto ambiental contribuye entonces a desarrollar una política de responsabilidad social y ambiental para los procesos productivos y de servicios y revela una forma de anticiparse a los impactos de las actividades humanas, como son la implementación de tecnologías eficientes, que mejoren procesos de producción, logrando entonces reducir costos y mejorar la imagen de las empresas ante consumidores y proveedores (Edwards, 2010)

Acompañando a la Evaluación de Impacto ambiental, encontramos el Estudio de Impacto Ambiental.

Concretamente el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) constituye una herramienta técnica-científica y un instrumento de gestión y consenso, para alcanzar la calidad ambiental y el bienestar social en determinada área o sector económico (Hernández, 2012)

(Conesa & Fernandez, 2002), en su Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental, refiere que el EIA tiene como objetivo identificar, analizar y evaluar los impactos ambientales positivos y negativos, producidos por las actividades productivas desarrolladas en el marco de un proyecto.

Para hacer efectivo el EIA, se utilizan varias herramientas, las más conocidas son las matrices interactivas que relacionan las actividades del proyecto con los factores ambientales, describiendo esta relación en términos de consideraciones de magnitud e importancia. Algunas de estas matrices se denominan como: matrices simples y en etapas. Otras herramientas son los métodos de diagrama de redes y de listas de control.

Es necesario tener en cuenta que el EIA debe ser flexible para adaptarse a situaciones nuevas, imprevisibles o temporales, tanto de origen natural como humanas, cuyas consecuencias necesiten ser evaluadas. Requiere de acciones de observación, muestreo, medición y análisis de datos técnicos y ambientales, que se toman para definir las características del medio o entorno, identificar los impactos ambientales de las actividades, obras o proyectos en sus diferentes fases, y conocer su variación o cambio durante el tiempo; de manera de asegurar que las acciones que ejecutan no afecten al ambiente y por ende a los seres humanos (Díaz, 2019)

1.6.1 Análisis Exergético

Se han planteado diferentes metodologías de análisis con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir pérdidas de energía en una instalación. Una de estas metodologías es la que plantea el análisis Exergético, basado en la segunda ley de la termodinámica, que permite el análisis de sistemas térmicos identificando irreversibilidades, que no pueden ser eliminadas pero si pueden mejorarse; (Aljundi, 2009), (Elsafi, 2015). La exergía en sí posibilita medir la calidad de la energía, por lo permite analizar la eficiencia energética de procesos industriales, a través de comparaciones de diferentes alternativas para valorar su rendimiento energético, es un parámetro que mide la calidad de la energía, este puede emplearse para analizar la eficiencia energética de los procesos industriales. Con un análisis de exergía pueden compararse diferentes alternativas para comprobar cuál tiene el mayor rendimiento energético, sin embargo, no proporciona soluciones por sí misma.

El análisis exergético posibilita identificar y cuantificar la magnitud de las fuentes de ineficiencias termodinámicas (KOTAS, 1986); (Bejan, 1988), con lo cual se tiene la información adecuada para el mejoramiento de la eficiencia de la instalación energética (Rashidi et al., 2014); (Pandey & Gogoi, 2013)

La importancia de la exergía para valorar el desperdicio de recursos exergéticos proviene, fundamentalmente, de los siguientes hechos (Bastidas, 2010)

- a) Toda la sociedad requiere de la realización de tareas mecánicas y termodinámicas para su sobrevivencia.
- b) Cumplir una tarea termodinámica implica la creación de exergía.
- c) La creación de exergía se realiza destruyendo la exergía existente en otras partes.

1.6.2 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Según (Peña et al., 2014), el ACV es una herramienta de decisión, capaz de aportar una evaluación tan exhaustiva como se prefiera, de un proceso que conlleva a la obtención de un determinado producto o servicio a través de sus flujos de materiales. Se realizan los balances de materiales y energía en cada etapa y se ubican los impactos más significativos.

El Análisis del Ciclo de Vida es, por tanto, un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de: extracción y procesado de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final (Ruiz, 2016). Para evaluar las cargas ambientales se realiza la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando.

Objetivos Globales

- Suministrar un cuadro lo más completo posible de las interrelaciones de los procesos, productos y actividades con el medio ambiente
- Identificar las mejoras ambientales
- Obtener información ambiental de calidad, que facilite el dialogo constructivo entre los diferentes sectores de la sociedad preocupados por los temas de calidad ambiental

La metodología considera una serie de fases de trabajo relacionadas entre si, que mantienen una secuencia más o menos definida, aunque en ocasiones es posible realizar un estudio no tan ambicioso obviando alguna fase. De acuerdo con la Norma ISO (14040, 2006), el ACV consta de cuatro fases: definición de los objetivos y el alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados (Ruiz, 2016).

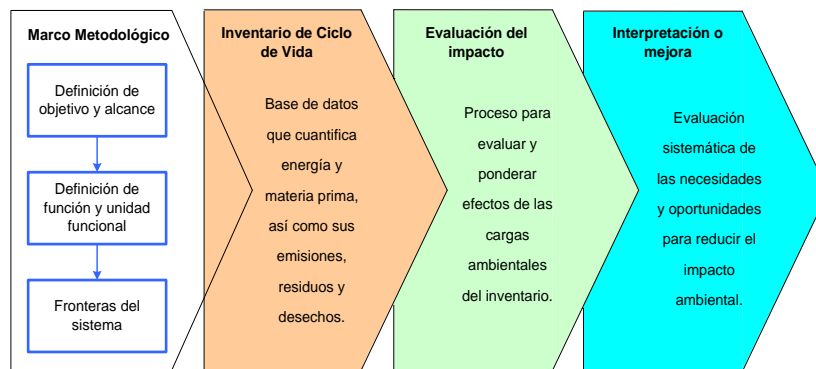


Figura No. 1 Metodología ACV

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. (Rodríguez, 2003).

Por tanto, el ACV es una herramienta analítica que apoya la toma de decisiones, sobre una base científica, cuantitativa y de enfoque sistémico (Tarapués, 2014).

1.6.2.1 Definición del Objetivo y Alcance del ACV

El objetivo y el alcance del estudio se define de acuerdo a los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida.

Según (Linares, 2017), los aspectos que deben tratarse y documentarse son: la aplicación previa de los productos/resultados, limitaciones, hipótesis e impacto, público, objetivo de los resultados/productos, alcance, unidad funcional, que proporciona una referencia de la asignación de entradas y salidas del proceso, límites y calidad de los datos

1.6.2.2 Análisis de inventario de ciclo de vida

En esta fase del ACV se recopilan datos correspondientes a las entradas y salidas para los procesos del sistema de producto, (14040, 2006),. Según (Ruiz, 2016), los datos deberán ser segados cuidadosamente para evitar errores que puedan falsear los resultados. Para el inventario se seleccionan datos genéricos de las etapas vitales, que posteriormente permitan evaluar los impactos o bien utilizar software ya instituidos.

Tal como lo afirma (HAUSCHILD & BARLAZ, 2011), realizar un inventario de ciclo de vida sin la ayuda de una herramienta se hace muy dispendioso, por ello se hace importante el uso de las bases de datos

1.6.2.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

Una vez completada la fase de inventario, se evalúan los impactos. En la práctica, ACV plantea impactos ambientales potenciales, por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de estos en cada subsistema. Existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV: Selección y categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, clasificación, caracterización y valoración, la asignación de los resultados del inventario a cada una de las categorías de impacto, el cálculo de los resultados de los indicadores de cada categoría (Peña et al., 2014)

En la EICV no deben faltar los siguientes aspectos (Tarapués, 2014)

- Selección y categorización de impactos, indicadores de categorías y modelos de caracterización.
- Asignación de resultados del Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (AICV).
- Cálculo de los resultados del indicador de categoría (caracterización)
- Análisis de los resultados del indicador de categorías y de la EICV (perfil de la EICV).
- Cuantificación del valor de los resultados del indicador de categoría con respecto a la información de referencia (normalización). Esto puede resultar en agrupación o ponderación.

Con modelos de caracterización se calculan los factores de caracterización de cada categoría de impacto, que se definen como la representación matemática del impacto de los flujos elementales hacia un indicador de categoría particular; la clasificación o asignación de los resultados del inventario es en la que las entradas y salidas del sistema son asignadas a diferentes categorías de impacto. Se les conceden las distintas categorías de acuerdo con su contribución potencial a ese impacto, los impactos son agregados en las categorías definidas y se convierten los resultados en unidades comunes que permitan su agregación (HAUSCHILD & BARLAZ, 2011).

Estos modelos de caracterización reflejan el mecanismo ambiental que describe la relación entre los resultados del inventario de ciclo de vida, los indicadores de las categorías de impactos (puntos intermedios), y en algunos casos los indicadores de daños (puntos finales), siendo así la base para un factor de caracterización hacia un indicador de categoría particular, por lo que a cada grupo de impactos definidos se le asigna un “factor de caracterización”, para obtener un único valor (Parra, 2014)

Como resultado, como se muestra en la figura No. 2, se obtienen categorías de impacto (CI) para diferentes enfoques (midpoint, endpoint) que representan los impactos ambientales a los que se les va asignar el resultado del AICV, (Parra, 2014)

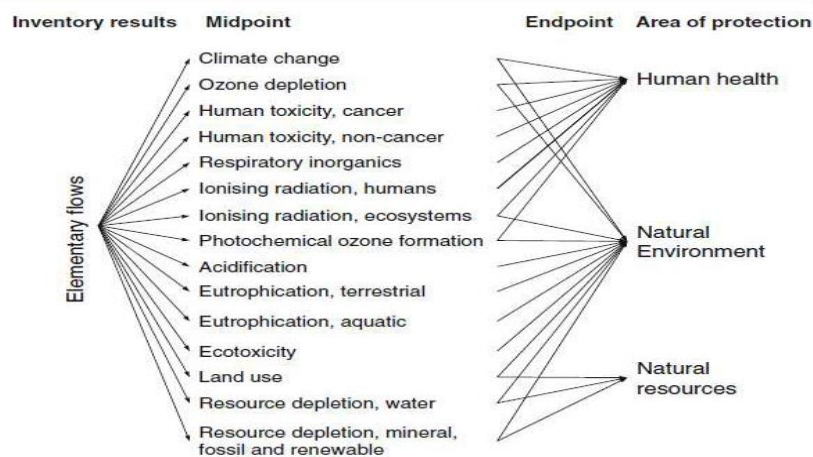


Figura No. 2 Categorías de Impacto para enfoques Midpoint, Endpoint.

1.6.2.4 Interpretación de los resultados.

En esta fase se deben proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y alcance definido, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones, es decir, debe contener los siguientes elementos (Parra, 2014)

- Identificación de los asuntos significativos basados en los resultados de las fases de AICV y la EICV de un ACV
- Una evaluación que considera las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

Se hace necesario, por el volumen de información que se procesa, seleccionar una herramienta informática para la aplicación de la metodología del análisis de

ciclo de vida para la cuantificación de los impactos ambientales generados por los flujos que intervienen en el sistema a evaluar.

1.6.2.5 Análisis de sensibilidad

Para comprobar la influencia de las suposiciones más importantes, sobre el proceso, se recomienda efectuar el análisis de sensibilidad durante y al final de ACV. En principio consiste en cambiar la suposición y recalcular el ACV ya que el resultado de ACV puede depender de alguna de las suposiciones hechas durante el estudio. Eso debe realizarse cuando las conclusiones del ACV sean estables.

Se deben evaluar desde el punto de vista económico las propuestas de mejoras que se hagan, e impliquen inversiones, como pueden ser cambios en la tecnología, sustitución de materias primas, etc.

Esto no es un análisis de incertidumbre completo, pero es útil en la comprensión de un sistema, ya que ayuda al analista a omitir parámetros de entrada que no tienen importancia en los resultados finales (Baker et al., 2009). Esto permite además determinar escenarios de disminución de cargas ambientales.

Capítulo 2. Materiales y Métodos

2.1 Aplicación de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a las alternativas de aprovechamiento energético en la UEB Los Españoles.

La evaluación del impacto ambiental de las alternativas de aprovechamiento energético en la unidad industrial Los Españoles se ha realizado según la metodología ACV, que se describe en la norma internacional ISO 14040:2006, reflejada en el capítulo anterior. De acuerdo con esta norma, se evaluaron esencialmente cuatro fases:

- Definición del objetivo y el alcance del estudio
- Análisis del inventario
- Evaluación del impacto ambiental
- Interpretación de resultados.

2.1.1 Definición del Objetivo

Como ya se ha expuesto, el objetivo del estudio es realizar una evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de las alternativas energéticas para el proceso de secado de arroz en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Los Españoles”, perteneciente a la Empresa Agroindustrial de Granos (EAIG) “Sur del Jíbaro”.

2.1.2 Definición del alcance y la frontera del estudio

El alcance del estudio está determinado por la unidad funcional que describe la función principal del sistema estudiado. En este caso se ha definido 331.44 toneladas de arroz húmedo, procesadas en un período 4 días. Este valor es tomado del procesamiento de un lote en tiempo real del proceso.

La frontera o límites del estudio definen las etapas y procesos que se incluyen dentro del ACV y cuáles no. En este caso se consideró el proceso de secado de arroz, con sus etapas de pesaje, recepción y limpieza y secado de arroz. Se incluye en los límites, el equipamiento que se propone utilizar en las alternativas para el secado que son el horno para la combustión de cascarilla y el motor a vapor para generar electricidad a partir de biogás.

2.1.2.1 Descripción del proceso de secado de arroz

Para comprender mejor el proceso de secado de arroz daremos a conocer las generalidades del mismo y su importancia.

El proceso de secado es de suma importancia pues elimina la posibilidad del crecimiento de hongos y beneficia el grano de arroz para la etapa de molinado. La tecnología de secado más difundida en Cuba es la Stein y es a su vez la que se utiliza en la UEB de secado Los Españoles, donde se realiza este estudio. Aquí encontramos tres unidades de secado, cada una posee un sistema de transportación que permite el flujo continuo del arroz en su interior. Además, tiene un sistema de limpieza que permite eliminar parte de las impurezas contenida en cada lote de secado mientras este se está procesando. Las torres de secado tienen acoplado un sistema de ventilación que garantiza la introducción y el contacto del aire de secado con los granos. Para el calentamiento del aire se cuenta con un sistema de combustión directa. Dicho sistema asegura la energía necesaria para la reducción gradual (alternado pases de secado con intervalos de reposo) de la humedad de los granos (Wasserman et al., 1965), (Wimberly, 1983).

Para realizar el secado del arroz en la UEB Los Españoles, se utilizan tres unidades de secado marca STEIN con una capacidad instalada, cada una de 115 Toneladas/Día. Cada una de ellas cuentan con un sistema de generación de vapor con quemador Hauch 783; Torre de secado; Equipos de limpieza (scalperator); Equipos de transportación (horizontales y verticales); Sección de almacenamiento (silos de hormigón) y Base de almacenamiento de silos metálicos.

Actualmente se utiliza solo combustible diésel y energía eléctrica para el secado del grano. Los estudios de validación de índices de consumo de la UEB Los Españoles, reportan datos de consumo 15,0 litros de diésel por toneladas de arroz seco y 22,0 kWh de energía eléctrica por cada tonelada de arroz seco procesados.

2.1.2.2 Diagrama de flujo del secadero Stein

El diagrama de flujo de operaciones de secado en la UEB Los Españoles, según la tecnología Stein, permitió definir las corrientes de entrada y salida al proceso, para las cuales se calcularon las variables desconocidas del proceso actual, así como de las alternativas energéticas evaluadas.

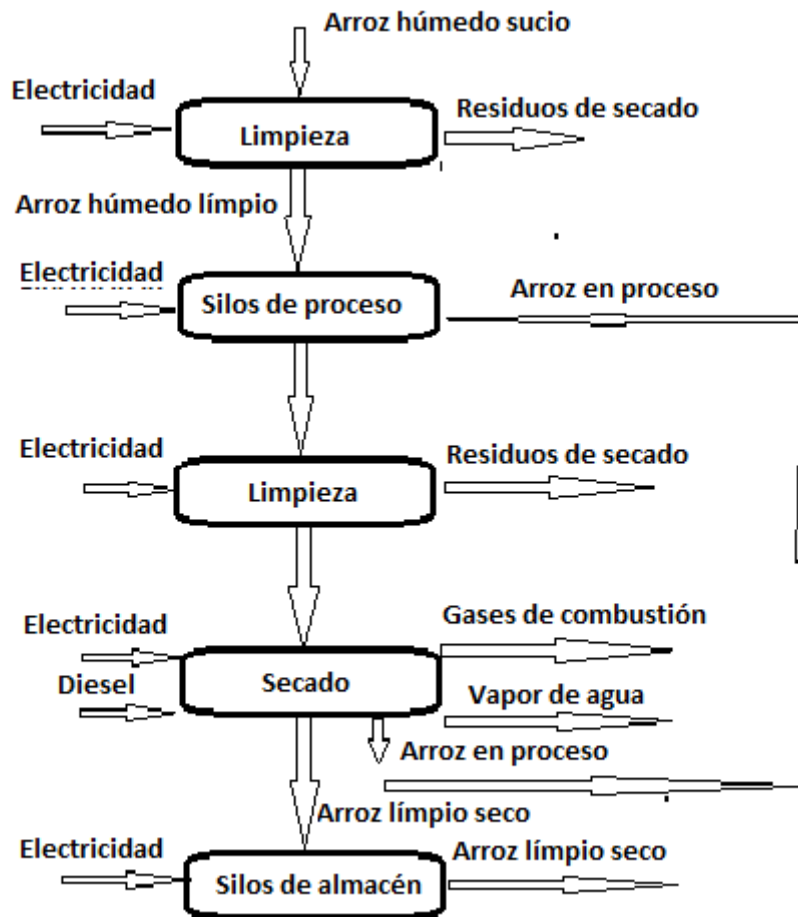


Figura No. 3 Diagrama de Flujo Proceso Secado de Arroz. Fuente: Elaboración Propia.

El proceso de secado inicia con la recepción y pesaje del arroz húmedo, procedente de las áreas cosechadas, donde recibe su primer control de impurezas y humedad, y una operación de limpieza. Los valores de impureza deben estar en el rango de 12 a 17 % en peso del arroz de entrada y debe llegar hasta un rango de 8 a 10 %, según la norma NP 1623-12:86, del Ministerios de la Industria Alimentaria.

Los residuos de secado abarcan valores de hasta un 5 % en peso del arroz húmedo de entrada, también dependen de la variedad de arroz que se procesa y del rendimiento del proceso en cuestión.

Aunque el proceso general es continuo, en cada torre de secado se trabaja de forma discontinua o por pases de secado hasta lograr la humedad e impurezas establecidas en las normas de la tecnología. Como resultado se obtiene un arroz cáscara seco con una humedad que oscila entre los 11 a 13 %, listo para

almacenar en reposo y luego pasar a la obtención del arroz consumo en las unidades de molinado.

2.1.3 Elaboración del inventario de ciclo de vida para cada alternativa

El inventario de análisis de ciclo de vida se llevó a cabo mediante balances de materia y energía, teniendo en cuenta la unidad funcional del estudio (331.44 toneladas).

Para realizar el inventario se detallaron todos los insumos ambientales (materiales y energía) y las salidas (aire agua, residuos, gases de emisión) reportados en los límites del sistema y expresados en base a la unidad funcional.

Se utilizaron los datos técnicos de la campaña arrocerá 2019 de la UEB Los Españoles. Se trabajó con índices de consumo históricos de la EAIG Sur del Jíbaro y la unidad en cuestión. Se consultaron además los datos de los modelos establecidos por el departamento de calidad de la EAIG Sur del Jíbaro, donde se compendian los resultados de pesaje de cada lote, así como los parámetros de humedad e impureza y los cálculos establecidos en el procedimiento para arroz seco.

Se realizaron balances de masa y energía para calcular flujos y corrientes desconocidas del proceso y se utilizaron los principios de la estequiometría para los cálculos de propiedades en gases.

Estos cálculos se realizaron para cada etapa o pase de secado de arroz. Los lotes analizados que abarcaron la capacidad de la torre de proceso, recibieron cuatro pases de secado de arroz. Se realizó un seguimiento a la operación hasta la descarga final de los lotes con una duración de tres días, calculando para cada pase los flujos y parámetros establecidos en el balance.

2.1.3.1 Principales limitaciones y supuestos

- ✓ Los lotes de secado trabajan en igualdad de condiciones
- ✓ Se asume que se procesan tres lotes por día
- ✓ Según los datos de la entidad se asume como densidad para el combustible diesel 0.841 kg/litros.
- ✓ El factor de conversión para el diesel ($C_{12}H_{26}$) se considera el establecido por el grupo agrícola (GAG): 1 188.78
- ✓ Asumir para el biogás a producir el 4% de pérdidas

- ✓ Se descarta el residuo de secado al ser el mismo para cada alternativa a analizar.

Una vez calculados los parámetros del inventario (flujos de entrada y salida), para las condiciones del proceso actual (Alternativa A-1), se procedió a elaborar el inventario para las cuatro alternativas restantes propuestas a evaluar con ACV, para satisfacer los requerimientos energéticos del proceso de secado.

El inventario que se confeccionado para cada alternativa constituye la base de datos a procesar con el software Open LCA, que permitió evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida de las mismas en el secado de arroz. Para una mejor comprensión de los resultados, se elaboraron gráficos, reflejando el comportamiento del impacto de las alternativas propuestas sobre las categorías de impacto valoradas en cada enfoque (midpoint, endpoint)

2.1.3.2 Alternativas a valorar a través del ACV, para el proceso de secado de arroz

Alternativa A1: Se evalúa el proceso de secado de arroz actual con los índices de consumo actuales, ya descritos anteriormente, que constituye el caso base que sirve de referencia para comparar las diferentes alternativas propuestas.

Alternativa A2: En este caso se considera el secado de arroz con el uso de biogás generado a partir de excretas porcinas que se obtienen de las instalaciones de cría de cerdos de la propia unidad. Este biogás se utilizará para suministrar parte de la energía requerida en el proceso, específicamente para un pase de secado según el resultado del balance de energía en cada etapa de secado.

Alternativa A3: Se utilizará el biogás generado por una planta de Archea, con posibilidades de ser importada por la empresa, con un volumen de producción que cubrirá todo el proceso de secado, según se reflejan en los datos técnicos de la planta. En esta planta se utilizan residuos porcinos en codigestión con residuos de secado, disponibles en la unidad.

Alternativa A4: Se valora la utilización de cascarilla como combustible en el proceso de secado de arroz, sustituyendo el 100 % del combustible diésel, transportando este residuo desde unidades cercanas donde se existen molinos a una distancia promedio de 18 Km. Esta transportación se efectúa en el viaje de retorno de los equipos especializados de transporte de arroz seco hacia los

mencionados molinos. La necesidad de cascarilla para esta alternativa se calculó con ayuda del balance de masa y energía para este escenario.

Alternativa A5: Se evalúa la utilización de cascarilla en el secado de arroz, combinada con el uso del biogás de Archea para producir electricidad, necesaria para el proceso y aportando a la red eléctrica nacional. Esta permitió valorar el uso de tecnología de avanzada, respecto a la actual, al considerar el uso de la planta de Archea.

El inventario por alternativa permitió obtener los datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los aspectos ambientales adversos que se evaluarán en la próxima etapa.

2.1.4 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.

Se utilizó el software libre OpenLCA versión 1.10 (Base de Datos ecoinvent 3.6) y aplicando la metodología ReCiPe. Esta última se integra por la actualización de las metodologías Eco-indicator99 y CML 2002, que se utilizan también para realizar la EIA. ReCiPe combina de forma consistente los enfoques de punto medio y punto final (endpoint y midpoint) (Goedkopp et al., 2008). En midpoint se analizaron 18 categorías de impacto que a su vez se convierten y agregan hasta quedar reducidas a tres categorías de impacto a nivel endpoint que representan daños a: Salud humana, Calidad del ecosistema y recursos naturales, dando la posibilidad de seleccionar diferentes perspectivas: individualista, igualitaria o jerárquica (Gambara & Villanueva, 2012). En este caso se usa una perspectiva jerárquica. Al considerar los efectos intermedios (midpoint), las categorías de impacto permiten obtener una información más detallada respecto a de qué manera y en qué punto se afecta el medio ambiente. Este enfoque permitió además evaluar las contribuciones de los flujos de proceso a los impactos ambientales de las alternativas y de estas últimas, sobre las distintas categorías de impacto que se evaluaron. Se utilizaron ambos enfoques (punto medio y punto final), para evaluar la existencia o no de coincidencias en cuanto a la definición de la alternativa más beneficiosa.

2.1.5 Interpretación de los resultados.

Una vez realizada la EICV, los datos obtenidos a través del software Open LCA, permitieron obtener valores y graficar el efecto de las alternativas propuestas, sobre las Categorías de Impacto (CI) definidas para cada enfoque considerado

(midpoint o endpoint). Se realizó además un análisis de sensibilidad para la variable de mayor incertidumbre, en la alternativa ganadora.

2.1.5.1 Enfoque Punto Medio (Midpoint)

Este enfoque permitió determinar para cada alternativa, las CI más perjudicadas según la de referencia (análisis por caracterización), así como la alternativa más beneficiosa que permitirá reducir el impacto ambiental del proceso de secado.

Una vez determinada la alternativa más beneficiosa, se realizó para ella un análisis por normalización, que permite cuantificar a través de puntos, la medida en que afecta esta alternativa a las 18 CI contenidas en el enfoque midpoint, determinando cuales CI resultan perjudicadas y cuales beneficiadas, así como los valores de estos impactos.

La evaluación permitió determinar también cuál es el flujo de mayor contribución a los impactos.

Los análisis por caracterización y normalización posibilitaron, además, comparar entre sí las CI.

2.1.5.2 Enfoque Punto final (Endpoint)

Con el enfoque endpoint, se determinó entonces el efecto de cada alternativa sobre las categorías de impacto, en este caso: salud humana, ecosistemas y recursos fósiles, así como el impacto total, obteniendo puntuaciones para cada CI de este enfoque. De esta forma se determina la alternativa de menor impacto perjudicial al medio.

2.1.5.3 Análisis de sensibilidad.

Para realizar el análisis de sensibilidad se seleccionó la alternativa más beneficiosa según el resultado obtenido con el enfoque midpoint y perfil de normalización. Se realizaron suposiciones en una variable, la de mayor incertidumbre para el proceso. El principio consiste en recalcular el inventario para cada suposición propuesta en esta alternativa, de forma tal que se observe el efecto en las CI más impactadas según resultados del análisis., ya que el resultado puede depender de las suposiciones (Contreras et al., 2007). Para el cálculo se deben variar parámetros de entrada y determinar la sensibilidad de las salidas.

Capítulo 3. Resultados del ACV para las alternativas propuestas

El software utilizado permitió procesar los datos de los inventarios realizados para cada alternativa de secado de arroz propuesta, así como confeccionar gráficos para una mejor interpretación de los resultados. El seguimiento a la metodología para ACV, se muestra en los epígrafes que desarrollamos a continuación.

3.1 Definición de los límites del sistema.

Se muestra en la Figura No. 3 los flujos de entrada y salida del sistema evaluado con ACV, así como los límites del estudio para las 331.44 toneladas de unidad funcional. Se incluyó en los límites o fronteras, las etapas de secado, así como el equipamiento requerido en las alternativas propuestas (Motor a vapor para el biodigestor Archea y horno para la quema de cascarilla).

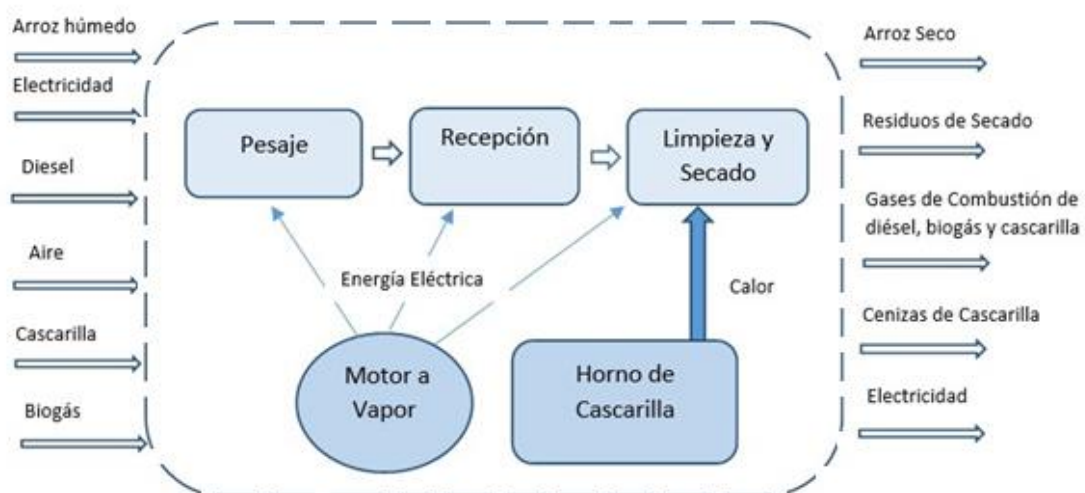


Figura No. 3 Límites del ACV

3.2 Inventario calculado para cada alternativa

Los balances de masa y energía aportaron los datos de los flujos de entrada y salida para cada alternativa propuesta, tomando como unidad funcional 331.44 toneladas de arroz húmedo de entrada al proceso. Los resultados del inventario por alternativas, se muestran en el Anexo No. 2

3.3 Resultados del ACV

3.3.1 Enfoque "midpoint"

En este enfoque se evaluó el impacto de las alternativas propuestas sobre 18 CI, ofreciendo una información más detallada sobre el efecto de los escenarios propuestos y mejor comprensión para la toma de decisiones sobre la alternativa a ejecutar y las acciones para mitigar los efectos medioambientales. Los resultados de los análisis por Caracterización (comparación de efectos sobre CI respecto a la alternativa más perjudicial), y Normalización, (cuantificación de los impactos a través de puntos, dentro de la alternativa más beneficiosa), se representaron a través de gráficos, así como la contribución de los flujos del inventario en cada alternativa, y de estas últimas sobre las CI más afectadas.

3.3.1.2 Caracterización.

Por categorías de impacto (CI): Se obtienen impactos beneficiosos en la CI toxicidad humana no-carcinogénica (valores negativos en el gráfico), determinado por el flujo Market for rice, que arroja valores elevados modularmente, respecto al resto de los flujos que inciden sobre esta categoría de impacto, que infiere la utilización de una variedad de arroz menos intensiva en cuanto al consumo de recursos y generación de emisiones, donde específicamente la disminución de las emisiones de zinc al suelo, provocan mayores beneficios. Las restantes 17 CI presentan impactos perjudiciales sobre el proceso.

En todas las CI la alternativa de menor impacto perjudicial es A-5, que propone la utilización de la cascarilla como combustible para el secado y el uso de biogás de la planta Archea para generar electricidad, sustituyendo combustible fósil, evitando la quema de este recurso, cuyo flujo refleja una alta contribución al medio ambiente. El hecho de generar electricidad con biogás y no usar la que suministra la red nacional, también hace de esta alternativa (A-5), la de mejor impacto al perfil ambiental, dejando de consumir combustible fósil por concepto de generación eléctrica. La tendencia en todas las CI es que el segundo mejor comportamiento es la alternativa A-3 que propone utilización del biogás para la combustión y generación de calor necesario para el proceso industrial, que sustituye consumo de diésel directo para el secado, pero continúa usando electricidad de la red nacional. El flujo que más aporta beneficios es Market for diésel, al usar energía renovable en sustitución de combustible fósil.

La alternativa más perjudicial es la A-1, que corresponde al proceso de secado actual, donde los flujos que más afectan son Market for diesel y electricity production, oil.

En todas las categorías de impacto, el flujo de mayor contribución es el cultivo del arroz, que ya tiene en sí una carga ambiental significativa desde su fase agrícola, como lo muestran sus valores modulares, debido a los altos consumos de fertilizantes, plaguicidas, fungicidas y agua que conlleva su siembra y atenciones fitosanitarias, además del combustible fósil que se emplea en las labores agrícolas que requiere.

A continuación, se muestra el gráfico que refleja el comportamiento de las 18 CI para cada alternativa, en un análisis de caracterización, reflejado en porcentaje (%), pues compara para cada CI, el comportamiento de las alternativas respecto a la de mayor impacto, mostrando que A-5 es la más beneficiosa.

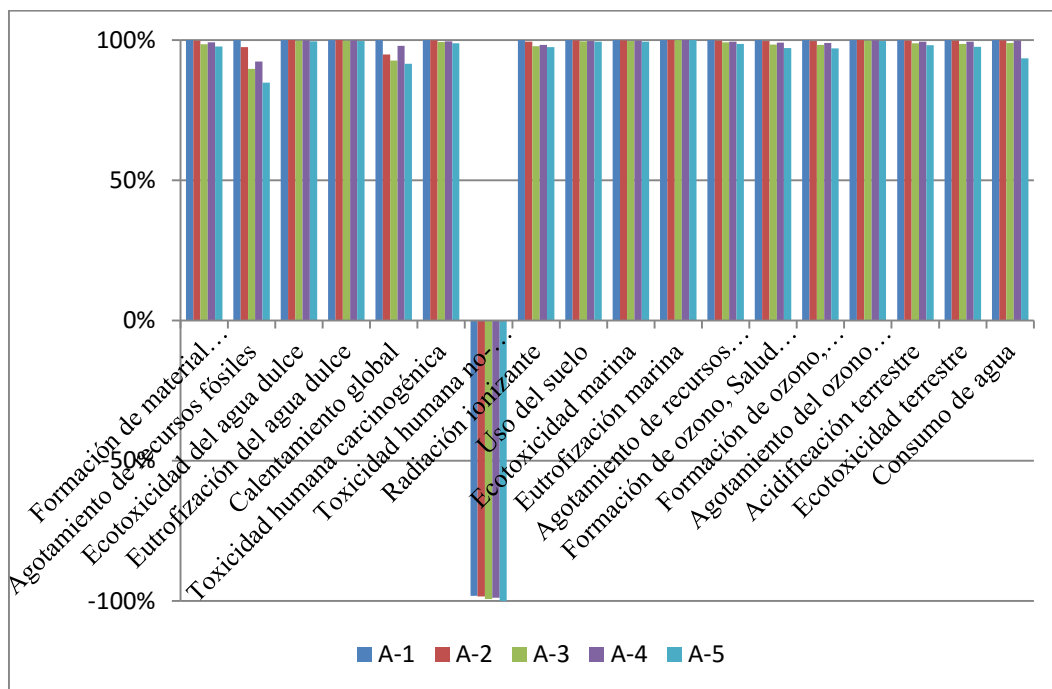


Figura No. 4 Comportamiento de las CI para cada alternativa evaluada. (Caracterización)

3.3.1.3 Normalización

A partir del análisis normalizado de las categorías de impacto de la alternativa más beneficiosa (A-5), se determina que la CI de mayor influencia perjudicial es la ecotoxicidad marítima, como reflejan los valores de flujo graficados, debido a la influencia de las emisiones a los cuerpos acuáticos, de metales como cobre, zinc, níquel y vanadio procedentes del cultivo del arroz. Otra CI que afecta en forma

perjudicial es la ecotoxicidad del agua dulce, también asociada a las emisiones del cultivo del arroz. Le siguen las CI consumo de agua y toxicidad humana carcinogénica con similar comportamiento, debido al consumo de agua en las labores agrícolas del cultivo de arroz y a las emisiones de metales pesados. Las demás CI presentan un comportamiento similar. La CI de impactos beneficiosos como ya se explicó anteriormente, es toxicidad humana no-carcinogénica, como muestra a continuación la Figura No. 5.

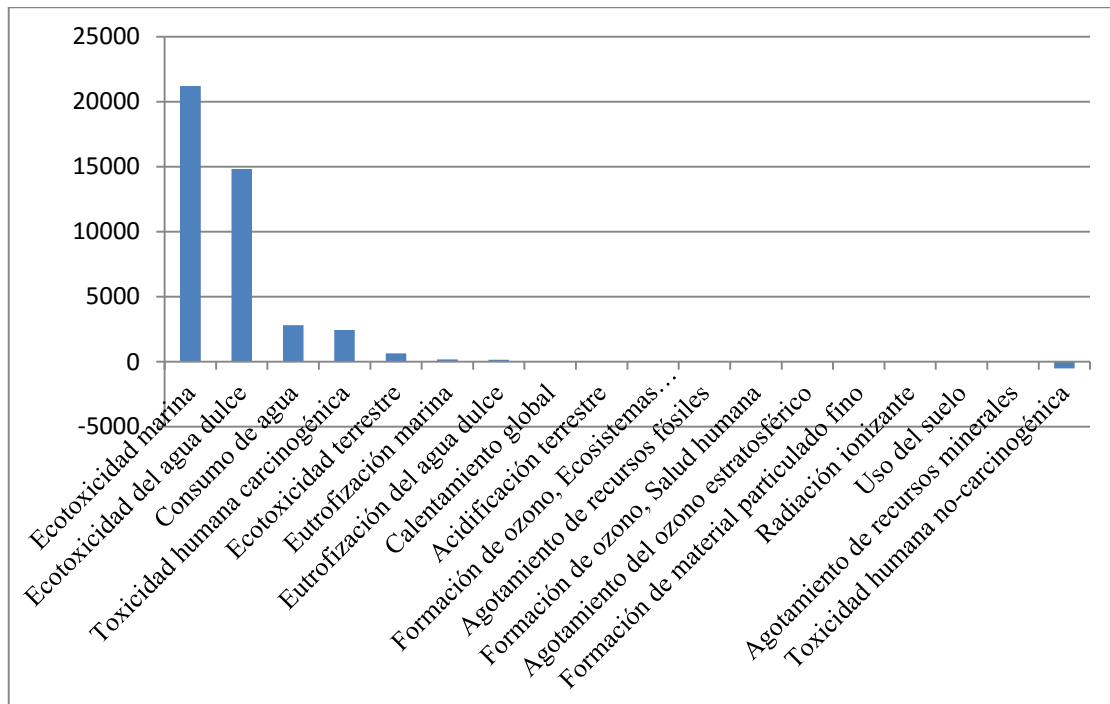


Figura No. 5. Análisis normalizado de las CI para A-5. (Normalización)

Consideramos evaluar, además, como impactan a las alternativas, los flujos de mayor contribución en el balance, independientemente del arroz, que ya lleva una carga ambiental desde su etapa agrícola. En este caso evaluamos la electricidad, representada en el software utilizado (Open LCA), como electricity production y el flujo de diésel, representado como market for diesel, teniendo en cuenta que ya se ha evidenciado en estudios realizados que los consumos de los mismos tienen efectos sobre el medio ambiente, y en el caso del proceso de secado de arroz, el balance demuestra que se utilizan en volúmenes significativos, según la unidad funcional establecida en el ACV. Para una mejor comprensión del efecto, se seleccionaron las CI a las que el análisis con Open LCA, le asignó mayor puntuación, por lo que son las más impactadas, según el enfoque midpoint, y a

las cuales contribuyen de forma importante los flujos antes mencionados. El resultado es el que se muestra a continuación:

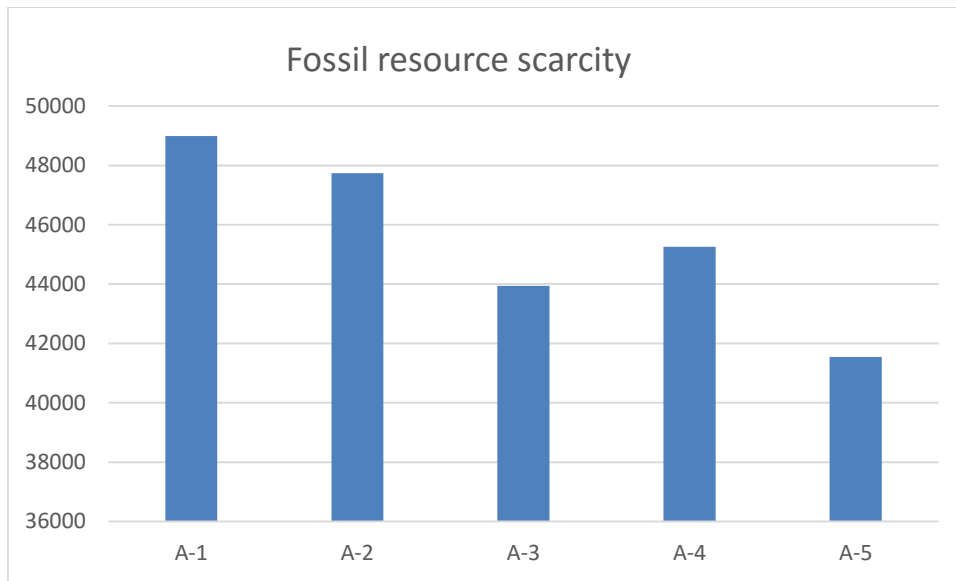


Figura No. 6 Impacto de las alternativas sobre la escasez de recursos fósiles.

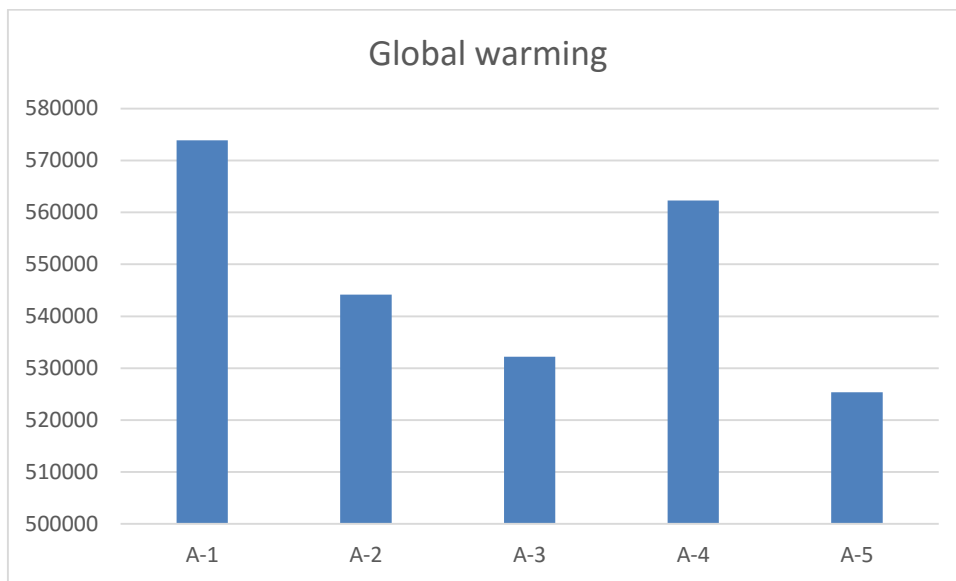


Figura No. 7 Impacto de las alternativas sobre el calentamiento global

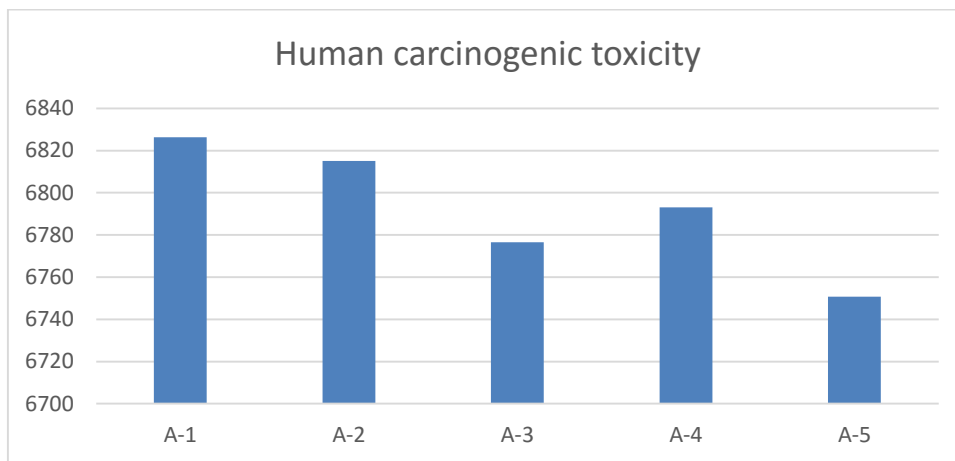


Figura No. 8 Impacto de las alternativas sobre la toxicidad humana carcinogénica.

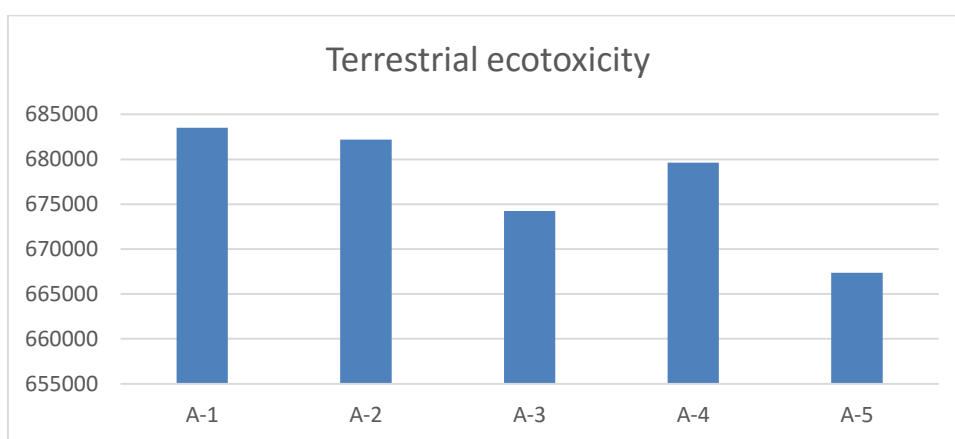


Figura No.9 Impacto de las alternativas sobre la ecotoxicidad terrestre.

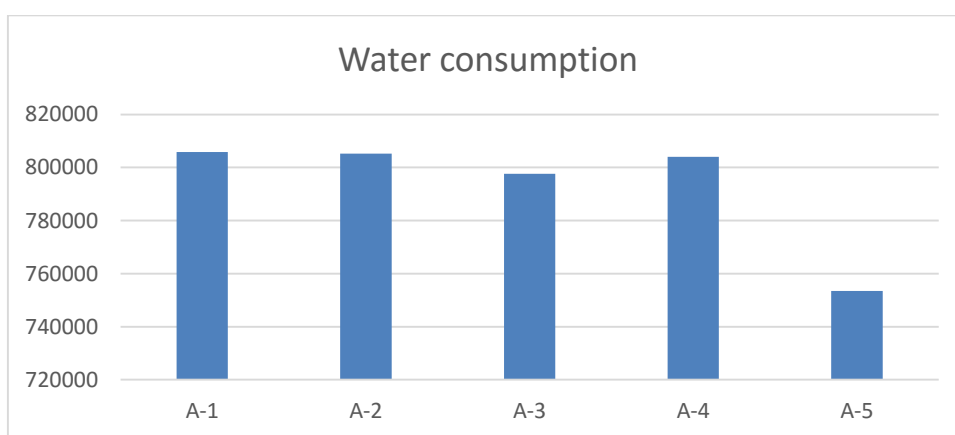


Figura No. 10 Impacto de las alternativas sobre el consumo de agua.

En los gráficos se observa que, en todos los casos, la alternativa A-5, que propone el uso de biogás de Archea, combinado con el uso de cascarilla para el secado de arroz, ofrece los menores impactos sobre las CI evaluadas y por tanto mejores opciones para el proceso actual, que el caso base (A-1). Esto ayuda al proceso de toma de decisiones para los directivos de la entidad en cuestión.

3.3.2 Enfoque Endpoint

En este caso se evaluó el impacto de las diferentes alternativas sobre las categorías de daños “Calidad del Ecosistema”, “Salud Humana” y “Recursos Fósiles”, así como el “Impacto Total” sobre el medio de cada alternativa.

Se observa en la Figura No. 6, que la alternativa A-5, es la más beneficiosa en cada caso, al reflejar la menor puntuación relacionada a los efectos sobre las tres CI que se evalúan en este enfoque en cuestión, y también en los impactos totales. Esta alternativa propone la utilización de la cascarilla como combustible para el secado y el uso de biogás de la planta Archea para generar electricidad, sin consumir combustible fósil, que es a su vez el recurso más impactado, esto reafirma los resultados del enfoque “midpoint” y la efectividad del uso de fuentes renovables de energía (biomasa y biogás) en el proceso de secado de arroz. La alternativa (A-3) es la segunda que menor efecto perjudicial tiene sobre el medio, y coincide este análisis con realizado con el enfoque midpoint,

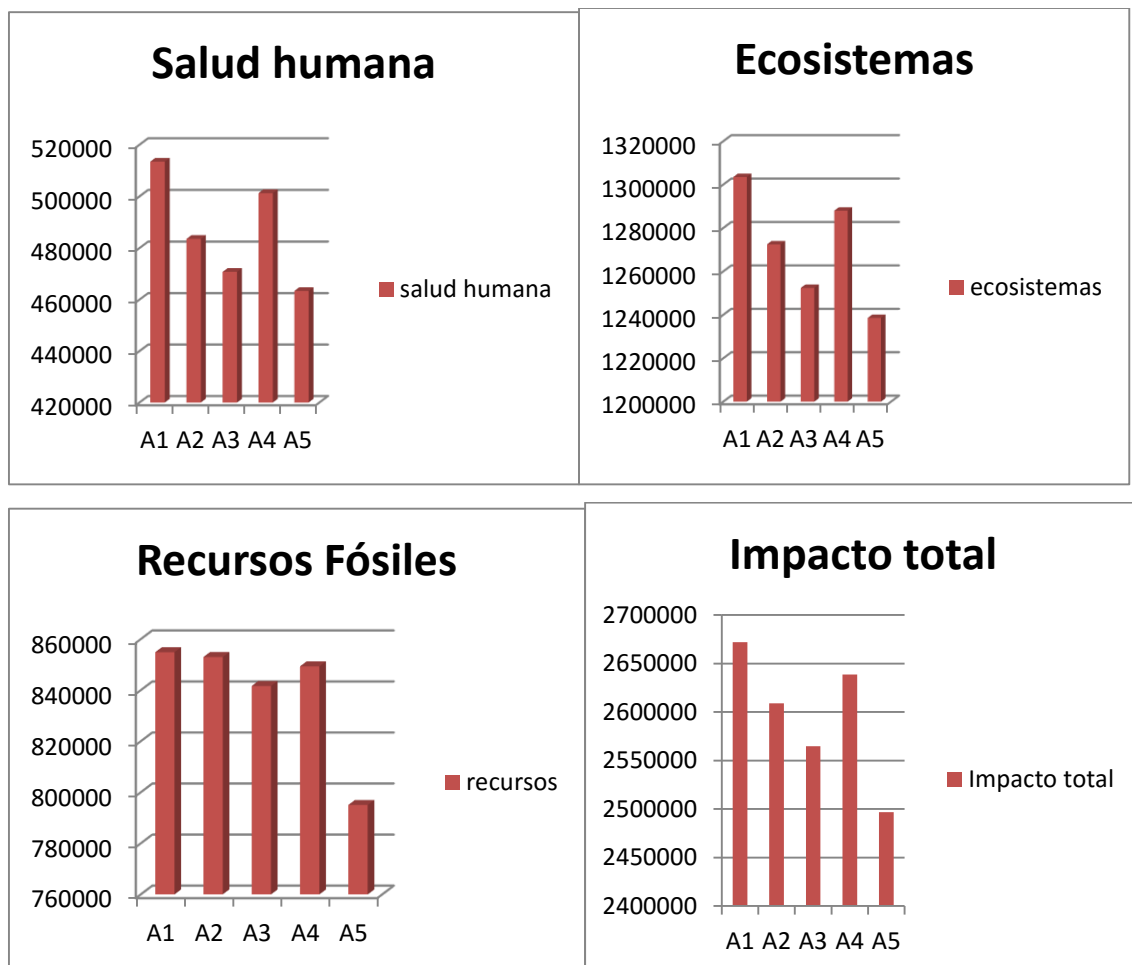


Figura No. 6. Comportamiento de CI para las distintas alternativas, según el enfoque “endpoint”.

Una versión más explícita del resultado del impacto total por alternativas, se muestra en los gráficos siguientes, donde se reafirma que la alternativa A-5 es la más beneficiosa y que la salud humana es la categoría menos impactada, así como que los recursos fósiles son los más impactados.

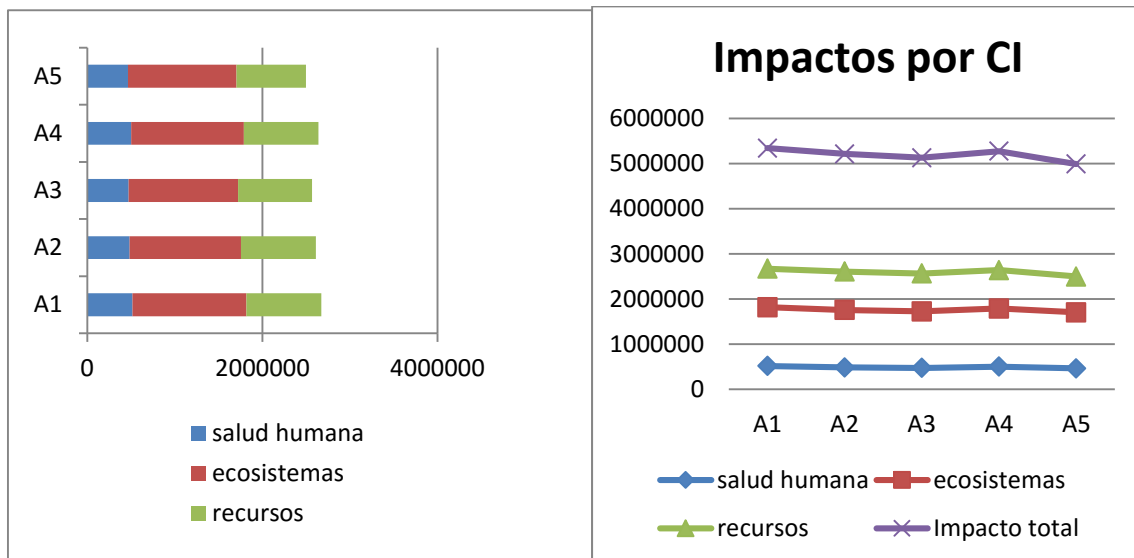


Figura No. 7 Impactos Totales (Endpoint)

3.3.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad para la variante más beneficiosa (A-5), se realizó teniendo en cuenta los resultados del enfoque de punto medio (midpoint). Se consideraron las siguientes variaciones (Sens), en el suministro de cascarilla, que resulta ser la variable de mayor incertidumbre en este caso, pues no está disponible regularmente en el secadero y es necesario trasladarla de los molinos arroceros o zonas de depósito.

- Sens1: Datos de la Alternativa A-5 donde se usan los carros de 20 m³ especializados para tiro de arroz con el aprovechamiento del retorno para transportar cascarilla en la zona aledaña al secadero (18 km).
- Sens2: La transportación de cascarilla no se realiza aprovechando el retorno del viaje de arroz para molinar por lo que el gasto de combustible es el doble de la anterior alternativa (A5*2).
- Sens3: No existe cascarilla en el molino al no existir plan de molinería por lo que el viaje es a las áreas de depósito exteriores (aumenta 6 km la transportación y se utiliza un cargador que aumenta en 10 litros el consumo de diésel).

- Sens4: La carga de la cascarilla se realiza en los molinos de la capital provincial por lo que aumenta la distancia de transportación del viaje (40 km).
- Sens5: La transportación de cascarilla se realiza con carros de menor capacidad de carga que los especializados (16 m³).

Los datos del inventario recalculado para las nuevas variaciones o supuestos, se muestran en el Anexo 3.

En este caso se tomaron, del análisis con enfoque midpoint, las cuatro CI con mayores impactos perjudiciales al perfil ambiental (normalización), de la alternativa más beneficiosa (A-5). Estas son: ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, consumo de agua y toxicidad humana carcinogénica, Figura 8. Se observa que:

- Todas las CI presentan impactos perjudiciales.
- En todas las CI estudiadas, el escenario que corresponde a un aumento en 6 km de la transportación, y por tanto aumenta en 10 litros el consumo de diésel (Sens-3), presenta los mayores impactos perjudiciales debido al incremento del consumo de recursos (combustible fósil).
- El presente resultado infiere que al incrementar el traslado de cascarilla sin aprovechar la capacidad de carga de los vehículos especializados que la transportan se impacta de forma importante sobre el perfil ambiental.

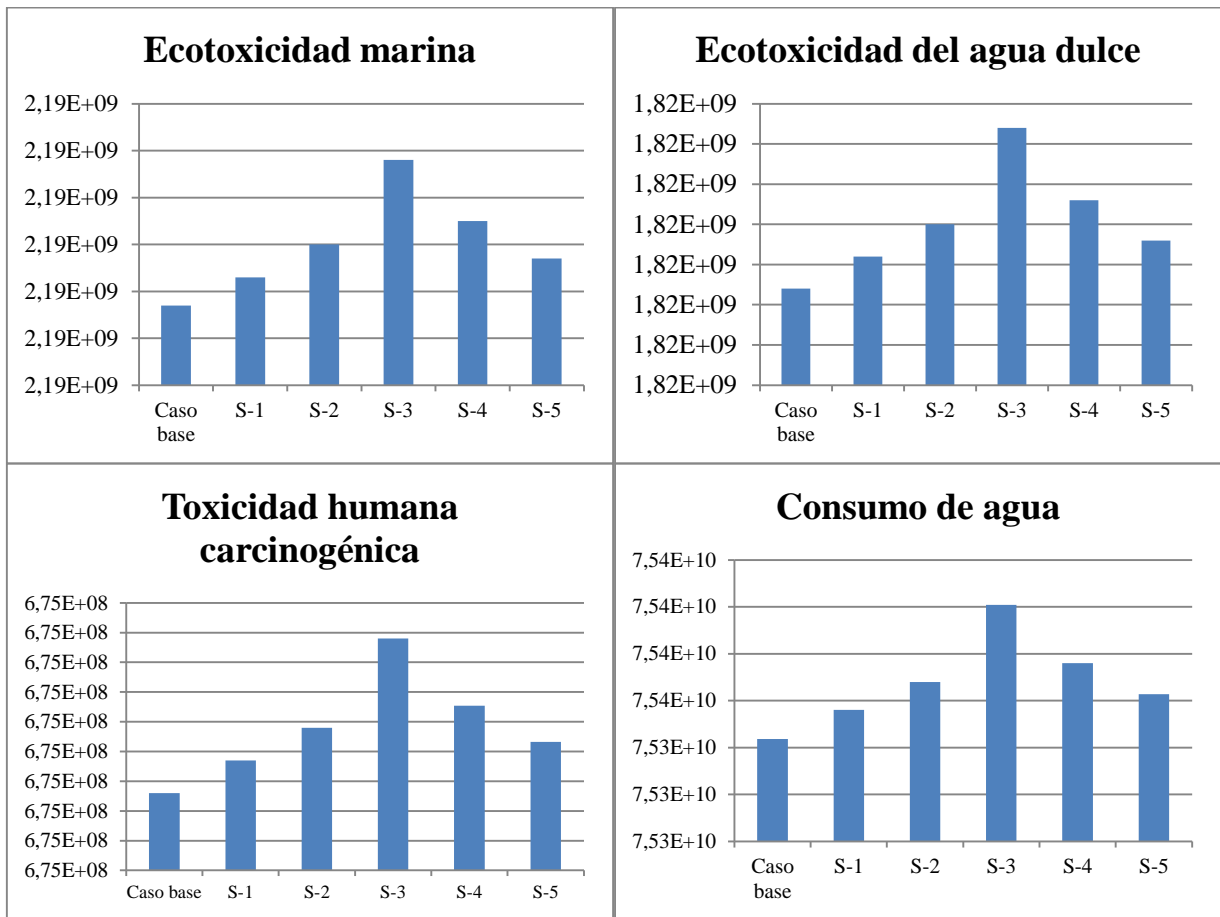


Figura 8. Comportamiento de las CI más perjudiciales al perfil ambiental

Conclusiones:

1. El inventario del ciclo de vida permitió determinar las corrientes de entrada y salida de las alternativas energéticas evaluadas para el secado de arroz en la UEB “Los Españoles”.
2. La alternativa A-5 presenta los menores daños ambientales, reflejados en los resultados obtenidos con los enfoques “endpoint” y “midpoint”, evidenciando la factibilidad ambiental de la combinación de secado de arroz con cascarilla y el uso de biogás para generar electricidad.
3. En todas las CI, el flujo del inventario de ciclo de vida (ICV) de mayor impacto es el cultivo de arroz.
4. Las CI, según el enfoque “midpoint”, con mayores impactos perjudiciales son ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, toxicidad humana carcinogénica y consumo de agua, dadas por los consumos y emisiones del cultivo del arroz a través de su ciclo de vida.
5. La CI con impactos beneficiosos, según “midpoint” es toxicidad humana no-carcinogénica, asociado a la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables, en este caso biogás.
6. Según la metodología “endpoint”, el mayor impacto se observa sobre los recursos fósiles y el menor sobre los ecosistemas.
7. A través del análisis de sensibilidad se obtuvo que, al considerar la no existencia de cascarilla en el molino y tener que adquirirla a una distancia mayor con el consecuente aumento en el consumo de diésel, correspondiente a la alternativa Sens3, esta impacta de forma directa en el perfil ambiental de las CI con mayores perjuicios desde el punto de vista del análisis por normalización (ecotoxicidad marina, ecotoxicidad del agua dulce, consumo de agua y toxicidad humana carcinogénica).

Recomendaciones:

1. Realizar el ACV, sin considerar el flujo de arroz, para llegar a resultados más visibles.
2. Evaluar como alternativa el uso de la gasificación de la cascarilla para el secado de arroz.
3. Evaluar la factibilidad económica de la alternativa de menor impacto sobre el medio ambiente (A-5), según la metodología aplicada.

Referencias Bibliográficas

- 14040, I. (2006). ISO 14040. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de Referencia. AEN/CTN 150 Gestión Medioambiental.
- Ahring, B. (1992). Tratamiento anaeróbico de estiércol junto con residuos industriales. *Ciencia y Tecnología del Agua*.
- Aljundi, I. H. (2009). "Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan". *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, n° 2-3, pp. 324-328, February 2009. .
- Alonso, G., & Clark, I. (2015). Cuba enfrenta el cambio climático. *MEDICC Review, selcciones 2015*.
- Andino, A. A. d. I. R., González, L. Z., & López, B. S. (2007). Quemador Doble Turbulizador Estático (QDTE) una tecnología para la combustión de biomasa en el proceso de secado agroindustrial. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias (16)*.
- Antonio, G. (1996). Fundamentos básicos para el Diseño de biodigestores Anaeróbicos Rurales. Lima: Centro Panamericano de Ing. Sanitaria.
- Apes. (2010). Simposio Peruano de Energía Solar y Medio Ambiente. Perú.
- Baker, J. W., Lepech, M. D., & Cornell. (2009). Treatment of uncertainties in life cycle assessment. Stanford University, Stanford, USA.
- Bastidas, E. L. (2010). Análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas de generación de energía.
- Bejan, A. (1988). *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: John Wiley and Son, 1988. 485 p. ISBN 10-0471148806.
- Bishir, U., & Ekewenchi, M. (2012). Kinetics studies of fungal biogas production from certain agricultural waste. *Bajopas*: 79-83, <http://www.ajol.info/index.php/bajopas/article/view/85953>.
- Callaghan, F. J., Wase, D. A., & Thayanithy, K. (1999). Codigestión de residuos sólidos orgánicos: estudios por lotes
- Camargo, V. P. d. (2013). *Propuesta de Metodología para la evaluación integral de proyectos en el sector energético*. Valencia.
- Carbonell, C. (2017). Estudio Estándares de sustentabilidad para el sector arrocero. Fundación Chile. http://www.revistafuturos.info/raw_text/raw_futuro16/produccion_biogas.pdf
- Carrillo, L. (2003). Capítulo 5: Rumen y biogás. In: *Microbiología Agrícola*.
- Cendales, E. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Colombia Bogotá.
- 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.
- Conesa, V., & Fernandez, V. (2002). Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental.

- Contreras, L. M. (2013). *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arroceras cubana para la producción de biogás* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas].
- Contreras, L. M., López, L., & Romero, O. (2007). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. *Revista Futuros* No. 16, 2006 Vol. IV. ISSN: 1913-6196.
- Contreras, L. M., & Pereda, I. (2012). Aprovechamiento energético de residuos arroceros por Bio-conversión.
- Dar, G., & Tandom, S. (1992). Biogas production from pretreated wheat straw, lantan residue, apple and peach leaf litter with cattle dung. *Biological wastes*.
- Díaz, C. A. H. (2019). Modelo de RBF para estimar la producción de biogás. *Journal of Geophis*.
- Díaz, M. (2011). Conferencia. 5to Encuentro Internacional de Arroz. [Conferencia].
- Edwards, C. G. (2010). Relatorio de Impacto Ambiental. Proyecto Cultivo de Arroz-Construcción de Reservorio de agua para uso agrícola. .
- Elsafi, A. M. (2015). "Exergy and exergoeconomic analysis of sustainable direct steam generation solar power plants," *Energy Conversion and Management*, vol.103, pp. 338-347, October, 2015
- Ezekoye, V., Onah, D., Offor, P., & Ezekoye, B. (2014). Characterization of Biogas Produced from Rice Husks and Algae using a Metal Fixed-Dome Biodigester. *Global Journals Inc: 2-5*, <https://globaljournals.org/>.
- FAO; INTA, O. d. I. N. U. p. I. A. y. I. A. F.-I. N. d. T. A. I. (2012). "Manual de Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar. .".
- Fernández, J., & Saavedra, C. (2007). Obtención de Biogás a Partir del Bagazo de Caña y Estiércol. Mérida, Venezuela. *Revista Científica Juvenil* 7.
- 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*, 33(11), 1532-1546.
- Gambara, L., & Villanueva, L. (2012). "Arundo donax L , como gramínea perenne para la producción de biomasa en ambiente Mediterráneo.
- García, J. U., García, A. L., Vanderlinden, E., Contreras, J. R., & Navarrete, R. (2012). Air Quality Monitoring Network Design to Control Nitrogen Dioxide and Ozone Applied in Granada, Spain. *Ozone: Science and Engineering. Num 33*.
- 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.
- Gutiérrez, E. O. P. (2016). Impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba.
- Gutiérrez, G., Moncada, M., Meza, A., Félix, J., Balderas, J., & Gortáres, P. (2012). Biogás,: Una alternativa ecológica para la producción de energía.
- HAUSCHILD, M., & BARLAZ, M. A. (2011). LCA in Waste Management: Introduction to Principle and Method. En: *Solid Waste Techonology & Management*. .

- Hernández, A. L. R. (2012). Propuesta para el mejoramiento de la Implementación de la Metodología de Evaluación de Impacto Ambiental en la República de Cuba.
- Hernández, J. (2014). Diseño de un sistema para el aprovechamiento energético de biogás a partir de los residuos generados por el ganado vacuno en la Vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria "Camilo Cienfuegos" (Pinar del Río, Cuba). Tesis Pre-Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Pamplona.
- Kalra, M., & Panwar, J. (1986). Anaerobic digestion of Rice Crop Residues. *Agricultural Wastes* 17, (1986). 263-269.
- KOTAS, T. J. (1986). Exergy method of thermal and chemical plant analysis (review paper). *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol 64, 1986.
- Lagos, S., & Manuel, F. (2013). Análisis de factibilidad técnica y económica de la generación de biogás a partir de purines mediante biodigestores anaerobios.
- Linares, Y. m. (2017). Análisis del Ciclo de Vida de los alimentos incluyendo las categorías falta de inocuidad alimentaria. .
- López, L., Ruiz, J. M., Contreras, L. M., Pedraza, J., & Hermida, O. (2019). Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo
- Lübken, M., Tito, G., & Marc, W. (2010). Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass: current state and prospects of mathematical modeling. *Appl Microbiol Biotechnol*, 85, 1643-1652.
- Masciandaro, G., Ceccanti, B., & García, C. (1994). Anaerobic digestion of straw and piggery wastewater: II Optimization of the Process.
- Metcalf, E., Tchobanoglous, G., Louis, F., & Stensel, D. (2003). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse*. 6^a edition. McGraw-Hill International. México.
- Navarrete, J. (2012). Carne de Porcino. Panorama Agroalimentario.
- 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).
- Orozco, C. (2013). Problemas resueltos de contaminación ambiental.
- Pandey, M., & Gogoi, T. K. (2013). Energy and Exergy Analysis of a Reheat Regenerative Vapor Power Cycle., *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, Special Issue 3.
- Parra, A. C. Z. (2014). Evaluación de la aplicabilidad de la metodología ACV en la cuantificación de los impactos ambientales de la gestión de los biorresiduos municipales de la ciudad de Cali.
- Peña, M. D., Cabanes, D. C., & Rodríguez, O. A. (2014). Aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para la mejora ambiental en áreas de incidencia de la producción porcina en Cienfuegos, Cuba.
- Pereda, I., & Díaz, J. P. (2015). Anaerobic Biodegradation of Solid Substrates from Agroindustrial Activities-Slaughterhouse Wastes and Agrowastes. .
- 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. .

- Rashidi, M. M., Aghagoli, A., & Ali, A. (2014). Thermodynamic Analysis of a Steam Power Plant with Double Reheat and Feed Water Heaters., *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6, March 2014, pp. 1-11.
- Ribero, A. G. (2010). *Mejoramiento de la eficiencia energética y económica en el CAI Arrocero Sur del Jíbaro mediante estudio de potenciales de ahorro por aprovechamiento energético de residuos* [Tesis en Opción al grado de Máster. Maestría de Eficiencia Energética, José Martí Pérez]. Sancti Spíritus].
- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la Gestión Ambiental.
- Rojas, C. (2018). Generación de biogás a partir de la cascarilla de arroz para reducir costos energéticos en la piladora La Merced S.R.L.
- Ruiz, E. (2016). El análisis de ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación.
- Sierra, J. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz como combustible. Trabajo de diploma. Departamento de ingeniería agrícola. Facultad de ingeniería. Universidad de Sucre. .
- Soncco, S. (2019). Implementación de sistema de generación de energía eléctrica alternativo a partir de la producción de biogás, en el distrito de Yanaoca, Provincia de canas. Perú.
- 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. .
- Tarapué, V. M. (2014). Análisis de Ciclo de Vida aplicado a la gestión de residuos sólidos municipales, Guatemala
- Toledo., J. L. C. (2017). Influencia del alimento balanceado de crecimiento 1, en una sala de maternidad porcina.
- Useros, J. L. (2012). El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales.
- 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*.
- Wilkie, A. (2005). Anaerobic Digestion of Dairy Manure: Design and Process Considerations. In: *Dairy Manure Management: Treatment, Handling, and Community Relations*. Natural Resource Agriculture and Engineering Service (NRAES), Cornell University, Ithaca, New York.
- Wimberly, J. (1983). Paddy rice post-harvest industry and developing countries, Manila, IRRI.
- Yu, J., Jibin, Z., & Jin, H. (2009). Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull. *Bioresource Technology*.
- Zhao, R., & Zhong, R. (2010). Methane production from rice straw pretreated by a mixture of acetic-propionic acid.

Anexo 1: Resumen el proceso de producción agroindustrial de producción de arroz.

Tabla No 1. Flujos de entrada y salida al proceso de producción de arroz por etapas y acciones medioambientales.

Etapa	Entrada de productos	Salida de Productos, residuos o emisiones	Acción sobre el medio ambiente
Preparación de Tierra	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustible ✓ Lubricantes ✓ Agua subterránea o de embalses 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Agua residual ✓ CH4 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Intenso laboreo de suelos ✓ Emisiones de GEI
Siembra	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustible ✓ Semilla de arroz químicamente tratada ✓ Lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gases de Combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones de gases de combustión ✓ Emisiones por arrastre de productos químicos
Protección Fitosanitaria	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fertilizantes ✓ Herbicidas ✓ Fungicidas ✓ Plaguicidas ✓ Productos Biológicos ✓ Combustible ✓ Lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gases de combustión 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones de productos químicos al aire. ✓ Emisiones de gases de combustión
Cosecha	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Combustible ✓ Lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Paja de arroz ✓ Arroz Húmedo ✓ Agua residual 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones de gases de combustión ✓ Laboreo intenso de suelos

		✓ Gases de Combustión	✓ Emisión de metano por deposición de la paja de arroz
Secado de Arroz Húmedo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arroz cáscara húmedo ✓ Combustible ✓ Electricidad 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arroz Seco ✓ Residuos de Secado ✓ Gases de combustión ✓ Material Particulado 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones de gases de combustión ✓ Emisiones de partículas al medio ✓ Emisiones de calor del quemador y torres de secado al medio.
Molinería y embalaje	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arroz seco ✓ Electricidad ✓ Lubricantes ✓ Sacos e hilo para envasar 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Arroz Consumo ✓ Salvado ✓ Cabecilla ✓ Cascarilla ✓ Residuos de material de envase 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Emisiones de polvo al ambiente ✓ Emisiones de gases de combustión

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Inventario de Ciclo de Vida para las Alternativas Propuestas.

Flujos	U/M	A1	A2	A3	A4	A5
Entradas de la Tecnosfera						
Arroz húmedo (24% Humedad)	T	331,44	331,44	331,44	331,44	331,44
Entradas de la Ecosfera						
Aire ambiente	T	54,07	44,20	75,54	56,04	131,58
Oxígeno del Aire	T	11,36	9,27	15,84	11,74	27,58
Entradas de Energía						
Electricidad	MWh	4,25	4,25	0,00	4,25	0,00
Biogás	m3	0,00	2.351	10.136	0	10.136
Diésel	T	3,26	2,18	0,00	0,0537	0.0537
Biomasa (cascarilla)	T				10,64	10,64
Salidas a la Tecnosfera						
Energía eléctrica	MWh			1,68		15,22
Arroz seco (12.5% Humedad)	T	262,41	262,41	262,41	262,41	262,41
cenizas de cascarilla	T				2,13	2,13
Salidas a la Ecosfera						
Residuos de secadero	T	18,09	18,09		18,09	
Vapor de agua evaporada	T	36,79	36,79	36,79	36,79	36,79
Vapor de agua de la combustión fósil	T	4,50	3,00		0,07	0,07
vapor de agua biogénica	T	0,04	2,11	9,11	4,42	13,54
Emisiones de CO2 fósil	T	10,12	6,74		0,17	0,17
Emisiones de CO2 biogénico	T	1,67	4,23	18,25	14,68	32,93
Emisiones de CH4	T	0,96	0,0384	0,0318	0,79	0,0318

Tabla No. 2 Inventario ACV para las diferentes alternativas a evaluar.

Anexo 3. Valores de los flujos de entrada y salida del inventario recalculado para el Análisis de Sensibilidad.

Tabla 3. Inventario recalculado para el análisis de sensibilidad en cinco variaciones.

Variaciones		sens1	sens2	sens3	sens4	sens5
Entradas de la tecnosfera	U/M					
Arroz húmedo (24% humedad)	t	331,44	331,44	331,44	331,44	331,44
Entradas de la Ecosfera						
Aire ambiente	t	132,32	133,09	135,16	133,6	132,75
Oxígeno del Aire	t	27,74	27,9	28,33	28,01	27,83
Entradas de energía						
Electricidad	MWh	0	0	0	0	0
Biogás	m3	10136,2	10136,2	10136,2	10136,2	10136,2
Diésel	t	0,05	0,11	0,25	0,14	0,08
Biomasa (cascarilla)	t	10,64	10,64	10,64	10,64	10,64
Salidas a la tecnosfera						
Energía eléctrica	MWh	15,22	15,22	15,22	15,22	15,22
Arroz seco (12.5% Humedad)	t	262,41	262,41	262,41	262,41	262,41
Cenizas de cascarilla	t	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Salidas a la Ecosfera						
Residuos de secadero	t	0	0	0	0	0
Vapor de agua evaporada	t	36,79	36,79	36,79	36,79	36,79
Vapor de agua de la combustión fósil	t	0,07	0,15	0,35	0,2	0,12
Vapor de agua biogénica	t	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54
Emisiones de CO2 fósil	t	0,17	0,33	0,78	0,44	0,26
Emisiones de CO2 biogénico	t	32,93	32,93	32,93	32,93	32,93
Emisiones de CH4	t	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03