



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química

TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

**Propuesta metodológica para el Análisis del Ciclo de Vida
en alternativas de uso de subproductos y residuos de la
agroindustria azucarera y la producción de etanol**

AUTORA: Nainely Grillo Guzmán

TUTOR: M.Sc. Javier Díaz Pineda

Matanzas, 2021

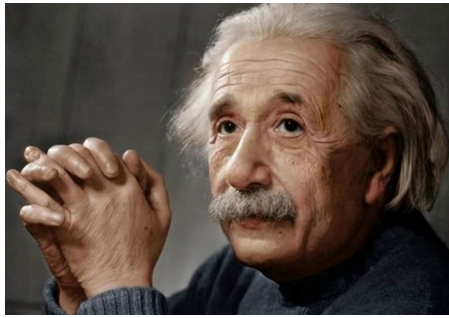
DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Nainely Grillo Guzmán, declaro que soy la única autora del siguiente Trabajo de Diploma, titulado: *Propuesta metodológica para el Análisis del Ciclo de Vida en alternativas de uso de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y producción de etanol*, y en virtud de tal, cedo el derecho de copia del mismo a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 3 de diciembre de 2021.

Nainely Grillo Guzmán

PENSAMIENTO



“Si no quieres cambiar nada, siempre encontrarás una excusa.

Si quieres cambiar algo, siempre hay forma de hacerlo”.

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mi abuelo Billo que me hizo ver que los héroes no existen solo en las películas,

A mi abuelo Pipa que me enseñó que no hay que ser un niño para soñar y jugar como uno,

A mi abuela Ilsa que me mostró que en la vida todo requiere de mucha paciencia,

A mi abuela Alla que me demostró que nada en esta vida es imposible, por todo lo que se desee hay que luchar y llega,

Y a mis padres a los que les debo mi vida y lo que soy hoy;

A todos ellos muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos:

A mis padres Limbania y Conrado y a mi hermana Nely, que han sido las personas más importantes de mi vida y han estado junto a mí en mis logros y derrotas y siempre han sido mi fuente de inspiración y fuerza.

A mi novio Aryam, que ha sido ese lugarcito donde siempre he encontrado cobija cuando pensaba que no podía más, que me ha brindado su amor incondicionalmente y con el que quiero compartir el resto de mis días.

A mis suegros Mayra y Roly, que han sido mi segunda familia, me abrieron sus corazones y han sido un gran apoyo en esta larga travesía.

A mi tutor Javier, que me ha entregado su tiempo y paciencia con mucha dedicación y cariño, además de que fue el primer profesor con el que comencé a dar mis pasos en el mundo de la Ingeniería Química.

A mis tíos, tías, primos, primas que, aunque no nos veamos siempre, ni muy seguido sé que confían en mí y hoy disfrutan tanto como yo mis logros.

A mi abuela Migdalia, ella que ve su mayor felicidad en la risa de sus nietos.

A mis abuelos Ovidio, Adriano e Ilsa que hoy no están físicamente conmigo, pero son mis luceros y mis eternos guardianes, mis mayores victorias van dedicadas a ellos.

A mi tía Elisa, mi tío Gómez, mi tío Iván, mis primos Anabel y Minín, mi abuela Noelia y todas esas personas que se vuelven familia de vida y corazón.

A las químicas del cuarto 143, esas que nos volvimos hermanas y hasta madres, en especial a mi Kris Kris del alma.

A mis compañeros de aula junto a los cuales pasé estos últimos 4 años, a los becados que nos volvimos una enorme familia, en especial a Betariz, mi caso social pero mi mayor amiga y compañera ante todo.

Al profesor Arnaldo Morey Ramos, por confiar en mí desde un primer momento, brindarme las herramientas necesarias para que mi trayectoria universitaria fuera menos compleja, ser más que un profesor un amigo y darme la dicha de impartir clases junto a él.

Al profesor Yuneirys Barroso, que a pesar de hoy no estar entre nosotros le debemos mucho como estudiantes y como humanos.

A Diana Liz Puerto Espina, María Karla Pérez Ávila, Bryan Manuel Zamora Brito, Yadiel Zulueta Hernández y Arialet García Lemus mis hermanos de vida que, aunque no nos veamos diario nuestra amistad es como el aire, siempre se siente y me han brindado su apoyo y hasta sus vidas sin esperar nada a cambio.

A las profesoras Yamile, Ana Edelys, Caridad, a la decana Sonia y todos los otros profesores que han influido en mi formación como futuro profesional, han confiado en mí y que siempre han estado para lo que los necesité.

A Adrián González Mirabal, Pilarín, Loren, Pedro, Iralia y todos esos amigos que me regaló la FEU que me extendieron su mano y se robaron mi corazón en el primer instante.

A Thalya, Carlitos y Elieser que por llegar tardes a este viaje no les quita importancia, nos llevamos súper bien hace apenas unas semanas y siento como si nos conociéramos de toda la vida.

A los trabajadores de Educación Municipal en Colón, Maya, Odalys, Arisleibys y todos los que han hecho de mis días menos oscuros.

A los profesores del CUM-Colón que me recibieron con los brazos abiertos en estas nuevas modalidades de estudios que sin ellos todo hubiese sido mucho más difícil, en especial a Gerardo el director con el cual llegue a funcionar como si fuéramos dos imanes.

A todas aquellas personas que formaron parte de mi día a día y por cosas de la vida fueron bajándose del tren antes de terminar el viaje, pero también marcaron historia y crearon un antes y un después en mí; y aunque hoy el destino nos separó también les agradezco por su granito de arena.

A todo aquel que me dio su voto de confianza, su ayuda, su tiempo y gracias a él hoy puedo lograr el gran sueño de mi vida que es convertirme en Ingeniera Química.

A todos de todo corazón, ¡Muchísimas Gracias!

RESUMEN

En esta investigación llevada a cabo en la Empresa Azucarera Jesús Rabí, formada por el Central Azucarero Jesús Rabí y la Destilería con el mismo nombre; se tiene como objetivo fundamental proponer una metodología para la evaluación del impacto ambiental generado por alternativas de uso de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Como resultado, se proponen dos alternativas tecnológicas para la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol, con la finalidad de minimizar la generación de emisiones contaminantes al medio ambiente. Además, se realiza una revisión crítica del estado del arte referido al ACV en la producción de azúcar y etanol, lo que permite conocer el impacto generado sobre el medio ambiente, mediante el uso del software SimaPro 8.0, la metodología ReCiPe 2016 y la base de datos Ecoinvent 3; lo cual integra y relaciona todos los impactos ambientales con sus problemas específicos. El desarrollo de la metodología propuesta tiene como base las cuatro fases del ACV: definición de objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario del ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida y la interpretación de los resultados obtenidos. La propuesta metodológica formulada, permitirá evaluar cuantitativamente el impacto ambiental generado por estas alternativas tecnológicas, así como su utilización en otros procesos tecnológicos.

ABSTRACT

In this research carried out at the Jesús Rabi Sugar Company, formed by the Jesús Rabi Sugar Mill and the Distillery with the same name. The main objective is to propose a methodology for the evaluation of the environmental impact generated by alternatives for the use of by-products and residues of the sugar agro-industry and the production of ethanol through the Life Cycle Assessment (LCA). As a result, two technological alternatives are proposed for the management of by-products and residues from the sugar agro-industry and the production of ethanol, in order to minimize the generation of polluting emissions to the environment. In addition, a critical review of the state of the art regarding LCA in the production of sugar and ethanol is carried out, which allows to know the impact generated on the environment, through the use of the SimaPro 8.0 software, the ReCiPe 2016 methodology and the Ecoinvent 3 data base; which integrates and relates all environmental impacts with their specific problems. The development of the proposed methodology is based on the four phases of the LCA: definition of goals and scope of the study, life cycle inventory analysis, life cycle impact assessment and the interpretation of the results obtained. The methodological proposal formulated will allow a quantitative assessment of the environmental impact generated by these technological alternatives, as well as their use in other technological processes.

ÍNDICE

RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
1.1. La agroindustria azucarera y el medio ambiente	5
1.1.1. Situación actual de la industria del azúcar de caña y sus derivados en Cuba	6
1.1.2. Integración del proceso de producción de azúcar crudo y etanol.....	8
1.1.3. Principales impactos ambientales de la agroindustria azucarera y producción de etanol	15
1.1.4. Metodologías para evaluar impactos ambientales.	18
1.2. El Análisis del ciclo de vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental.	19
1.3. Fundamentos generales de la metodología del ACV.	21
1.4. Modelación del Inventario de Ciclo de vida (ICV).....	24
1.4.1. Inventario del ciclo de vida del azúcar de caña.....	27
1.4.2. Parametrización del Inventario del Ciclo de Vida.....	29
1.4.3. Análisis de incertidumbre del ICV.....	31
1.5. Métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.	33
1.6. Herramientas informáticas comerciales utilizadas para el ACV.....	35
1.7. Antecedentes del ACV en la agroindustria azucarera y la producción de etanol.....	37
1.8. Conclusiones parciales	38
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.1. Definición de objetivos y alcance del ACV.....	42
2.1.1. Objetivos del estudio.....	42
2.1.2. Alcance del estudio	43
2.1.2.1. Función y descripción del sistema en estudio.....	43
2.1.2.2. Selección de la unidad funcional	43
2.1.2.3. Establecimiento de los límites del sistema.....	44
2.1.2.4. Asignación de cargas ambientales	44
2.1.2.4.1. Variantes agroindustriales de la industria azucarera cubana	45
2.1.2.5. Tipos de impacto a evaluar, metodología e interpretación	47
2.1.2.6. Suposiciones y limitaciones.....	47
2.1.2.7. Requisitos de calidad de los datos	49

2.2. Desarrollo del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).....	49
2.2.1. Inventario del subsistema agrícola.....	50
2.2.2. Inventario del subsistema industrial.....	53
2.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)	55
2.3.1. Clasificación	55
2.3.2. Caracterización.....	58
2.4. Interpretación de los resultados	59
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS	73

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera cubana desde hace ya varios años, ha desarrollado una estrategia para incrementar su competitividad a partir de la diversificación, desde producciones con tecnologías simples, hasta las basadas en la química sintética, biotecnología y en los procesos de obtención de nuevos materiales. Aprovechando las ventajas que ofrece la caña de azúcar como fuente renovable de recursos materiales y energéticos, se plantea que la producción de azúcar tendrá una economía estable y ventajosa en la medida en que se integre la producción de sus derivados (Almazán *et al.*, 2016).

En Cuba, a partir de la actualización del modelo económico, se ejecutan acciones para el rescate de la producción de azúcar y derivados como algunos de los principales contribuyentes al desarrollo de la economía nacional. La industria azucarera se presenta como una opción factible para la diversificación de la industria química en Cuba, a partir de la disponibilidad de productos y co-productos de alto valor agregado. La mayoría de las fábricas de azúcar se autoabastecen energéticamente y exportan el excedente, favoreciendo la integración energética de otras producciones a la de azúcar crudo (Gálvez, 2019; Martín, 2019).

En la actualidad, legar a las futuras generaciones un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad. En el marco de la globalización de las economías no es posible estar al margen de esta preocupación. En estos días, los consumidores son más exigentes, tanto en la conservación de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente, como en la calidad de los productos y servicios que reciben. Por tal motivo, la industria enfrenta el reto de producir con alta calidad y satisfacer las expectativas de los consumidores y de otras partes interesadas en el tema de la protección del medio ambiente (Planos Gutierrez *et al.*, 2012; Valverde, 2012).

El impacto ambiental de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando finaliza su vida útil, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tienen la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en el proceso hasta que el producto llega al cliente consumidor (por ejemplo, proveedores, distribuidores y consumidores). Esta cadena, que va ‘desde el nacimiento hasta la tumba’ es lo que se denomina ciclo de vida de un producto (Albrecht *et al.*, 2020; Shaked *et al.*, 2015; Sonnemann *et al.*, 2018).

Según la norma cubana NC-ISO: 14040, el análisis de ciclo de vida (ACV), en teoría, es un método analítico que contempla y hace una interpretación de los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. El ACV es “la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de su ciclo de vida”. El análisis incluye entonces la extracción de materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reciclaje y disposición final (Albrecht *et al.*, 2020; Maranghi y Brondi, 2020; Meza-Palacios *et al.*, 2019).

La agroindustria de la caña de azúcar y derivados genera problemas de contaminación ambiental durante su ciclo de vida, que en los últimos años ubican a este sector como foco contaminante y obligan a buscar soluciones alternativas para esta situación. Entre los principales elementos que contribuyen a la contaminación ambiental están las corrientes residuales en las diferentes etapas del ciclo de vida, el consumo de diferentes insumos y de combustibles fósiles tanto para las labores agrícolas como para suplir la demanda de energía en el procesamiento industrial (Chauhan *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2010; T. Nguyen y J. Hermansen, 2012; Ramjeawon, 2008).

El análisis de ciclo de vida se encarga de examinar y analizar los aspectos ambientales y los impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o de una actividad. Este análisis incluye los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su elaboración, las emisiones y los residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando se consume o no se puede utilizar. La progresiva constatación de que todas las actividades desarrolladas en el seno de una empresa producen impactos en el medio ambiente, lleva a muchas empresas a considerar la necesidad de analizar con más detalle todas sus acciones (Armenteros *et al.*, 2016; Armenteros *et al.*, 2018; Cedeño, 2017).

La industria azucarera cubana, actualmente inmersa en un proceso de profundas transformaciones, requiere que unido a los cambios que se realizan se preste atención a la solución de los problemas ambientales, puesto que, si los cambios no se hacen en concordancia con el medio ambiente, se corre el riesgo de estancarse ante las exigencias ambientales actuales. Dicha industria, que décadas atrás era la locomotora de la economía cubana, es considerada actualmente por las autoridades de la isla como un sector estratégico porque aporta divisas con la exportación de sus productos y subproductos; así como energía y otros productos que se encadenan con casi todas las industrias del país (Moya, 2007).

Ubicada en la parte más oriental del municipio de Calimete en la provincia de Matanzas, se encuentra la Empresa Azucarera Jesús Rabí, formada por en Central azucarero Jesús Rabí y la Destilería con el

mismo nombre, responsable de gran cantidad de ingresos al país a partir de la producción de azúcar crudo. Su objetivo social es producir y comercializar de forma mayorista azúcares, mieles y derivados tales como ceniza, cachaza, bagazo, residuos agrícolas de la cosecha, semilla de la caña certificada y otros. Para garantizar la calidad óptima de las producciones existe todo un sistema de control y aseguramiento de la calidad, amparado por el chequeo de todos los procedimientos, instrucciones de trabajo, guías de operación y limpieza de los equipos. Así como, el proceso productivo se sustenta en la garantía y calidad de la materia prima, el aseguramiento del equipamiento tecnológico y los recursos humanos.

Aunque el ACV ha alcanzado alto nivel de desarrollo, en la industria azucarera sólo se presentan algunos estudios con ciertas limitaciones. Pocos trabajos vinculan las etapas agrícola e industrial, por lo que es necesario desarrollar esta herramienta en el sector, sobre todo en la industria de la caña de azúcar y específicamente en Cuba, donde no se reportan contribuciones y son necesarios estos análisis como complemento de los estudios de diversificación e integración de procesos que de forma impetuosa se realizan (Rowe, 2017a). Lo que sirve de impulso para tomar dicha Empresa Azucarera como caso de estudio y así implementar este tipo de análisis de impacto ambiental en el país.

Teniendo en consideración los elementos expuestos con anterioridad, se formula el siguiente **problema científico de la investigación**:

¿Cómo evaluar cuantitativamente el impacto ambiental generado por diferentes alternativas tecnológicas empleadas en la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol?

Para dar solución al problema científico se propone la siguiente **hipótesis de trabajo**:

Si se propone una metodología para el Análisis del Ciclo de Vida en la agroindustria azucarera y la producción de etanol, se podrá evaluar cuantitativamente el impacto ambiental generado por diferentes alternativas tecnológicas empleadas en la gestión de subproductos y residuos en dichas industrias.

Para dar cumplimiento a la hipótesis planteada con anterioridad se ha trazado el siguiente **objetivo general** de la investigación:

Proponer una metodología para la evaluación del impacto ambiental generado por alternativas de uso de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol mediante Análisis de Ciclo de Vida.

A continuación, se plantean los siguientes **objetivos específicos** de la investigación:

1. Realizar una revisión crítica del estado del arte referido al Análisis del Ciclo de Vida en la producción de azúcar y etanol.
2. Proponer alternativas tecnológicas para la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol, con la finalidad de minimizar la generación de emisiones contaminantes al medio ambiente.
3. Elaborar una metodología para la evaluación del impacto ambiental generado por las alternativas analizadas a través del ACV.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos, necesarios para el desarrollo de la investigación, obtenidos al realizar una revisión bibliográfica. Se abordan importantes temáticas como las etapas del proceso producción para la obtención de azúcar crudo y la producción de etanol, la situación actual de la industria azucarera y sus derivados en Cuba. También se trata la relación que existe entre la agroindustria azucarera y el medio ambiente; se estudian los principales métodos para la evaluación de los impactos ambientales, enfatizando en el Análisis de Ciclo de Vida como principal herramienta. Del mismo se muestran los aspectos fundamentales de su metodología y las herramientas informáticas comerciales utilizadas para su aplicación.

1.1. La agroindustria azucarera y el medio ambiente

El azúcar constituye uno de los componentes más importantes y universalmente utilizados de la dieta humana, por su aporte energético y capacidad de endulzar. Para la nación cubana, la caña y el azúcar forman parte de la historia, la cultura y las tradiciones del pueblo, puesto que, por múltiples razones, la economía cubana erigió a la agroindustria azucarera como pilar principal (De Matos *et al.*, 2020; Moya, 2007; Rein, 2017).

Pese a su importante contribución al desarrollo agrícola y general, la agroindustria azucarera puede tener también efectos colaterales perjudiciales para el medio ambiente. Si un control adecuado, esta industria, lo mismo que las demás, puede crear contaminación ambiental o riesgos ecológicos de distintas formas: descargas de residuos orgánicos o gases que empeoran la calidad del aire y producen sustancias tóxicas; y la utilización de maquinarias peligrosas para la seguridad y salud de los trabajadores. La gravedad de los problemas de contaminación provocados por la actividad agroindustrial varía mucho, pero parece evidente que los procedimientos de transformación de alimentos son en general de menor utilización intensiva de energía y liberan menos dióxido de carbono y residuos metálicos que la mayoría de las demás actividades industriales. Las industrias de elaboración de productos agrícolas como las fábricas de azúcar (centrales azucareros), pueden llegar a ser, no sólo autosuficientes en energía mediante la conversión de los residuos de biomasa, sino también notables productores de electricidad para abastecer a la red nacional y reducir así las emisiones de dióxido de carbono. Los riesgos de contaminación son relativamente menores en las etapas iniciales de conversión y transformación, pero pueden aumentar al crecer el nivel de alteración física y química, especialmente

en las industrias que utilizan equipos y tecnologías anticuadas (Centella *et al.*, 2001; González *et al.*, 2005; Planos Gutierrez *et al.*, 2012).

1.1.1. Situación actual de la industria del azúcar de caña y sus derivados en Cuba

Cuba fue durante muchos años el principal exportador de azúcar del área y contó con alrededor de 160 ingenios que en las décadas del 70 y 80 del siglo pasado produjeron de forma estable en el entorno de 7 millones de toneladas de azúcar cuyo destino fundamental era la ex Unión Soviética y otros países de la llamada Europa del Este. Este volumen de azúcar producida generaba una cantidad apreciable de bagazo y melaza que podían ser convertidos en derivados como alcohol, proteína unicelular (levadura Torula), aglomerados de bagazo, furfural y sus derivados, que también contaban con demanda en estos países y que eran intercambiados por petróleo, alimentos, equipos y materias primas (Díaz, 1986; Martín, 2019; Morell, 1985; Moya, 2007).

Hoy en día la crisis del mercado internacional del azúcar, ha traído como consecuencia la necesidad de la diversificación de la industria azucarera cubana y la implementación de nuevas tecnologías, que a la par de generar beneficios económicos, contribuyan a lograr la sostenibilidad ambiental de las producciones y presupongan una mayor flexibilidad tecnológica con impactos positivos en la eficiencia del proceso. En el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030 (PNDES), se contempla a la agroindustria azucarera y sus derivados, como uno de los sectores estratégicos para la transformación productiva del país. De ahí que, resulte clave el fomento de la producción de azúcar, el incremento de la eficiencia agrícola e industrial, la modernización del equipamiento, y el avance hacia la creación, recuperación y explotación de las plantas de derivados, priorizando las destinadas a la obtención de etanol, alimento animal y bioproductos (Gálvez, 2019; PCC, 2017).

Actualmente, la industria azucarera cubana tiene como principales objetivos la producción de las diferentes clases de azúcar y el aumento de la producción de derivados. Dentro de los principales derivados producidos actualmente en el país se encuentran el etanol, aguardiente y otras bebidas alcohólicas, la miel urea bagacillo y el bagazo para la cogeneración de energía (Almazán *et al.*, 2016; De Matos *et al.*, 2020).

Del tallo de la caña no solo se produce azúcar, es una planta que ofrece diversos productos y subproductos. De esta no se desperdicia nada, sus hojas y el bagazo son utilizadas en alimentos para animales como los ganados vacunos y porcinos, de la combustión del bagazo se genera energía eléctrica, a partir de las mieles y azúcares se fabrican confites, dulces y bebidas; mediante un proceso

de destilación de las mieles se fabrica etanol y combustible vehicular, considerado como la gran alternativa en la absorción de dióxido de carbono, contribuyendo así al cuidado del medio ambiente. La fibra de caña de azúcar es utilizada en la fabricación de papel, esta fibra es biodegradable, compostable y reciclable. Como resultado de la fermentación de la melaza de la caña de azúcar se obtiene ácido cítrico, que es uno de los aditivos más utilizados por la industria de los alimentos, además de ser un buen conservante y antioxidante natural (Gil *et al.*, 2013; Moya, 2007; Rein, 2017).

El sistema azucarero cubano es vital para 600 comunidades que dependen de él. Unos 1.2 millones de personas se ganan la vida directa o indirectamente de este sector en toda la isla. Pero en las últimas décadas el nivel de producción, que lo hizo famoso en todo el mundo, ha disminuido constantemente. Las últimas cosechas y zafras han sido bastante complejas; en esto influye la baja disponibilidad financiera para adquirir recursos, la pandemia del COVID-19, los bajos rendimientos agrícolas e industriales, la elevada obsolescencia tecnológica de la industria y la intensificación del embargo económico que aplica el gobierno de los Estados Unidos al país. Se estima con los resultados de la zafra 2020-2021 un incremento de la exportación de azúcar producida en la actual cosecha, en lo fundamental hacia el mercado chino. En la producción de derivados de la industria azucarera se incrementa la generación de electricidad con energía renovable a partir de la incorporación de una nueva planta bioeléctrica y las toneladas de miel producidas.

La industria azucarera, que décadas atrás era la locomotora de la economía cubana, es considerada actualmente por las autoridades de la isla como un sector estratégico porque aporta divisas con la exportación de sus productos y subproductos; así como energía y otros productos que se encadenan con casi todas las industrias del país (Moya, 2007).

La crisis energética que se vislumbra con el agotamiento paulatino de los combustibles fósiles y el efecto negativo que se ha tenido en el medio ambiente ha demandado la atención de los científicos y empresarios hacia el uso de las fuentes renovables de energía, sin embargo, la carencia de productos químicos está también presente en esta situación. En este concepto, el enfoque de aprovechar integralmente la biomasa disponible, como fuente de productos químicos y energía, con apoyo del concepto de biorefinería, mediante la conversión de los azúcares que están en los materiales lignocelulósicos es un camino para optimizar la ganancia de la energía solar incorporada en el crecimiento de las plantaciones agrícolas y permite mediante el fraccionamiento inicial de la biomasa obtener una diversidad de productos químicos de alto interés (Miranda *et al.*, 2018).

En las industrias destinadas a la obtención de etanol a partir de la caña de azúcar, se han llegado a establecer usos alternativos a los componentes de la caña como son: las puntas de caña o cogollo, el jugo de caña o guarapo, y la fibra o bagazo. Por ejemplo, el bagazo se puede destinar, en parte, para producir la energía eléctrica (bioelectricidad) necesaria para operar los molinos y la casa de calderas, y en otros casos para la producción de pulpa de celulosa. El guarapo, a su vez, puede destinarse a la producción de azúcar, bioetanol o biometano, y en forma alternativa, el guarapo puede destinarse a la producción de mieles vírgenes o meladuras, que, combinadas con el bagazo saponificado (tratado con álcalis) permite producir piensos para ganado vacuno (Brambila-Paz *et al.*, 2013).

Entre los subproductos del proceso de destilación del etanol encontramos el ácido acético y ésteres de ácido butírico, los que tienen un alto valor económico como productos químicos para el sabor y la fabricación de perfumes. Especialmente el acetato de butilo está en alta demanda como componente de los sabores de piña y plátanos en la industria de los alimentos. Además, los ésteres grasos del alcohol amílico tienen aplicaciones como lubricantes, surfactantes y como ingrediente en la industria cosmética. La levadura torula es una proteína unicelular proveniente de la fermentación de la miel final. Es un producto que se puede obtener en forma de crema y en forma seca, rico en proteínas y vitaminas del complejo B, ideal para la fermentación de piensos para la alimentación animal (Brambila-Paz *et al.*, 2013; Miranda *et al.*, 2018).

Ante la necesidad actual de hacer rentables las producciones cubanas, entre ellas la de levadura forrajera torula, es imprescindible ir a la búsqueda de sustratos que aporten azúcares más baratos que la miel final de caña, cuyos precios se mantienen relativamente altos en el mercado mundial. Entre estas fuentes de azúcar, las más atractivas resultan los mostos o vinazas de destilería, por ser un subproducto con alrededor de 10 g/L de azúcares reductores totales (ART), y que es un residual con una gran carga orgánica y de difícil tratamiento (Ree, 2013).

1.1.2. Integración del proceso de producción de azúcar crudo y etanol

La industria azucarera tiene como objetivo extraer el azúcar que trae la caña en forma de cristales lo más pura posible. Para lograr dicho objetivo, se emplean diferentes operaciones unitarias. La caña de azúcar tiene como principales componentes el jugo y el bagazo, cada uno con composiciones bien definidas, en intervalos dados (Hugot, 1986; Jenkins, 1971; Rein, 2017).

Este proceso consta de varias etapas bien definidas:

- 1- Etapa de manipulación y preparación de la caña de azúcar.

- 2- Etapa de extracción.
- 3- Etapa de purificación.
- 4- Etapa de concentración.
- 5- Etapa de cristalización.
- 6- Etapa de centrifugación.
- 7- Etapa de almacenamiento.

Etapa de manipulación y preparación de la caña de azúcar

Esta etapa tiene como objetivo reducir el tamaño de las partículas de caña hasta un tamaño adecuado para su manipulación en el proceso de extracción, romper tantas células portadoras de azúcar de la caña, como sea posible, para facilitar la extracción de azúcar y producir un material que tenga las características apropiadas para la etapa de molienda (Rein, 2017). La operación de preparación juega un papel fundamental en la extracción, puesto que mediante la misma se abren las células de la caña, lo que facilita la posterior extracción de la sacarosa. Después de ser finamente preparada la caña, esta es conducida al tren de molinos (Nogueira, 2018; Singh y Tiwari, 2018).

Etapa de extracción

El objetivo de la etapa de molienda, es extraer la mayor cantidad posible del azúcar que entra con la caña. Este proceso de extracción de azúcar se realiza por una combinación de dos operaciones: compresión por molienda y lixiviación (lavado del bagazo a contra corriente), las que se aplican a contra acción. Esto se logra en el tándem de molinos integrado de forma genérica por cinco unidades de cuatro mazas (superior, cañera, bagacera y un alimentador). El primero de ellos es de extracción húmeda, de donde sale el jugo primario y los cuatro posteriores son de extracción seca. Al quinto molino se le añade cierta cantidad de agua de retorno que se conoce como la adición de agua de imbibición, a una temperatura entre los 60 y 80 °C, con el objetivo de extraer el otro 50 % de jugo que la caña no fue capaz de entregar por compresión, y diluir mejor la sacarosa lo que permite obtener un bagazo seco. En esta etapa, el jugo extraído del quinto molino pasa hacia el cuarto, y así descendientemente hasta el segundo, conocido este proceso como maceración. El extirpado del segundo molino se une al jugo sacado del primero, y esa mixtura se conoce como jugo mezclado (De Matos *et al.*, 2020; Falcón *et al.*, 1995; Pedrosa, 1975).

En la etapa de molienda, se obtiene el jugo mezclado que se envía al proceso, y el bagazo que sirve como combustible hacia las calderas para la generación del vapor, y como materia prima para otros

derivados. Todo el jugo extraído pasa por el colador rotatorio, que separa el jugo del bagacillo, el líquido pasa al proceso de purificación impulsado por bombas. El bagazo que no sea necesario usar en la generación de vapor pasa a la casa de bagazo para su almacenamiento (Hugot, 1986).

Etapa de purificación

El propósito de la purificación es remover los no azúcares que contiene el jugo extraído con el objetivo de posibilitar la máxima recuperación de azúcar de alta calidad. El objetivo fundamental que se permite es tratar de impartir a estos no azúcares la condición de insolubles, ya que esto permitirá su remoción por sedimentación, filtración y/o sedimentación. La eliminación de los no azúcares tiene que realizarse de manera que los azúcares no sean destruidos en una cantidad apreciable, también debe evitarse la destrucción de los azúcares reductores porque sus productos de descomposición traen efectos nocivos al proceso (Meyer *et al.*, 2013; van der Poel *et al.*, 1998).

El jugo mezclado obtenido en la etapa de molienda tiene carácter ácido (pH aproximado de 5,2 – 5,7), esto provoca la rápida inversión de la sacarosa para formar glucosa y fructosa, lo cual es una pérdida irreversible en el proceso. Para minimizar las posibles pérdidas de sacarosa, el jugo es tratado con lechada de cal (disolución acuosa de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , con una concentración de 4 - 5 °Bé) en el tanque de alcalizar (alcalización en frío), con el objetivo de elevar su pH y neutralizar la acidez del jugo. La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen en el jugo. Con el propósito de aumentar o acelerar las complejas reacciones químicas que tienen lugar en esta etapa, se eleva la temperatura del jugo alcalizado mediante un sistema de calentadores de tubos y coraza hasta 106 °C. El fluido que se emplea para calentar el jugo es vapor saturado suministrado por el evaporador múltiple efecto (Nogueira, 2018; Rein, 2017).

Posteriormente, el jugo es enviado a un evaporador instantáneo (tanque flash) que se encuentra abierto a la atmósfera, lo que hace que el jugo proveniente de sitios sometidos a presiones diferentes a la atmosférica, busque el equilibrio al ceder el calor hasta que su temperatura sea la de saturación correspondiente a la presión atmosférica. A la salida, se aplica un floculante que ayuda en la formación del flóculo, y acelera el próximo proceso en el clarificador, ya que este es de bajo tiempo de retención (BTR) (Chen y Chou, 1993; Díaz, 2012).

La clarificación es una de las etapas más importantes en el proceso, en ella se procede a la separación de la mayor parte de las impurezas que acompañan al jugo. Se emplea como método de separación la operación unitaria denominada sedimentación; los sólidos no azúcares se precipitan en forma de lodo

a lo que se denomina cachaza, y el jugo claro, se extrae por reboso por la parte superior del clarificador, el cual continúa en el proceso de producción. El jugo clarificado posee un pH alrededor de 6,8 a 7,1. La cachaza que se obtiene en el clarificador tiene un alto contenido en azúcar. Para recuperar el azúcar que contiene la cachaza, la misma es filtrada, donde se le realiza un lavado con agua de retorno. Para ello, los lodos que salen del clarificador son enviados al cachazón, y se mezclan con bagacillo que sirve como medio filtrante y se crea una torta de cachaza. La misma pasa a los filtros rotatorios al vacío que funcionan con bajo vacío, primero para lograr que la capa de torta de cachaza se adhiera al filtro, después gira, y al llegar a la parte superior esta capa, se produce el alto vacío. Este succiona más fuerte, y es en el momento en que se añade el agua caliente en forma de spreys para disolver la sacarosa y extraérsela. El jugo filtrado que se obtiene posee aproximadamente un 80 % de pureza y 12 °Bx, y es recirculado al área de purificación (tanque de alcalizado). El sólido, cachaza, es almacenada para posteriormente ser empleada como fertilizante orgánico (Almazán *et al.*, 2016; Meyer *et al.*, 2013; Rein, 2017).

Etapas de concentración

Los jugos al salir de la etapa de purificación son sometidos a una serie de cambios físicos que en su estado final permitirán la obtención del azúcar en forma cristalina. El primer estadio de este proceso es la etapa de evaporación del agua, donde su objetivo es ir obteniendo cada vez más una solución más concentrada. Es muy importante esta etapa debido a que toda el agua que se evapora, se condensa y pasa a formar parte de los condensados, ahorrándose así gran cantidad de agua y energía (Cortés *et al.*, 2021).

El jugo que había sido extraído por el tope del sedimentador, pasa a la etapa de concentración compuesta por los preevaporadores y los evaporadores. El objetivo de esta etapa es evaporar la mayor cantidad de agua contenida en el jugo clarificado de un 73 al 75 %, basándose en los principios de Rillieux, y así concentrar el jugo hasta 65 °Bx. Este resultado se logra con evaporadores a múltiple efecto, que consiste en cuatro evaporadores que operan en serie. El jugo comienza a concentrarse en el pre evaporador que es un equipo a simple efecto; de este es bombeado al primer vaso del cuádruple efecto. El múltiple efecto es un equipo que trabaja con diferentes presiones en sus vasos, las cuales van disminuyendo del primero al último efecto. Esto provoca que el jugo circule de un efecto al siguiente. El vapor solo se alimenta al primer vaso, al resto se alimenta el vapor que se evapora del jugo del vaso en el vaso anterior; este vapor también se emplea en el calentamiento del jugo. Del último vaso sale el jugo concentrado, que continúa en la etapa de cristalización y centrifugación, y un vapor que es

condensado en los equipos denominados condensadores. El jugo concentrado que se obtiene en los evaporadores se conoce como meladura, con una concentración de sólidos solubles aproximada de 64 °Bx y una pureza del 85 % (Cortés *et al.*, 2021; De Matos *et al.*, 2020; Singh y Tiwari, 2018).

Etapas de cristalización

El objetivo final de las fábricas de elaboración de azúcar crudo, es sin duda la obtención de un cristal de tamaño lo más uniforme posible y un alto grado de pureza. Lo ideal en todo proceso de cristalización es obtener cristales individuales de tamaño uniforme; todas las desviaciones de la uniformidad deben calificarse como indeseables. La tendencia en la cristalización del azúcar es que la granulación o nucleación se realice por la introducción de una determinada cantidad de azúcar pulverizado extremadamente fino, suspendido en un líquido orgánico en el cual la sacarosa es insoluble (Rein, 2017).

La cristalización consiste en continuar la evaporación del agua que contiene la meladura, hasta un punto en que la concentración de la sacarosa disuelta, alcance un grado de saturación que forme cristales. Este proceso se desarrolla en seis tachos a simple efecto, que son los equipos principales de esta área, y se realiza de forma más lenta para poder obtener el grano de azúcar cristalizado con alta pureza. El esquema que se emplea es el de tres masas cocidas con doble semilla, utilizado para producir un crudo de polarización mínima de 97,80 °S y de un color en el intervalo de 25 a 30 UCH (Unidades de Color Horne) (Acosta *et al.*, 2011).

El proceso de elaboración comienza con la fabricación de la masa cocida C a partir de cristales de azúcar usados como semilla (cristal 600), al que se alimenta meladura y miel B para alcanzar la pureza deseada. El cristal 600 es la semilla primaria, y se prepara en el laboratorio con una disolución de azúcar refino en agua, y después se disuelve en alcohol; el agua y el alcohol forman una disolución donde el azúcar cristaliza y se deposita en el fondo, ya que es insoluble en alcohol. Una vez concluida la masa cocida C, se centrifuga obteniéndose la miel final que sale del proceso, y el azúcar C que se utiliza como base para elaborar las masas cocidas B y A. El azúcar obtenido de la centrifugación de las masas cocidas A y B, es el que forme parte del azúcar comercial. La miel B se emplea para la elaboración de la masa cocida C, y la miel A en la elaboración de masas cocidas B. Para la elaboración de la masa cocida A se emplea la meladura (Rein, 2017; Singh y Tiwari, 2018).

Etapas de centrifugación

En las etapas anteriores y por la combinación de procesos físicos y químicos se logra la formación de cristales de azúcar suspendidos en un licor madre que los acompaña en un medio heterogéneo conocido como miel cocida. Sin embargo, en esta forma el azúcar no se comercializa en la actualidad y se hace necesaria la separación de los cristales a través del proceso conocido como centrifugación o purgado (Almazán *et al.*, 2016).

El material de entrada a esta etapa son las masas cocidas procedentes de la cristalización. En el caso de las masas comerciales, esta separación produce un azúcar con más del 99 % de pureza y granos con suficiente tamaño, alrededor de 0,65 y 0,80 mm, para su realización comercial. Las mieles obtenidas de la separación (A y B) son retornadas al proceso para ser agotadas. En el caso de las masas de agotamiento, el azúcar centrifugado se retorna hacia los tachos (como semilla), pues su tamaño, en el orden de los 0,25 a 0,40 mm, y su pureza inferior al 90 %, no constituyen un producto apto para la comercialización. La miel ya agotada como producto final, se entrega a los tanques de almacenamiento hacia otras plantas de producciones derivadas (Acosta *et al.*, 2011).

La operación de centrifugación se considera como la última etapa de purificación, quizás la de mayor trascendencia, ya que en ella se logra separar el cristal de azúcar de su licor madre, o sea, que se trata de un proceso de separación de mezclas, donde se separa la parte sólida (azúcar) del líquido (miel). Esto se logra en seis centrífugas comerciales (o de primera), tres intermedias (o de segunda) y cuatro de agotamiento (o de tercera). De este subproceso es de donde se deriva la definición de doble semilla al sistema de cocción de masas cocidas; este se debe a que se utiliza el azúcar obtenido de la centrifugación de la masa cocida C, en la fabricación de la masa cocida B, y el azúcar logrado de la centrifugación de esta masa cocida B, en la fabricación de la masa cocida A (Almazán *et al.*, 2016; Rein, 2017).

Etapas de almacenamiento

El proceso no culmina con la obtención del azúcar por separado; debido a que posterior a ello se hace necesaria la conservación del producto por almacenamiento. El azúcar pasa por una canal y llega a un elevador de cangilones que la entrega a un rastrillo para depositarla en una tolva acoplada para su posterior envase y almacenamiento (Acosta *et al.*, 2011; Rein, 2017).

Producción de etanol y levaduras

En Cuba, la principal materia prima para la producción de alcohol es la caña de azúcar. En general, se necesitan unos dos kilogramos de azúcares para producir un litro de etanol. Es posible obtener cerca de

70 L de etanol por tonelada de caña (a partir de los azúcares de su jugo), si toda se dedica a ello, o alrededor de 250 L de etanol por tonelada de melaza, en dependencia de la eficiencia de fermentación, o de 250 a 300 L de etanol por tonelada de bagazo seco. Si toda la caña, incluyendo su bagazo, se dedicase totalmente a la producción de etanol podría lograrse un rendimiento de 100 a 120 L de etanol por tonelada de la misma (Gálvez, 2019).

El etanol se puede producir a través de la fermentación directa de jugos de caña de azúcar, una mezcla de jugos y melazas, o melaza diluida en agua. La producción de alcohol etílico a partir de melazas de caña, generalmente incluye cuatro etapas fundamentales: primero el acondicionamiento de las materias primas, luego la conversión de los carbohidratos en azúcares simples o asimilables por la levadura, después la fermentación alcohólica de estos azúcares y finalmente la separación del etanol y otros subproductos por destilación. Primeramente, la miel final de caña se diluye con agua, se ajusta el pH (de 4 a 5 unidades) con ácido sulfúrico y se le añade nitrógeno y fósforo en forma de sales solubles (sulfato y fosfato de amonio) (Bamforth y Cook, 2019; Laluce *et al.*, 2016). La levadura proveniente de un cultivo puro de laboratorio se propaga mediante pasos sucesivos estériles en condiciones aeróbicas hasta obtener volúmenes de 1 a 2 m³. Se aumenta la biomasa en el prefermentador con un volumen que oscila entre 10 y 20 % del fermentador. En esta etapa se añade miel con una concentración de azúcares de unos 100 g/L en condiciones no estériles. Cuando la levadura se encuentra a mediados de la fase de crecimiento es inoculada en el fermentador, donde comienza la fermentación alcohólica en condiciones anaeróbicas con una concentración de azúcares de 150 a 160 g/L. La levadura crece simultáneamente con la producción de alcohol por espacio de unas 20 h. La velocidad de fermentación aumenta de forma rápida hasta alcanzar el máximo al término de las 15 h. La producción de alcohol continúa entonces a una velocidad decreciente, concluyendo el ciclo de 24 a 30 h de fermentación, para obtener una concentración final de etanol de 6 a 7 % v/v. Durante la producción de etanol ocurren reacciones exotérmicas, por lo que es necesario eliminar el calor desprendido en el transcurso de la fermentación y mantener la temperatura cerca del óptimo (de 33 a 34 °C), de lo contrario la temperatura aumenta de 40 a 42 °C, con sensibles pérdidas en el rendimiento (Bergmann *et al.*, 2018; Gálvez, 2000; Ramesh y Ramachandran, 2019).

Según Saura *et al.* (2019), el sistema de destilación tradicional empleado en Cuba está compuesto por una columna destiladora y varias rectificadoras. Esta operación física está destinada a separar los componentes de la mezcla, de acuerdo a las volatilidades relativas de los mismos. La batición fermentada con un porcentaje alcohólico entre 8 y 9 % (v/v), pasa primeramente por un precalentador

donde se eleva su temperatura desde 35 hasta 60 °C, aproximadamente. Esto se realiza aprovechando el calor desprendido durante la condensación de los vapores alcohólicos obtenidos en el tope de la columna rectificadora. El vapor que arrastrará al etanol se alimenta por la base de la columna y la batición fermentada por el tope en la columna destiladora, que contiene un número importante de platos perforados. En cada plato se producen evaporaciones y condensaciones sucesivas, como resultado de lo cual, el vapor que asciende se enriquecerá en etanol y en los componentes más volátiles, y el líquido, que desciende en contracorriente, saldrá enriquecido en los componentes más pesados que, finalmente, abandonan la columna por el fondo a una temperatura de 100 °C, dando lugar a la vinaza. Por la zona superior de la columna rectificadora se extrae el producto final (etanol) y en dependencia del tipo de alcohol deseado, será el plato por donde se realice la extracción (Gálvez, 2000; Rein, 2017).

Durante la destilación, se generará un líquido enriquecido en alcoholes pesados y otras impurezas orgánicas (acetato de etilo, acetaldehído y furfural, entre otras), que se producen también durante la fermentación. Esta mezcla, fundamentalmente de alcoholes isoamílico, isopropílico, n-propílico e isobutílico, llamada “aceite fusel”, se extrae en una zona intermedia de la columna, porque es en esa posición donde existe una concentración de etanol favorable (45 a 65 % v/v) para lograr su separación. El etanol hidratado puede almacenarse o enviarse a un tanque de deshidratación donde se agrega ciclohexano para producir etanol anhidro. Otra forma de producir etanol anhidro es a través de tamices moleculares que consumen menos energía (Rein, 2017; Santos *et al.*, 2020).

La obtención de subproductos de la producción de alcohol puede mejorar la rentabilidad global del proceso. Los principales son el dióxido de carbono que se obtiene con un alto grado de pureza y se emplea en la carbonatación de aguas, refrescos y cervezas, así como la levadura *Saccharomyces cerevisiae* de 40 a 45 % de proteína, rica en vitaminas y sales minerales, es un excelente producto para la fabricación de piensos y forrajes. Las vinazas generalmente se envían a los campos de caña para ser utilizadas como fertilizante (fertirrigación) debido a su alto contenido de potasio o pueden ser empleadas también en la producción de etanol y biogás (Gálvez, 2000).

1.1.3. Principales impactos ambientales de la agroindustria azucarera y producción de etanol

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, acordada por los estados miembros de las Naciones Unidas en 2015, es un compromiso global con una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental, para revertir los desafíos que enfrenta la humanidad. Para Cuba, la adopción de dicha agenda, es un compromiso del Estado y una prioridad nacional. El Marco de

cooperación de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible 2020-2024 constituye el instrumento más importante para la planificación e implementación de las actividades de desarrollo de las Naciones Unidas en cada país. El marco para nuestro país es la respuesta colectiva del sistema de las Naciones Unidas para apoyar la implementación de la Agenda 2030 expresada en sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, y se ha diseñado en línea con los ejes y sectores estratégicos definidos en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030. En ese sentido, dicho marco responde directamente a cuatro de los seis ejes del Plan Nacional: gobierno eficaz, transformaciones productivas, medio ambiente y gestión de riesgos de desastres y desarrollo humano con equidad (PCC, 2017).

En el mundo actual se ha alcanzado un elevado nivel en el desarrollo industrial, convirtiéndose en la principal forma de desarrollo, con determinado grado de deterioro del medio ambiente. El consumo indiscriminado de los recursos naturales y la emisión de contaminantes tanto al agua como al suelo y la atmósfera son los principales contribuyentes de la degradación medioambiental. Esto trae como resultado incalculables consecuencias sobre la salud humana, los ecosistemas y el mantenimiento de los recursos. En los últimos años se evidencia una toma de conciencia en relación con la creación de productos que contribuyan a un menor agotamiento de los recursos naturales, tanto en la extracción de materias primas, como en la emisión de contaminantes resultantes del proceso de fabricación, distribución y consumo, lo que demuestra que la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible son cuestiones que preocupan a la sociedad en su conjunto (Herrera, 2012; Moya, 2007).

La evaluación del desempeño ambiental del proceso de producción de azúcar crudo en las fábricas cubanas se enmarca en la cuantificación y caracterización de los efluentes líquidos, unido al consumo de agua e insumos, así como no se evalúa la influencia de los flujos de entrada y salida al proceso mediante categorías de impactos ambientales que representen su incidencia sobre los diferentes elementos del medio ambiente (Herrera, 2012; Rojas, 2009).

En la agricultura se emplean herbicidas para evitar la competencia entre las diferentes vegetaciones que emergen y la caña de azúcar; al mismo tiempo, se favorece el rendimiento del cultivo con la aplicación de fertilizantes. El empleo de estos insumos trae consigo la emisión al aire de óxidos de nitrógeno, óxido nitroso y amoníaco; así como la contaminación de los acuíferos por nitratos, fósforo y nitrógeno, derivada del uso de fertilizantes. Los herbicidas tienen la característica de acumularse por largos períodos de tiempo sin degradarse, contribuyendo a la ecotoxicidad del suelo y el agua. La práctica de una agricultura con la aplicación de productos orgánicos con iguales fines, disminuye la contaminación ambiental y es conocida como agricultura orgánica. La quema de la caña pre-cosecha por diferentes

causas, constituye una fuente de contaminación atmosférica por la emisión de metano, material particulado, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. En Cuba, esta práctica se ha reducido en los últimos años, quemándose de un 10 a un 12 % de la caña cosechada, con la correspondiente disminución de los procesos erosivos y el aumento de la materia orgánica en el suelo (Ramjeawon, 2008; Ramjeawon, 2004).

En las últimas décadas, el empleo de los residuos agrícolas cañeros, la cachaza de los filtros, el bagazo y las cenizas producidas en su combustión, con otros fines a partir de sus características reducen las emisiones del ciclo de vida del azúcar; por tanto, una adecuada gestión de los residuos contribuye a un desempeño ambiental superior del azúcar (Contreras et al., 2009).

La producción de energía con biomasa cañera contribuye a la carga ambiental asociada al azúcar de caña debido a las emisiones que produce, principalmente material particulado. Entre los factores más comunes que dan lugar a las partículas se destaca: la quema de bagazo fino, exceso de aire, tiempos largos de residencia de los gases de combustión en el horno, la ausencia de separadores de partículas, movimiento turbulento de los gases con respecto al bagazo que se está quemando y a las cenizas (Buddadee et al., 2008; Jafar et al., 2008; Quasem Al-Amin et al., 2009; Renouf, 2002). Las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno son menores en comparación a las emitidas cuando se utilizan combustibles fósiles debido a sus bajos niveles de azufre y nitrógeno. Se ha demostrado, que la combustión de la biomasa cañera, tiene efectos positivos o neutros en la emisión de carbono a la atmósfera pues se liberan menores o iguales cantidades que las captadas por la planta en su proceso vegetativo (en la fotosíntesis) (Ramjeawon, 2008; Renó et al., 2011; Rosas, 2017).

La agroindustria de la caña de azúcar y derivados en Cuba genera serios problemas de contaminación ambiental, que en los últimos años ubican a este sector como un importante foco contaminante y obligan a buscar soluciones alternativas para esta situación. Entre los principales elementos que contribuyen a la contaminación ambiental están las corrientes residuales en las diferentes etapas del ciclo de vida, el consumo de diferentes insumos y de combustibles fósiles tanto para las labores agrícolas como para suplir la demanda de energía en el procesamiento industrial (Chauhan et al., 2011; Martínez et al., 2010; T. L. T. Nguyen y J. E. J. A. e. Hermansen, 2012; Ramjeawon, 2008).

Hoy en día la calidad es todo lo concerniente a la satisfacción del cliente y cada vez es mayor el número de consumidores que tienen interés en el perfil ambiental de un producto. Es por ello que la industria azucarera está obligada a hacer eficientes sus procesos e instalar producciones alternativas; con el

objetivo de optimizar el aprovechamiento y la protección de recursos naturales, favoreciendo la competitividad en el mercado internacional (Ramjeawon, 2008).

Dentro de los residuos producidos en el proceso de producción del etanol encontramos, entre los más contaminantes debido a su carga contaminante (60 000 a 90 000 mg DQO/L), los vertidos procedentes del fondo de las torres de destilación; conocidas con el nombre de vinazas, las cuales son producidas en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol obtenido. Las descargas de estas al ambiente son peligrosas, debido a que su descarga en los cuerpos de agua natural puede resultar en eutrofización, lo que provoca un aumento gradual de la concentración de fósforo, nitrógeno y otros nutrientes en un ecosistema acuático (Araujo-Gonzalez, 2017; Bach, 2019).

1.1.4. Metodologías para evaluar impactos ambientales.

La gestión ambiental es un método que trata de ocuparse de las actividades que el ser humano realiza sobre el medio ambiente en el transcurso de una ocupación y conseguir un equilibrio entre ambos que trate de preservar y administrar los recursos finitos existentes. Las herramientas de gestión ambiental pueden pronosticar los impactos futuros (pronóstico), o bien diagnosticar realidades tangibles para comprobar los efectos ambientales (diagnóstico). Los pronósticos se aplican en la fase de planificación y anteproyecto y los diagnósticos precisan realidades tangibles mediante la realización de medidas analíticas para comprobar los efectos ambientales y se realizan en la etapa de explotación (Armenteros et al., 2018).

Entre dichos pronósticos encontramos el Estudio de Impacto Ambiental de los proyectos que evalúan básicamente la capacidad del territorio para admitir la actividad y la contaminación en el entorno y se implementa a través de las auditorías ambientales que no son más que evaluaciones objetivas, sistemáticas y documentadas que comprueban si la organización, la gestión y el equipo medioambiental están cumpliendo con el objetivo de salvaguardar el entorno (Singh y Tiwari, 2018).

Entre las herramientas cualitativas se destacan las listas de verificación y las matrices; entre las cuantitativas se encuentran el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y los Eco-indicadores. Otro criterio de clasificación incluye conceptos como Prevención de la Contaminación, Eco-balances, Eco-eficiencia, Eco-diseño, Herramientas Analíticas (ACV, Análisis Costo-Beneficio, Evaluación del Riesgo Ambiental), Herramientas Procedimentales (Auditoría Ambiental, Estudio de Impacto Ambiental, Sistemas de Manejo Ambiental) y Elementos Técnicos (Modelos de Dispersión de Contaminantes, Análisis de Sensibilidad) (Rojas, 2009; Sosa, 2019).

Las herramientas de análisis cualitativo son en su mayoría empleadas para reemplazar el análisis de los cálculos, típico de las herramientas cuantitativas. En este sentido el análisis cualitativo presenta algunas debilidades. Es evidente la necesidad de utilizar el potencial de las herramientas cualitativas como complemento de las herramientas cuantitativas en la medición de aspectos que estas no contemplan en lugar de querer reemplazarlas, puesto que las cuantitativas permiten realizar comparaciones objetivas de impacto entre diferentes sistemas, considerando todos los flujos de materia y energía consumidos y emitidos durante todo el ciclo de vida (Martín, 2019; Sosa, 2019).

Para evaluar el impacto ambiental se hace necesario calificar la generación de efectos ambientales indeseados a través de planes, programas y proyectos que ofrezcan una información detallada sobre el sistema de monitoreo y control para asegurar el cumplimiento de las medidas de mitigación. Se hace necesario entonces un proceso continuo y dinámico que permita determinar, predecir, interpretar, comunicar y vigilar los posibles efectos que un proyecto o actividad puede provocar sobre el medio ambiente y a partir de los mismos facilitar a los directivos la toma de decisiones respectivas (Moya *et al.*, 2013; Perez Gil *et al.*, 2013).

Según Amores (2018), se hace posible la propuesta de medidas que eliminen, aminoren o reduzcan algunos de los efectos negativos sobre el medio ambiente, contribuyendo así a regular la utilización racional de los recursos naturales. Para llevar a cabo el proceso de la evaluación del impacto ambiental, se han de tener presentes tres facetas:

- Modificación de las características del medio ambiente
- Modificación de los valores ambientales
- Modificación del ámbito de la salud y bienestar humano

Estas facetas actúan e interactúan de diferentes formas: aire, suelo, agua, vegetación, fauna, paisaje, clima, factores socio-culturales patrimoniales, ruido y otros, evidenciando daños sobre el ambiente.

1.2. El Análisis del ciclo de vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental.

La asociación internacional para la evaluación de impactos ambientales (IAIA en inglés) define la evaluación de impacto ambiental como "el proceso de identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos biofísicos, sociales del desarrollo propuesto antes de tomar cualquier tipo de decisión". Por lo tanto, es un conjunto de estudios técnicos ambientales que sigue un procedimiento determinado para evaluar las

alteraciones del medio ambiente y sus posibles efectos positivos o negativos sobre un producto, proceso o servicio (Albrecht et al., 2020; Mohammadi et al., 2020; Rowe, 2017b).

Con el objetivo de cuantificar la sostenibilidad de una tecnología y los posibles impactos asociados con los productos manufacturados, se han venido implementando varias herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Esta permite analizar la interacción entre la actividad humana y el medio ambiente (Chauhan *et al.*, 2011; Contreras *et al.*, 2009). La metodología del ACV integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida del producto y los relaciona con problemas ambientales específicos. Además, permite establecer prioridades para definir las estrategias preventivas de mejoramiento del desempeño ambiental (Basosi *et al.*, 2019; Maranghi y Brondi, 2020).

El Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es la etapa más exigente en el ACV, esta comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas (uso de recursos y materiales) y las salidas (productos, co-productos, emisiones al aire, agua y suelo) de un sistema de producción. Se requiere proyectar el diagrama de flujo del sistema para la cuantificación de todas las corrientes utilizando distintas fuentes de datos (bases de datos de ACV, reportes, artículos científicos, investigaciones en el lugar, conocimientos de expertos, etc.). Mediante los cálculos se puede detectar en qué fase del ciclo de vida del sistema objeto de estudio, se dan las mayores entradas, salidas e impactos ambientales (Cardoso *et al.*, 2019; Gunawan *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2020).

La parametrización del ICV facilita definir los parámetros necesarios para una especificación completa de un modelo u objeto geométrico, utilizando datos de varios tipos y posibilita construir modelos variando los parámetros. Además, permite comparar dos o más escenarios lo cual favorece los análisis en estudios de mercado y gestión de medidas de producción más limpia (P + L) (Martínez *et al.*, 2010).

Según la NC ISO 14 044: 2009, el Análisis del Ciclo de vida puede ayudar a:

La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida; la aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales, como por ejemplo para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos; la selección de los indicadores de desempeño ambientales pertinentes incluyendo técnicas de medición y el marketing, por ejemplo implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental del producto.

La NC ISO 14 040: 2009 define al Análisis del Ciclo de Vida como “la recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida” y al ciclo de vida como “las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de las materias primas o de su generación a partir de recursos naturales hasta su disposición final” (p. 2).

En un ACV completo se atribuyen a los productos todos los efectos ambientales derivados del consumo de materias primas y de energías necesarias para su manufactura, las emisiones y residuos generados en el proceso de producción, así como los efectos ambientales procedentes del fin de vida del producto cuando este se consume o no se puede utilizar. Por tanto, esta herramienta consiste en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan al producto los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida (Albrecht *et al.*, 2020; Anne Renouf *et al.*, 2011; Rowe, 2017a).

Entre las limitaciones del ACV se encuentran: subjetividad en la naturaleza de elecciones e hipótesis, la precisión puede estar limitada por la accesibilidad o disponibilidad de datos importantes, o por la calidad de los mismos. No es capaz de apuntar el carácter temporal o espacial de un determinado efecto, a causa de las carencias de detalles temporal y espacial en la base de datos (Cardoso *et al.*, 2019; Mohammadi *et al.*, 2020).

Los sectores empresarial e industrial reconocen ya la utilidad práctica del ACV como parte de los instrumentos de gestión para reducir el uso de materias primas, ahorrar energía, minimizar la contaminación y los residuos, disminuir problemas, conflictos y riesgos (incluyendo la responsabilidad civil y penal) y mejorar la imagen de la empresa en el mercado (Shaked *et al.*, 2015).

1.3. Fundamentos generales de la metodología del ACV.

A partir del empleo del ACV se pretende determinar las mejoras ambientales generadas gracias al proceso de reutilización. La fundamental normativa empleada para la realización del mismo es la planteada en las NC ISO 14 040: 2009 y NC ISO 14 044: 2009, cuya metodología establece una serie de principios fundamentales para la realización de un análisis de esta índole; las metodologías del ACV se basan en estándares desarrollados por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental y la Organización Internacional para la Normalización (ISO).

El ACV, según la NC ISO 14 044: 2009 trata los aspectos e impactos ambientales de un sistema del producto, los sociales y económicos generalmente quedan fuera de su alcance; presenta un enfoque

relativo que se estructura alrededor de una unidad funcional, la que define lo que se está estudiando; es una técnica iterativa, sus fases individuales utilizan los resultados de las otras fases, lo que contribuye a la integralidad y coherencia del estudio y resultados obtenidos; debido a su complejidad inherente, la transparencia es un principio guía a fin de asegurar una adecuada interpretación de los resultados; considera todos los atributos o aspectos del entorno natural, de la salud humana y de los recursos, al considerarse en un solo estudio de manera transversal todos los atributos y aspectos, se pueden identificar y evaluar las compensaciones potenciales; las decisiones tomadas en este análisis se basan preferentemente en las ciencias naturales, al no ser esto posible se pueden utilizar otros enfoques científicos o hacerse referencia a convenciones internacionales, de no existir estas las decisiones se pueden basar en juicios de valor (Calero de Hoces *et al.*, 2011).

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases (Anexo 1); la definición del objetivo y el alcance de este análisis incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio, la profundidad y amplitud puede diferir considerablemente dependiendo de su objetivo en particular; el análisis del inventario (fase ICV), es un inventario de los datos de entrada y salida en relación con el sistema bajo estudio, implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido; la evaluación del impacto (fase EICV), su objetivo es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental y la interpretación en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o de la EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos (Maranghi y Brondi, 2020; NC, 2009a).

La definición del objetivo y alcance y la interpretación del análisis del ciclo de vida constituyen el marco de referencia en el que se debe basar el inventario del ciclo de vida. El inventario del ciclo de vida cuantifica la cantidad de consumos y residuos y la evaluación del impacto del ciclo de vida evalúa dicho inventario junto con los impactos ambientales. Finalmente, la interpretación evalúa la evolución del impacto del ciclo de vida en función del objetivo y el alcance (Martínez, 2018; Mohammadi *et al.*, 2020).

La definición del objetivo y alcance, estructura el análisis del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio señalando las partes que van a ser claves en el proyecto, es decir, sus detalles más técnicos. Es el manual donde se indica cómo va a ser el ACV y que lo diferencia de los demás, donde se describen

detalladamente los procedimientos utilizados y cuáles son las razones para hacerlo. También se define la complejidad y profundidad que se quiere plantear (Hauschild *et al.*, 2018; Martínez, 2018).

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV), es la fase del ACV en la que se recopilan datos correspondientes a las entradas y salidas para los procesos del sistema de producto. 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 (Albrecht *et al.*, 2020; Maranghi y Brondi, 2020; Mohammadi *et al.*, 2020).

El análisis del inventario del ciclo de vida no es otra cosa que la compilación y la reunión de los datos necesarios para realizar el estudio, para así poder identificar y cuantificar las entradas o inputs y salidas u outputs al aire, suelo y agua de energía consumida, la difusión de emisiones y la generación de residuos. Este análisis debe basarse en la información que proporciona la definición del objetivo y alcance anteriormente definido. En caso de modificar alguna parte del objetivo o del alcance, hay que reflejarlo en el informe (Contreras *et al.*, 2009; Ramjeawon, 2008; Shaked *et al.*, 2015).

En la fase de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), los resultados del inventario son analizados para identificar y caracterizar los efectos potenciales que el sistema analizado tiene sobre el medio ambiente. Esta evaluación se desarrolla en diferentes etapas en las cuales los resultados del inventario se van reduciendo en cantidad y complejidad, haciendo más fácil su interpretación. Sin embargo, cada una de estas etapas van disminuyendo la objetividad inicial de los datos, pudiéndose llegar si se quiere a un único indicador que integra todos los impactos ambientales asociados al sistema (Gil *et al.*, 2013; Martín, 2019; Sosa, 2019).

Esta fase consta de elementos obligatorios como la selección de las categorías de impacto, indicadores de cada categoría, modelos de clasificación y caracterización, frente a otras que presentan un carácter opcional y que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y el alcance del ACV como la normalización, agrupación, ponderación y análisis de calidad de los datos. La EICV trata solamente los asuntos ambientales especificados en el objetivo y el alcance. Por lo tanto, no es una evaluación completa de todos los asuntos ambientales del sistema del producto bajo estudio y no siempre puede demostrar diferencias significativas entre las categorías de impacto y los resultados de sus indicadores correspondientes para diferentes alternativas de los sistemas del producto (Amores, 2018; Karka *et al.*, 2019; Martínez, 2018).

En la última etapa del ACV, conocida como interpretación, se explican los resultados obtenidos tanto en el inventario como en la evaluación de impactos y se extraen las recomendaciones dirigidas a la reducción de los impactos ambientales ocasionados por el sistema analizado. Con la interpretación y la evaluación se pretende expresar en un nivel de confianza aceptable los resultados finales, mediante una comunicación de los resultados obtenidos precisa y completa. Se define interpretar como "explicar o declarar el sentido de algo, y principalmente de un texto". Por lo tanto esta fase trata de procesar los datos mediante una estructuración ordenada que permita obtener una perspectiva general (Hauschild *et al.*, 2018; Martínez, 2018).

1.4. Modelación del Inventario de Ciclo de vida (ICV).

El análisis del inventario es una de las fases más dinámicas del ACV, con la obtención de bases de datos se realizan balances de flujos energéticos y de materiales que entran y salen del sistema a lo largo de toda su vida útil. En todos los flujos de materiales y energéticos entrantes y salientes identificados debe indicarse su origen o destino. Este puede ser la naturaleza o la tecnosfera (medio no natural construido por el hombre). Las entradas cuantificadas para cada subsistema incluirán el uso de energía y materias primas desde la naturaleza: materias primas (agua, arena) y combustibles crudos (carbón, gas natural) y desde la tecnosfera: materiales (vidrio, cartón), combustibles (propano, butano) y electricidad (Albrecht *et al.*, 2020; Gabisa *et al.*, 2019; Ramjeawon, 2004; Rowe, 2017b; Sharma *et al.*, 2020).

Los Análisis del Inventario del Ciclo de Vida coinciden con los ACV en las siguientes etapas: definición del objetivo(s) y el alcance del estudio, el análisis del inventario y la interpretación (NC ISO 14 044: 2009). En la segunda etapa se compilan los datos de las entradas y salidas a cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema, tomando como referencia la unidad funcional (Amezcuá-Allieri *et al.*, 2019; Caldeira-Pires *et al.*, 2018; Chauhan *et al.*, 2011; Contreras-Lisperguer *et al.*, 2018).

Los datos compilados se clasifican como Datos de Primer Plano (datos primarios) o Datos de Fondo (datos secundarios). Los datos primarios están referidos al sistema del producto, es decir, información real del proceso industrial, compañías gestoras de residuos y plantas de tratamiento. Los datos secundarios son recogidos utilizando bases de datos de ACV, reportes, artículos científicos, conocimientos de expertos, estadísticas, legislaciones o cualquier otra fuente científicamente validada (de Azevedo *et al.*, 2017; Farahani y Asoodar, 2017; García *et al.*, 2011).

En el ICV se cuantifican todas las entradas y salidas que se dan a lo largo del ciclo de vida del producto, proceso o servicio. El nivel de detalle que se alcance en el inventario depende de la disponibilidad de los datos y del grado de complejidad con que se obtengan, cuando no existen los datos se puede usar un “valor calculado” en función de datos reportados por procesos unitarios que usen una tecnología similar (Ding *et al.*, 2017; Farahani y Asoodar, 2017; T. Nguyen y J. Hermansen, 2012).

Los datos recopilados, según Herrera (2012), que se encuentran dentro del límite del sistema se pueden agrupar en las 4 categorías siguientes:

- Entradas desde la tecnosfera, referidas al consumo de materias primas, insumos y otras entradas físicas; además, se cuantifica el uso de fuentes de energía (eléctrica y/o calorífica) en caso que corresponda.
- Entradas desde la naturaleza, referidas al uso de recursos naturales como el agua, aire, suelo, energía solar, entre otros.
- Salidas a la tecnosfera, referidas a los productos, co-productos y productos evitados. El término “producto evitado” incluye la sustitución de un producto determinado por este, con lo que se evita su producción y todas las cargas asociadas a la misma.
- Emisiones: referidas a todas las corrientes contaminantes que se producen en el sistema en estudio y que son destinadas tanto al compartimiento aire como al agua y al suelo.

Los procedimientos utilizados para la compilación de datos varían con cada proceso unitario considerado en el estudio. La recogida de datos exige un conocimiento completo de cada proceso unitario. Esto implica una descripción cuantitativa y cualitativa de las entradas y salidas necesarias para determinar el inicio o el fin del proceso unitario, así como la función del proceso unitario (Albrecht *et al.*, 2020; Nishihara Hun *et al.*, 2017; Palma-Rojas *et al.*, 2017).

El inventario de ciclo de vida, como parte de un ACV global, puede usarse como ayuda a las empresas para que dispongan de una visión sistemática de los sistemas de producto interconectados, permite identificar los procesos unitarios pertenecientes al sistema del producto en los que se concentra la mayor cantidad de flujos energéticos, materia prima y emisiones, proporciona datos que se puedan emplear posteriormente para definir los criterios aplicables al etiquetado ecológico y fija alternativas relacionadas con la política de compras de la empresa (Ouchida *et al.*, 2019; Prasara-A *et al.*, 2019). Dentro de esta fase, la recogida de datos es la etapa más necesaria, ya que es la base para el desarrollo de las fases sucesivas dentro de la metodología del ACV, además, los datos permiten la obtención de

corrientes necesarias calculadas mediante los balances de masa y energía (Cavalett *et al.*, 2011; Chauhan *et al.*, 2011; Khatiwada y Silveira, 2011; Renó *et al.*, 2011).

Para el éxito de esta actividad se deben realizar las siguientes acciones (Maranghi y Brondi, 2020; Mohammadi *et al.*, 2020):

- Describir detalladamente cada operación unitaria e identificar los parámetros del inventario correspondientes a cada una.
- Elaborar el diagrama de flujo del sistema en estudio incluyendo todos los procesos unitarios y sus interrelaciones.
- Describir las técnicas de recopilación de datos y de cálculo necesarias.
- Cuantificar los flujos del ICV (entradas/salidas) mediante los balances de masa y energía, identificándose la unidad de medida en que se expresan.
- Especificar y explicar coherentemente las suposiciones realizadas. Es importante que los valores compilados cumplan con los indicadores de calidad de los datos (DQIs, por sus siglas en inglés), necesarios para una interpretación adecuada de los resultados del AICV y la credibilidad del estudio.

Diferentes autores (Moya *et al.*, 2013; T. Nguyen y J. Hermansen, 2012; Perez Gil *et al.*, 2013; Shaked *et al.*, 2015), coinciden en que los DQIs a considerarse en la compilación de los datos para el ICV de un sistema en estudio son:

- Fiabilidad, conocer la medida de la variabilidad de los valores de los datos, análisis de la incertidumbre de la información recogida. Para estudios de ACV simplificados o revisiones se pueden usar datos obtenidos de diferentes fuentes. Para ACV que requieran mayor detalle se recomienda recolectar datos de balances de masa y energía. Se debe especificar el porcentaje del flujo que se ha medido o estimado.
- Representatividad, evaluación cualitativa del grado en el cual la información refleja la situación real, es decir, la cobertura geográfica, período de tiempo en que se han recogido los datos y la cobertura tecnológica de estos.
- Correlación Temporal, tiempo transcurrido desde que se recoge la información hasta su publicación (vigencia de los datos).

- Correlación Geográfica, los datos deben pertenecer a la instalación objeto de estudio, casos generales del país o a procesos similares.
- Correlación Tecnológica: es importante especificar la tecnología correspondiente a cada proceso unitario o si responden a condiciones similares o diferentes de operación.

Finalmente, la etapa de interpretación, comprende la evaluación de la metodología empleada para la modelación del ICV, con el objetivo de fortalecer la confianza y fiabilidad en los resultados del estudio. La evaluación se realiza de acuerdo al objetivo(s) y el alcance definido; incluye las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia (Khatiwada y Silveira, 2011; Renó *et al.*, 2011).

En la verificación del análisis de integridad se comprueba que la información y los datos necesarios para la interpretación están disponibles y completos (NC ISO 14 040: 2009; NC ISO 14 044: 2009). El objetivo de la verificación del análisis de sensibilidad es evaluar la confiabilidad del estudio y la importancia de las conclusiones finales; determinando cómo influyen en los resultados la incertidumbre en los datos, los métodos de asignación de cargas ambientales y de cálculo. Se recomienda aplicar los mismos procedimientos de cálculo a lo largo de todo el estudio. Los resultados se pueden comprobar mediante su contraste con otras fuentes, muestreos, comparación teórica con los resultados de los balances de masa y energía o procesos similares (Anne Renouf *et al.*, 2011; Cavalett *et al.*, 2011; Chauhan *et al.*, 2011).

1.4.1. Inventario del ciclo de vida del azúcar de caña.

La definición del objetivo y el alcance de un estudio proporcionan el plan inicial para realizar la fase del inventario del ciclo de vida de un ACV. Cuando se ejecuta el plan para el análisis del inventario del ciclo de vida, se deberían realizar los pasos que se describen en la figura 1.2.

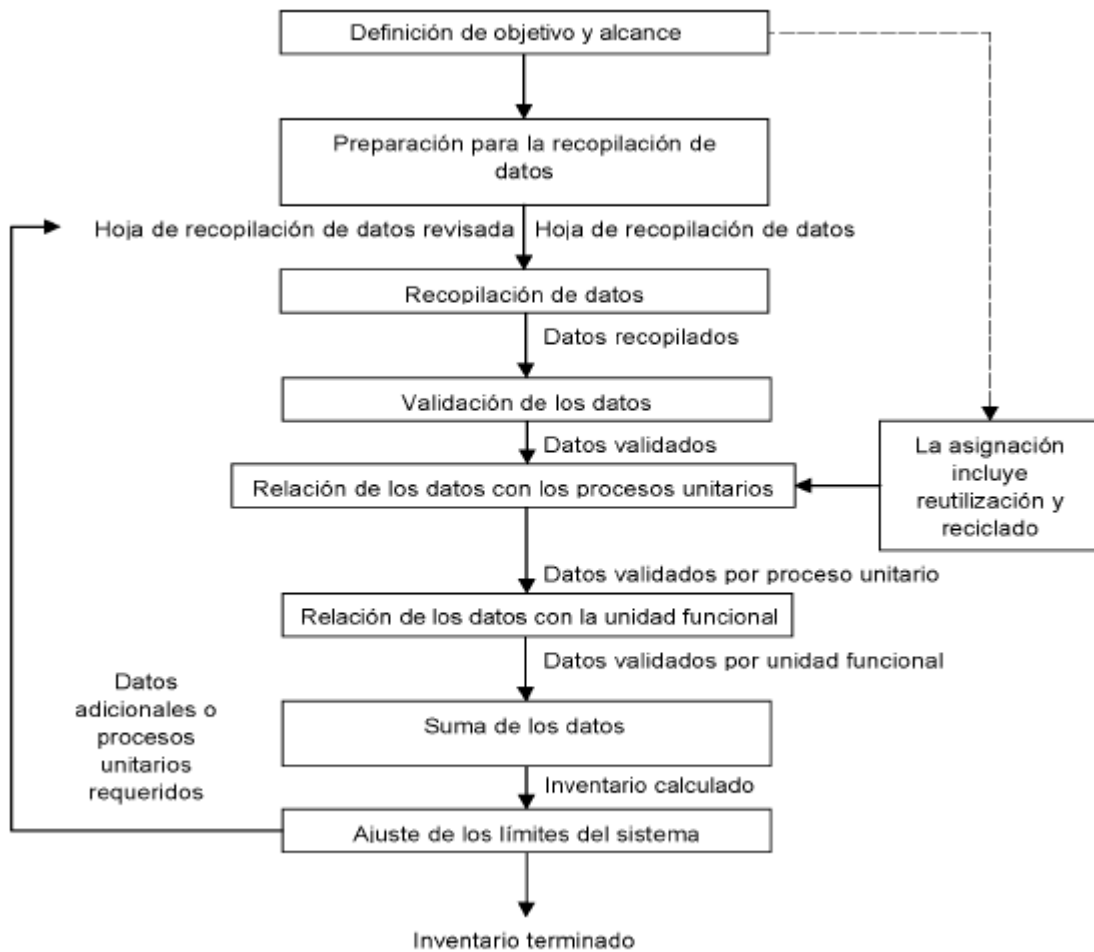


Figura 1.2. Procedimiento simplificado para el Análisis del Inventario. Fuente: NC ISO 14 044: 2009.

Existen diferentes estudios de evaluación ambiental enfocados al azúcar de caña como producto o al proceso de producción del mismo mediante el ACV, donde no se desarrollan o detallan aspectos importantes del ICV, constituyendo una limitante en dichas investigaciones. Ramjeawon (2004), evalúa los impactos ambientales asociados al ciclo de vida del azúcar crudo de caña producido en la Isla Mauricio; presentando datos generales del proceso sin especificar aspectos relacionados con los DQIs, lo que limita el uso de los resultados del estudio por otros usuarios como referencia para comparación o aplicarlos en estudios análogos. Características similares tiene el análisis del proceso de azúcar en Australia presentado por Ramjeawon (2008), donde se emplean datos de fondo para cuantificar las entradas y salidas a los límites del sistema, principalmente factores de rendimiento y emisiones, referidos a la unidad funcional. En el ICV del subsistema industrial solo se cuantifican los flujos elementales vinculados directamente al proceso fabril, excluyendo productos de limpieza y para el tratamiento del agua para proceso, los cuales contribuyen al desempeño ambiental del azúcar de caña

(Jafar *et al.*, 2008). Chauhan *et al.* (2011), realizan una compilación de investigaciones relacionadas al ACV en la industria azucarera donde se manifiesta una tendencia a usar datos de fondo para el ICV del producto.

Los estudios reportados en Cuba por Contreras *et al.* (2009), presentan igual limitante al emplear datos generales referenciados en la literatura, de diferentes industrias sin tener en consideración las variantes tecnológicas agroindustriales instaladas, vigencia de la información, no se analiza e interpreta la incertidumbre en la información presentada.

La tendencia actual es a modelar los ICV en función de parámetros que permitan su empleo en la comparación de productos, procesos o servicios; así como en la selección de materias primas teniendo en cuenta el perfil ambiental de estas. Puede utilizarse como herramienta de decisión en las empresas para mejorar la calidad y eficiencia de sus producciones (Martín, 2019).

1.4.2. Parametrización del Inventario del Ciclo de Vida.

La parametrización es el proceso donde se definen los parámetros necesarios para una especificación completa de un modelo u objeto geométrico. Este involucra la identificación de un juego completo de coordenadas o grados de libertad del sistema (Herrera, 2012). Desde el punto de vista del lenguaje, es la propiedad de un módulo para utilizar datos de varios tipos. Es un mecanismo muy útil porque permite aplicar el mismo algoritmo a tipos de datos diferentes (Martínez *et al.*, 2010).

Se pueden usar parámetros en procesos y etapas de productos. Esto permite construir un Análisis de Ciclo de Vida parametrizados y compararlos, realizar análisis de sensibilidad, análisis de incertidumbre, rehusar procesos y construir modelos complejos que pueden ser fácilmente mantenidos. Permite documentar el modelo y que otros usuarios puedan ver cómo los cálculos fueron hechos y de dónde proceden los números (Renó *et al.*, 2011).

En las simulaciones climáticas, este término se refiere a las técnicas de representación de los procesos que no pueden ser resueltos de forma explícita en la resolución espacial o temporal de la simulación (procesos de escala de subred), mediante las relaciones entre los efectos de las medias temporales o espaciales de dichos procesos de escala de subred y el flujo a una mayor escala (Rosas, 2017).

En los modelos paramétricos del ICV se clasifica la información como Parámetros de Entrada o Parámetros Calculados. Los primeros tienen un valor independiente y están referidos tanto a los datos de primer plano como a los de fondo. Los segundos son modelos matemáticos que permiten cuantificar los flujos elementales, intermedios y de productos, relacionados con los procesos unitarios del sistema

en estudio. Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, los modelos más usados son los fenomenológicos y sus principios de formulación son las ecuaciones de conservación (principalmente de masa y energía); todo modelo posee estructura y parámetros (Meza-Palacios *et al.*, 2019; Sosa, 2019).

A nivel mundial, se reportan varios estudios de la implementación de ICV parametrizados en diferentes sectores industriales, demostrándose la factibilidad de la práctica, no siendo común para los procesos azucareros. T. Nguyen y J. Hermansen (2012), presentan una revisión de los métodos de parametrización empleados en los conjuntos de datos de los procesos unitarios modelados en el formato de documentación de datos del Sistema Europeo de Referencia de Datos del Ciclo de Vida; destacando el uso de la parametrización para garantizar la transparencia, la facilidad de uso y la transferencia de los datos del ICV.

En las investigaciones es fundamental la necesidad de parametrizar los ICV de productos, producciones o servicios para facilitar la evaluación del desempeño ambiental de diferentes escenarios, minimizar los parámetros de entrada y extender la cuantificación de los flujos del inventario a parámetros calculados que flexibilizan el análisis en función de cambios en las variables operacionales, de diseño y propiedades físicas. También, permite analizar la influencia de los parámetros del ICV en las categorías de impactos ambientales más significativas. Se evidencia la necesidad de validar los modelos para comprobar la factibilidad de su empleo con diferentes objetivos.

En la agroindustria de la caña de azúcar se destacan las investigaciones, en la modelación del ICV en función de parámetros para el azúcar crudo en Cuba, utilizando los balances de masa y energía para cuantificar los flujos de entrada y salida al sistema, así como entre procesos unitarios (Anne Renouf *et al.*, 2011; Calero de Hoces *et al.*, 2011; Chauhan *et al.*, 2011; Sosa, 2019). En estos estudios se demuestra la factibilidad del uso de ICV paramétricos para comparar escenarios y analizar la influencia de los parámetros (referidos a variables operacionales y características de los flujos) en el perfil ambiental del sistema analizado. Por ejemplo, se evidencia que la cantidad de caña molida y su composición en fibra, inciden en los parámetros calculados bagazo combustible y en las emisiones asociadas a su combustión.

Las principales debilidades de estos estudios radican en no considerar las variantes tecnológicas instaladas en Cuba; los datos empleados generalmente son de fondo sin evaluar la incertidumbre en los valores; no se modela el inventario considerando las opciones más tratadas para la valorización de los co-productos y residuos del proceso. La tendencia es a emplear las propiedades físicas y

termodinámicas de los flujos como parámetros de entrada, limitando el ICV a condiciones específicas de operación y características de los flujos. Independientemente, de que se empleen ICV paramétricos y se garanticen los requisitos de calidad de los datos, es importante en estudios de ACV o AICV, evaluar la incertidumbre asociada a la información recogida (Cavalett *et al.*, 2012; Nishihara Hun *et al.*, 2017; Valverde, 2012).

1.4.3. Análisis de incertidumbre del ICV.

En el proceso de Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida, se llevan a cabo una serie de técnicas específicas para su análisis adicional y así medir la calidad del mismo. Entre esas técnicas se encuentra el análisis de la incertidumbre que es un procedimiento para determinar la manera en que las incertidumbres en los datos y las suposiciones evolucionan en los cálculos, y de qué modo afectan a la confiabilidad de los resultados de la EICV (NC-ISO 14 044: 2009).

El ACV se utiliza a menudo para comparar diferentes opciones en un sistema, que tiene una gran importancia si los resultados obtenidos son fiables y precisos para una correcta evaluación. Así, el análisis de la incertidumbre debe llevarse a cabo para definir el nivel de precisión de una evaluación. La evaluación del ciclo de vida tradicional no realiza el análisis de incertidumbre cuantitativo. Sin embargo, la mayor parte de los autores señalan que sin la caracterización de la incertidumbre asociada, la fiabilidad de los resultados de la evaluación no puede ser entendida o detectada (Linares, 2017; Ouchida *et al.*, 2019; Rathnayake *et al.*, 2018).

Diferentes autores ponen de manifiesto que la existencia de incertidumbres se menciona a menudo como una limitación fundamental para una interpretación clara de los resultados del ACV, y debido a este problema, poco a poco el análisis de incertidumbre está ganando importancia en la realización de ACV, pero su uso no es una práctica común (Buddadee *et al.*, 2008; Ramjeawon, 2008; Ramjeawon, 2004).

Varios escritores (Caldeira-Pires *et al.*, 2018; Moya *et al.*, 2013; Shaked *et al.*, 2015), coinciden en que la incertidumbre de los inventarios pueden ocasionarse por:

- Incertidumbres que resultan de las definiciones: debidas a la falta de exhaustividad e incorrecta interrelación entre los flujos y los procesos unitarios.
- Incertidumbres asociadas a los datos del inventario: provocadas por errores humanos al medir, registrar o transmitir información; errores aleatorios a partir de eventos naturales; inexactitud en

los valores de las normas de medición, material de referencia, valores de constantes y otros parámetros obtenidos en diferentes bases de datos; diferencias tecnológicas existentes en tiempo real en el área geográfica; aproximaciones e hipótesis incluidas en el método de medición y en el procedimiento de estimación. Conjuntamente con las generadas por la variabilidad natural del proceso.

- Incertidumbres en la metodología utilizada para realizar el inventario: todo lo relacionado con los métodos, modelos y suposiciones usadas para complementar el ICV.

En cualquier caso, la incertidumbre se puede reducir, pero nunca eliminar. Siempre que sea posible, debe definirse adecuadamente el sistema a estudiar, seguirse el mismo procedimiento para compilar los datos, aplicarse igual método de estimación de incertidumbre; así como emplearse los mismos modelos para cuantificar los flujos de los procesos unitarios. El ICV se debe validar comparando los resultados con otras fuentes de información, modelos similares o con nuevas mediciones, demostrándose que no existen diferencias significativas entre la información obtenida aplicando los ICV parametrizados y la reportada por la industria en tiempo real (Martín, 2019; Sosa, 2019).

Existen diferentes métodos para la estimación de incertidumbre los cuales se agrupan en: métodos analíticos, de aproximación y numéricos. Dentro de estos métodos se encuentran según, Rosas (2017):

- Simulación de Monte Carlo, este es el más popular en ACV. Algunas plataformas de software de ACV, como SimaPro, Umberto y OpenLCA, ofrecen la posibilidad de calcular la incertidumbre con el análisis de Monte Carlo. La base de datos de LCA de Ecoinvent incluye los valores de incertidumbres cuantitativas para los parámetros en muchos de sus procesos.
- Métodos de análisis aproximado, estos se utilizan cuando los resultados analíticos están disponibles en determinadas circunstancias, como una relación lineal entre las variables de entrada y de salida (que se puede aproximar para cualquier problema con las ampliaciones de la serie de Taylor, en el método de primer orden y segundo momento). Este enfoque es menos costoso computacionalmente que el análisis de Monte Carlo, que puede ser una ventaja si alguna parte del modelo requiere modelados numéricos complejos (Ramjeawon, 2008; Ramjeawon, 2004). En general los métodos de análisis aproximado utilizan matemáticas un poco más complejas que el Monte Carlo.
- Análisis de sensibilidad, para el cálculo de sensibilidad se deben variar sistemáticamente parámetros de entrada, para determinar la sensibilidad de las salidas a cada entrada. Esto no es un

procedimiento de análisis de incertidumbre completo, pero es útil para la comprensión de un sistema, ya que ayuda al analista a omitir el tratamiento de los parámetros de entrada que no tienen importancia para los resultados finales.

1.5. Métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.

Para la realización de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, primero se deben definir qué categorías de impacto se van a considerar, para posteriormente, evaluar la importancia de los potenciales impactos ambientales utilizando los resultados obtenidos en el Inventario del Ciclo de Vida. En esta fase hay cierta subjetividad en la elección, modelación y evaluación de categorías de impacto, puesto que no todas las categorías están consensuadas (Cavalett et al., 2012; Shaked et al., 2015).

En el mundo y en especial en Europa, se han desarrollado diferentes métodos de evaluación de impacto basados en eco-indicadores que miden cuantitativamente el impacto ambiental para diferentes productos, respaldados por bases de datos como la de la Oficina Federal Suiza del Medio Ambiente, Bosques y Paisajes [Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)], Ecoinvent y otras (Moreno *et al.*, 2016; Rosas, 2017; Rowe, 2017a).

Las diferentes metodologías de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (Martín, 2019; Perez Gil *et al.*, 2013; Sosa, 2019), se pueden agrupar en los siguientes dos grandes conjuntos en función de su objetivo final:

- Metodologías “midpoints” o de impactos de efecto intermedio: metodologías que tienen como resultado la definición de un perfil ambiental, mediante la cuantificación del efecto ambiental sobre diversas categorías (acidificación, destrucción capa de ozono, etc.) del producto, proceso o servicio analizado. Estas alcanzan solo la evaluación de los efectos indirectos o intermedios sobre el ser humano. El análisis a nivel de punto intermedio garantiza mayor robustez en los resultados al emplearse los factores de normalización y caracterización hasta los problemas ambientales; si estos se agrupan en categorías de daños, nuevos factores son empleados y aumenta la incertidumbre en los resultados (Karka *et al.*, 2019).
- Metodologías “endpoints” o de impactos de efecto final: metodologías que analizan el efecto último de impacto ambiental, esto es, tratan de identificar y definir el daño causado al hombre y a los sistemas naturales. Las categorías de impacto final son variables que afectan directamente a la sociedad. La evaluación a punto final, facilita la interpretación de los resultados visualizando la contribución del inventario sobre los elementos del medio ambiente y es empleada para

evaluaciones rápidas y comparaciones. La elección de una u otra versión del método depende de los objetivos del estudio (Karka *et al.*, 2019).

Las metodologías de evaluación de impacto para la Evaluación del Ciclo de Vida según Martínez (2018), pueden fundamentarse en cualquiera de los siguientes principios:

- EPS (Environmental Priority Strategies): metodología basada en el modelado de punto final, que expresa los resultados en valores monetarios.
- Swiss Ecotoxicity (or Ecopoints): el método de la escasez ambiental o método suizo de ecopuntos, que permite una ponderación comparativa y la agregación de las diversas intervenciones ambientales mediante el uso de eco-factores.

A partir de 1999 se desarrollaron dos líneas metodológicas para la realización de la EICV (Maranghi y Brondi, 2020):

- Análisis de impacto clásico como los métodos CML y EDIP. En este tipo de análisis el indicador para cada categoría de impacto es el resultado inmediato de clasificar las cargas ambientales en categorías de impacto y caracterizarlas mediante una sustancia de referencia.
- Método de análisis de daño o efecto como los métodos Eco-Indicator 99 y EPS. Este tipo de método clasifica los resultados obtenidos en la caracterización en daños o efectos como las afecciones a la salud humana, al ecosistema, agotamiento de recursos. Entre los métodos que evalúan el impacto final, el trabajo más elaborado hoy en día es este.

Los métodos de evaluación de impactos comprendidos en el SimaPro están en correspondencia con la serie de normas NC ISO 14 040: 2009 (incluyen: caracterización, evaluación del daño, normalización, ponderación y puntuación única). Por lo general, asignan el inventario de entradas y salidas a indicadores de impactos ambientales potenciales al medio ambiente. Actualmente, se ha fomentado el uso del método ReCiPe 2016 por las ventajas que presenta en comparación con los que lo precedieron (Eco-indicador 99, referido a nivel de punto final y CML 2 Baseline 2000, referido a nivel de punto intermedio). En este se modelan los indicadores orientados a los problemas ambientales y a los daños mediante dos acercamientos: uno a nivel de punto intermedio (Midpoint) incluyendo 18 categorías de impactos y otro de punto final (Endpoint), que contiene tres categorías de daños (a la salud humana, a la diversidad de los ecosistemas y a la disponibilidad de los recursos).

ReCiPe 2016 presenta ventajas en su modelación en comparación con otros métodos, pues evalúa independientemente los procesos de ecotoxicidad para los diferentes cuerpos de agua (dulce y marina) y para el suelo; así como la eutrofización marina y en el agua dulce; calcula directamente los efectos causados por la emisión de material particulado; cuantifica la disminución del agua, aspecto que debe ser controlado en la industria de procesos altamente consumidora de este recurso; desglosa el impacto sobre el suelo según niveles de actividad y función (transformación u ocupación del suelo para actividades agrícolas o urbanas). Además, permite evaluar la influencia de los flujos del ICV en la categoría de cambio climático relacionada con la salud de las personas y con los ecosistemas, por separado. Con los aspectos abordados en la modelación de las categorías del ReCiPe 2016 se solucionan algunas de las limitaciones que se presentaban en estudios de ACV anteriores al emplearse métodos que incluían categorías de impactos generales y que no evaluaban los efectos causados por el consumo de agua dulce (Moreno *et al.*, 2016; Rosas, 2017).

En la EICV de procesos que contemplen la emisión de partículas en cualquier fase de su ciclo de vida (extracción, producción, cogeneración de energía a partir de biomasa y tratamiento de residuos), la aplicación del Eco-Speed se ve limitada al no presentar una categoría específica para la emisión de material particulado. La selección de los métodos de evaluación de impacto ambiental y la base de datos a emplear son factores esenciales para lograr una evaluación ambiental lo más objetiva y precisa posible del sistema en análisis (Martín, 2019; Sosa, 2019).

1.6. Herramientas informáticas comerciales utilizadas para el ACV.

Basados en la metodología del ACV se han desarrollado numerosos programas para facilitar su cálculo como los que se relacionan en la tabla 1 (Anexo 4). La mayoría de estos programas incluyen bases de datos que pueden variar en extensión y calidad de dichos datos. En ellos se introducen los datos que configuran el inventario para posteriormente realizar los cálculos propios de la fase de la Evaluación de Impacto, obteniéndose los resultados para las diferentes categorías de impacto elegidas. Algunos de estos programas realizan análisis de sensibilidad e incertidumbre. Entre las herramientas informáticas que soportan el procedimiento del ACV, se destacan: el Eco-it, el Boustead, GaBi 4 y el SimaPro (Rosas, 2017).

Las herramientas informáticas poseen distintas necesidades de hardware y software. La mayoría de estas disponen de una base de datos muy completa que incluye datos de estudios realizados o de asociaciones industriales, pero para utilizarlos se debería que tener en cuenta la cantidad, la calidad, así

como la procedencia de los mismos, pues el uso de datos sin la debida precaución desencadena un gran número de situaciones de incertidumbre en un estudio de ACV. Si bien Latinoamérica no tiene los avances de algunos países desarrollados en materia de la informatización, se ha fomentado la creación de software y bases de datos en países como México, Chile, Colombia, Argentina, Brasil y Cuba (Moreno *et al.*, 2016).

De entre las herramientas nombras, una de las más utilizadas en el mundo del análisis de ciclo de vida es el software SimaPro. Este software es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRÉ Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida, mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM). Ofrece una herramienta para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del rendimiento ambiental de sus productos y/o servicios (Martínez, 2018; Rosas, 2017; Rowe, 2017a; Sosa, 2019).

Los servicios que ofrece son, según Rosas (2017):

- Facilidad para modelar procesos, con guías de ayuda para el usuario.
- Posibilidad de crear ICV parametrizados y compararlos.
- Conexión directa con Excel y bases de datos.
- Posibilidad de realizar análisis de impactos por cada fase del modelo.
- Análisis de incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo y la Matriz de Pedigree.
- Interfaz gráfica para la visualización de resultados.
- Análisis de los puntos débiles.
- Análisis complejos para el tratamiento y reciclaje de residuos.
- Asignación de cargas ambientales en los procesos.
- Permite el cálculo de la huella de carbono, hídrica y ecológica.

La base de datos del SimaPro está integrada por bases propias y bibliográficas, destacándolo como uno de los softwares de ACV que más variedad de procesos presenta. Unido al programa Umberto, son los únicos que integran completamente la base de datos Ecoinvent, considerada la más completa actualmente en el mercado internacional para ICV. La base de datos Ecoinvent, desarrollada por el Centro Suizo para Inventarios del Ciclo de Vida, constituye una complementación de las bases de datos BUWAL y ESU-ETH. Contiene aproximadamente 4 100 conjuntos de datos de ICV que cubren varios sectores económicos, como: energía, materiales, agricultura, sistemas de transporte, industria alimentaria, gestión de residuos y tratamiento de agua para consumo. Los datos están disponibles en el formato de documentación de datos EcoSpold, totalmente documentados con su fuente, con

descripciones cualitativas, siendo consistentes, transparentes y de calidad. La incertidumbre comprendida en los datos de los procesos unitarios es calculada usando el método de Monte Carlo y la Matriz de Pedigree (Martín, 2019; Moreno *et al.*, 2016; Sosa, 2019).

Partiendo que una base de datos de Inventario del Ciclo de Vida es una colección organizada de conjuntos de datos de ICV que cumplen con el sistema de criterios establecidos por los estándares NC ISO 14 040 y 14 044, estas responden a regiones específicas, siendo su debilidad principal la no representatividad de las condiciones objetivas de procesos que se desarrollen para áreas geográficas diferentes. Por tanto, es necesario desarrollar los inventarios de los procesos de cada país para crear sus propias bases de datos y aumentar la credibilidad de los ACV de sus escenarios de producción.

1.7. Antecedentes del ACV en la agroindustria azucarera y la producción de etanol

El concepto de “ciclo de vida” del producto fue utilizado por primera vez por Theodore Levitt en 1965 en un artículo de la revista Harvard Business Review “Exploit the Product Life Cycle”. Definiéndolo, desde un enfoque económico, como un proceso cronológico que transcurre desde el lanzamiento del producto al mercado hasta su desaparición. Mientras que, desde el punto vista ambiental, las mayores preocupaciones se concentran en los impactos ocasionados sobre el ecosistema natural. Por este motivo, surgió la herramienta de “análisis de ciclo de vida”. El primer estudio se realizó en el año 1969 por Midwest Research Institute para la empresa Coca Cola. En ese momento se conocía como “análisis de perfil de recursos y medioambientales” (REPA). Este documento tenía como objetivo reducir el consumo de recursos y la cantidad de emisiones al medio ambiente. Posteriormente aparecieron más estudios de este tipo, con la introducción de cálculos de energías y el balance de entradas y salidas (Albrecht *et al.*, 2020; Maranghi y Brondi, 2020; Mohammadi *et al.*, 2020).

Ramjeawon (2004) demuestra que el ACV es una herramienta útil para evaluar el impacto ambiental de la producción de azúcar de caña y decidir opciones de mejora del desempeño ambiental de esta industria, evaluando siete categorías de impacto, para las cuales, el cultivo y cosecha de la caña aportan el mayor impacto ambiental.

De ahí que, según Pérez (2014) el ACV es una técnica relativamente nueva, tiene los primeros desarrollos metodológicos en los años 60, pero ha tomado mayor auge a partir de los años 90. Se basa en una estructura donde el impacto ambiental del producto lo determina la sumatoria entre todos los impactos a lo largo de su ciclo de vida. Su importancia está dada porque desarrolla los impactos con los problemas ambientales y permite establecer prioridades para definir estrategias preventivas para el

mejoramiento del desempeño ambiental. Además, asiente que antes de iniciar un problema de mejora ambiental, se tenga toda la información para poder cuantificar la magnitud de los problemas y definir las soluciones con mayor seguridad. Por otra parte, evita desplazar los problemas de una etapa del ciclo de vida a otra o de un medio a otro y favorece la adopción de patrones de consumo y de producción sostenibles, por lo que es una de las herramientas de gestión ambiental a las que se les predice una mayor expansión futura (Albrecht *et al.*, 2020; Hauschild *et al.*, 2018; Mohammadi *et al.*, 2020).

Otro de los autores que realiza estudios de ACV es Herrera (2012) donde aborda el tema sobre la producción de combustibles a partir de recursos renovable donde un ACV se llevó a cabo para evaluar la producción de etanol a partir de bagazo de caña de azúcar como carburante. Los resultados muestran que, en el caso del cambio climático, el etanol a partir de bagazo de caña, presenta ahorros cercanos al 46 % con respecto a los combustibles fósiles. También resulta que el etanol lignocelulósico presenta un mejor comportamiento ambiental que la gasolina.

Según investigaciones realizadas por Díaz (2014) trata sobre el Análisis del Ciclo de Vida y exergético de la obtención de Etanol a partir del bagazo de la caña. Para ello, realizó la modelación del inventario del ciclo de vida del proceso que utiliza el método Organosolv como pre tratamiento, lo cual permitió evaluar los impactos ambientales asociados al proceso en diferentes escenarios de operación y se detectaron las variables operacionales que mayor incidencia tienen sobre cada una de las categorías de impacto que se analizan.

1.8. Conclusiones parciales

Al finalizar el presente capítulo, se pueden arribar a las siguientes conclusiones parciales:

- 1- El proceso de producción de azúcar crudo consta de siete etapas bien definidas: etapa de manipulación y preparación de la caña de azúcar, extracción, purificación, concentración, cristalización, centrifugación donde se obtiene el grano de azúcar y por último el almacenamiento.
- 2- La producción de alcohol etílico incluye cuatro etapas fundamentales: acondicionamiento de las materias primas, conversión de los carbohidratos en azúcares simples o asimilables por la levadura, la fermentación alcohólica de estos azúcares y la separación del etanol y otros subproductos por destilación.
- 3- Entre los principales impactos ambientales del proceso de obtención de azúcar crudo, se encuentra las emisiones de material particulado debido a la producción de energía con biomasa

cañera, y dentro de los residuos producidos en el proceso de producción del etanol se encuentra el vertimiento de vinazas.

- 4- Entre las herramientas cuantitativas para evaluar el impacto ambiental se encuentra la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, siendo esta la más usada por los investigadores puesto que permite integrar todos los impactos ambientales que ocurren a lo largo del ciclo de vida del producto y los relaciona con problemas ambientales específicos.
- 5- Los estudios de ACV se componen de cuatro fases: la definición del objetivo y el alcance del estudio, el análisis del inventario de ciclo de vida, la evaluación del impacto del ciclo de vida, y la interpretación en la cual se resumen y discuten los resultados del estudio.
- 6- Para los estudios de ACV en la agroindustria azucarera la forma más usada para desarrollar la metodología es siguiendo las orientaciones de las normas de la serie ISO 14040, utilizando el software SimaPro 8.0, la base de datos Ecoinvent 3 y el método ReCiPe 2016.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de los aspectos de la NC ISO 14 044: 2009, en el siguiente capítulo se desarrolla una propuesta de metodología para el Análisis del Ciclo de Vida en alternativas de uso de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol.

La metodología de ACV que se aplica, se basa en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14 000. Para el desarrollo de la misma se emplean los resultados obtenidos en años anteriores por distintos autores. El modelo de impacto del ciclo de vida a utilizar es el denominado ReCiPe 2016 cuyos datos están actualizados con el conocimiento científico actual y comprende de 10 a 20 categorías de impacto ambiental, en este caso específico comprende 18 categorías. El procedimiento utiliza el software SimaPro versión 8.0 que constituye una herramienta poderosa con diferentes bases de datos de inventario propias y bibliográficas.

El desarrollo de la metodología propuesta tiene como base las cuatro fases del ACV:

- Fase 1: Definición de objetivos y alcance del estudio.
- Fase 2: Análisis del Inventario del Ciclo de Vida.
- Fase 3: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.
- Fase 4: Interpretación de los resultados obtenidos.

Se toma como caso de estudio la Empresa Azucarera Jesús Rabí, formada por el Central Azucarero Jesús Rabí y la Destilería con el mismo nombre; se diseñaron 2 alternativas para la valorización de los subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol y así favorecer la gestión de los mismos, con la finalidad de minimizar la generación emisiones contaminantes al medio ambiente. En la figura 2.1, se muestra el diagrama para la metodología de ACV en la agroindustria azucarera y la producción de etanol.

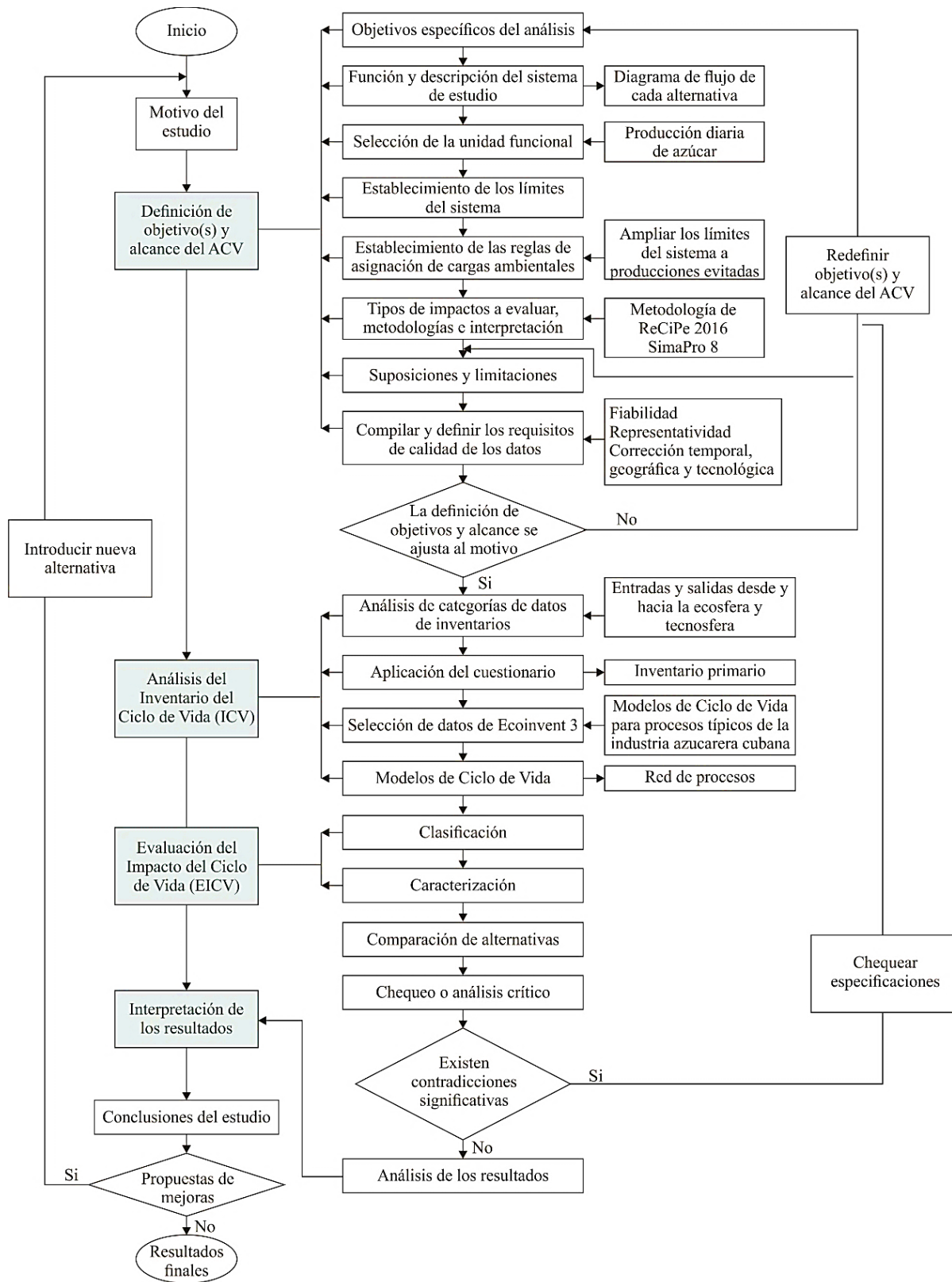


Figura 2.1. Diagrama para la metodología de ACV en la agroindustria azucarera y la producción de etanol.

2.1. Definición de objetivos y alcance del ACV

Según la NC ISO 14 040: 2009 y la NC ISO 14 044: 2009 los elementos a incluir en la sección de definición de objetivo y alcance son los siguientes:

- La razón para la ejecución del ACV.
- Definición precisa del producto, su ciclo de vida y la función que cumple.
- La unidad funcional, que constituye una base para la comparación.
- Descripción de los límites del sistema y reglas de asignación de cargas ambientales.
- Datos y requisitos con respecto a la calidad de datos.
- Suposiciones y limitaciones.
- Los requisitos con respecto al proceso de evaluación del impacto e interpretación.
- Las audiencias proyectadas y la forma de cómo los resultados serán comunicados.
- Si aplica, la forma de cómo se va a llevar a cabo una revisión del mismo rango.
- El tipo y formato del informe requerido para el estudio.

La metodología propuesta parte de la definición del objetivo y alcance del ACV, evidenciando la razón o motivo para desarrollar el estudio en cuestión.

2.1.1. Objetivos del estudio

La definición de los objetivos de un ACV, y el alcance del estudio, proporcionan los elementos iniciales para desarrollar la metodología propuesta, por lo tanto, resulta necesario que estén claramente definidos y sean coherentes con la aplicación prevista y las condiciones actuales del lugar a desarrollar el estudio. Los objetivos de la ejecución del ACV de la agroindustria azucarera y la producción de etanol son los siguientes:

1. Identificar y cuantificar los impactos ambientales generados por la producción de azúcar y etanol, considerando un escenario que responde a la producción de azúcar, etanol y el cultivo de la caña de forma convencional.
2. Analizar desde el punto de vista ambiental, el impacto de cambios en el esquema convencional, incluyendo estrategias de diversificación a partir de los subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol.

2.1.2. Alcance del estudio

Al definir el alcance de un ACV, se deben considerar y describir claramente los siguientes aspectos.

2.1.2.1. Función y descripción del sistema en estudio

La función principal del proceso de producción de azúcar es extraer la sacarosa que contiene la caña de azúcar; y a partir de la fermentación directa de jugos de caña de azúcar, una mezcla de jugos y melazas, o melaza diluida en agua se puede producir el etanol. El ciclo de vida del azúcar de caña se ha abordado habitualmente en la literatura en tres subsistemas: agrícola, industrial y distribución-consumo como se identifica en la figura 2.2 (Chauhan et al., 2011; Contreras et al., 2009; Renó et al., 2011; Renouf, 2002).

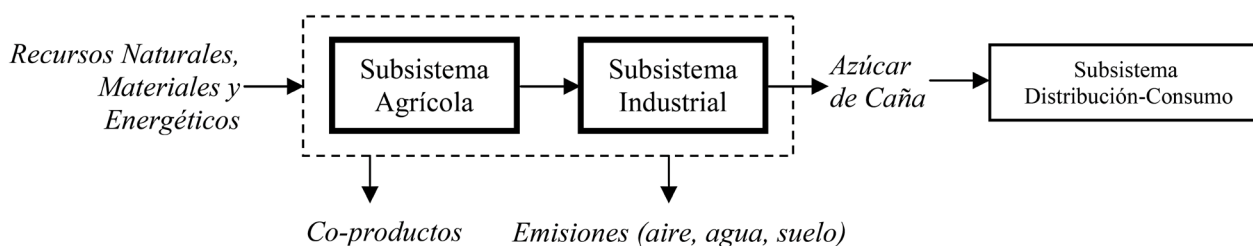


Figura 2.2 Modelo del ciclo de vida del azúcar de caña

El subsistema agrícola incluye la preparación de la tierra, siembra, atenciones culturales, cosecha y transportación al central. En el subsistema industrial, se identifican las operaciones unitarias propias del proceso: extracción, purificación, concentración, cocción-cristalización y centrifugación. Se tiene en cuenta la cogeneración de energía a partir de bagazo. En la distribución-consumo del producto se incluye el embalaje, la transportación, la distribución y el consumo en correspondencia al mercado de destino.

2.1.2.2. Selección de la unidad funcional

La unidad funcional es la unidad a la que se refieren todas las entradas (materias primas, energía...) y salidas (productos, emisiones, residuos...) del sistema en estudio. Debe estar claramente definida, ser medible y representativa de todos los flujos del proceso.

La unidad más representativa de todas las entradas y salidas del proceso en estudio es la producción diaria del ingenio. El azúcar se seleccionó como producto principal y se supuso que todos los subproductos sustituyen a otros productos en el mercado, productos evitados.

2.1.2.3. Establecimiento de los límites del sistema

Los límites del sistema indican qué operaciones unitarias se incluyen en el ACV, determinando lo que está dentro del sistema en estudio y lo que se queda fuera. La región externa a los límites constituye lo que se denomina el entorno del sistema, el cual actúa como fuente para las entradas al mismo (materias primas y energía) y como un sumidero para todas las salidas, en cada caso, se establecen de acuerdo al objetivo específico del estudio. Lógicamente no se puede detectar todas las entradas y salidas de un sistema de productos y hay que definir límites alrededor del mismo.

En este paso de la metodología, se limita el estudio a los objetivos establecidos y al conocimiento del ciclo de vida del sistema. En la figura 2.2, se enmarcan por líneas discontinuas los subsistemas incluidos dentro de los límites del sistema, excluyendo la distribución-consumo por depender este de los mercados de destino que pueden ser muy variados y no considerarse en los objetivos del estudio. Por tanto, se realiza un estudio “de la cuna a la puerta”.

Al establecer los límites del sistema se considera que el cultivo de la caña de azúcar (subsistema agrícola) forma parte del sistema del producto y no de la naturaleza. Esto permite excluir en la modelación del inventario, el dióxido de carbono (CO₂) emitido en la combustión del bagazo, al ser equivalente a los requerimientos de este compuesto por la planta en su proceso evolutivo (fotosíntesis). En la etapa agrícola, además, se incluye la producción de fertilizantes, pesticidas y combustibles.

En el sistema industrial se considera la secuencia de producción principal, desde la entrada de la caña hasta la obtención del producto final y subproductos como el etanol, incluyendo operaciones de transporte, producción y uso de combustibles, generación de energía, en forma de electricidad y calor, eliminación de todos los residuos del proceso.

2.1.2.4. Asignación de cargas ambientales

En el caso base y las variantes se consideran los co-productos y residuos con algún valor agregado como productos evitados, eliminándose la asignación de cargas ambientales al ampliar los límites del sistema para incluir funciones adicionales relacionadas con estos. El azúcar se identifica como el producto principal y se evalúan los co-productos (mieles, electricidad y etanol) unido a determinados residuos (residuos agrícolas cañeros, cenizas de la combustión del bagazo, cachaza y residuales líquidos) como productos evitados. La carga ambiental de los productos evitados tiene signo negativo, es decir, se resta en el impacto global del sistema. Esto se realiza para cuantificar los recursos y

emisiones evitadas por la valorización de los subproductos o residuos de los procesos productivos. En la tabla 2.1 se relacionan los productos que estos evitan al tener funciones similares o a partir de su conversión

Tabla 2.1 Relación de productos evitados

Co-productos/Residuos	Productos evitados
Residuos agrícolas cañeros	Alimento animal (maíz, cebada)
Miel	Etanol y levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Cachaza	Fertilizantes (superfosfato triple, cloruro de potasio, urea)
Cenizas	Fertilizantes (superfosfato triple, cloruro de potasio)
Residuales líquidos	Fertilizantes (superfosfato triple, urea) y agua fresca
Electricidad	Electricidad a partir de combustible fósil
Biogás	Queroseno
Lodos	Fertilizantes (superfosfato triple, cloruro de potasio)

Las opciones de valorización de los co-productos y los residuos del proceso azucarero más utilizadas son: el empleo de los residuos agrícolas cañeros como combustible, la producción de etanol a partir de jugos o miel, el uso del bagazo disponible para cogenerar energía en otras fábricas de azúcar o procesos que lo requieran, la aplicación de las cenizas, la cachaza y los residuales líquidos como fertilizantes en el cultivo de la caña de azúcar, la sustitución de electricidad generada a partir del fuel oil (distribuida por el Sistema Electroenergético Nacional) por la cogenerada en la fábrica y el aprovechamiento de los residuales líquidos como agua de reposición en el proceso y fertilizantes.

2.1.2.4.1. Variantes agroindustriales de la industria azucarera cubana

El sistema en estudio es en una Empresa Azucarera formada por un central azucarero y una destilería, productora de azúcar de caña y etanol en la provincia de Matanzas, donde se evidencia la integración entre estos dos procesos productivos, con una capacidad de 250 t/d de azúcar de caña para las condiciones de producción convencionales; esto representa la unidad funcional del análisis realizado. Para la comparación se consideraron dos alternativas diferentes para el uso de subproductos y residuos de la producción de azúcar y etanol. En las dos alternativas, las consideraciones tomadas para las etapas

agrícolas son las mismas, excepto para el consumo de fertilizantes, que cambia según el uso de subproductos.

Los resultados del balance de materiales y energía son la base para la evaluación de la etapa industrial en cada alternativa. Se modifican de acuerdo con los nuevos procesos para la valorización de subproductos y residuos. Se evitaron las reglas de asignación según la valoración masiva o económica. El azúcar de caña fue considerado como producto principal, lo que contribuye a la carga ambiental total. Se consideró que los subproductos sustitúan a otros productos en el mercado (productos evitados). La principal diferencia entre las alternativas se encuentra en la categoría de impacto de recursos. La ventaja de producir etanol, biogás, alimentos para animales y fertilizantes a partir de los subproductos se hace evidente a través del estudio comparativo para el ahorro de recursos.

La alternativa I se basa en la producción convencional de azúcar en Cuba. Se caracteriza por el uso de fertilizantes sintéticos, pesticidas, riego con agua dulce, siembra y cosecha tradicionales. El bagazo se utiliza en la combustión para producir vapor y electricidad. La producción de electricidad satisface los requisitos del central azucarero y el resto se distribuye a lo largo de la red nacional (SEN: Sistema Electroenergético Nacional). Los residuos agrícolas cañeros de la etapa industrial se usan como alimento para animales (producto evitado, es decir, evita la producción de recursos vírgenes) y las aguas residuales del ingenio azucarero residuales se descargan en cuerpos de agua superficiales causando contaminación. Las cenizas de la combustión del bagazo y la cachaza se depositan en el suelo.

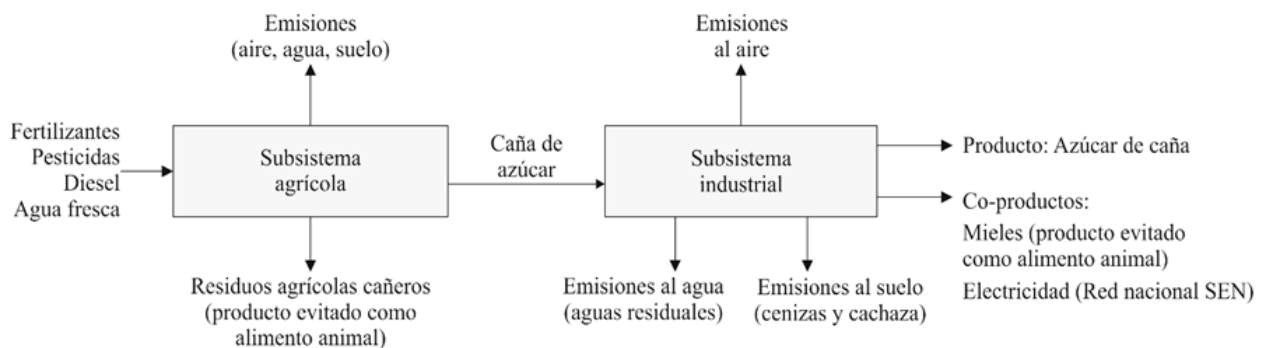


Figura 2.3 Alternativa tecnológica I (Caso base)

La alternativa II integra el proceso de obtención del azúcar con la producción de etanol a partir de la producción de mieles y biogás. El biogás se produce a partir de cachaza y aguas residuales de la producción de azúcar y etanol en un digestor anaeróbico. Los lodos y las aguas residuales de este digestor se utilizan para la fertilización y la fertirrigación, respectivamente. El biogás se usa para

cocinar en las casas alrededor del central azucarero, lo que evita el uso de queroseno. La producción de etanol se considera un producto evitado porque puede sustituir el 20 % de la gasolina consumida. También, la alternativa II considera el uso de cenizas como fertilizante, así como se incorporan un mayor uso de subproductos y residuos en dicha alternativa.

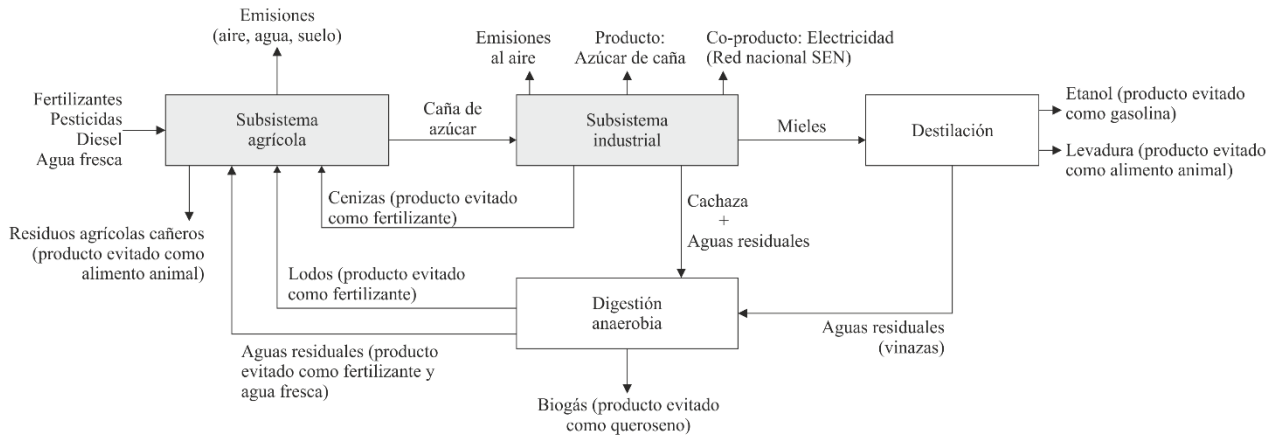


Figura 2.4 Alternativa tecnológica II

2.1.2.5. Tipos de impacto a evaluar, metodología e interpretación

La evaluación del ciclo de vida se realiza utilizando el software SimaPro 8.0, la base de datos Ecoinvent 3 y la metodología ReCiPe 2016. SimaPro 8.0 suministra una gran cantidad de métodos estándar y cada método incluye varias categorías de impacto, usualmente de 10 a 20, además, permite agregar o quitar categorías de un método o desarrollar métodos completamente nuevos. En esta metodología no se propone cambiar los métodos, sino seleccionar el que más se ajusta al estudio, que se corresponde con la metodología del ReCiPe 2016, cuyos datos están actualizados con el conocimiento científico actual y comprende 18 categorías de impacto ambiental.

2.1.2.6. Suposiciones y limitaciones

En esta fase del estudio se deben especificar las suposiciones o consideraciones que se han asumido a lo largo del estudio (pues en algunos casos no se dispone de datos o se desprecian los que no se consideran significativos). Igualmente, es necesario indicar las limitaciones que se han introducido en el ACV como consecuencia de ello, ya que puede influir en la interpretación de los resultados. Es necesario, además analizar si se considera el ciclo de vida hasta la obtención del producto, si no se tiene en cuenta la etapa de distribución y consumo, así como, las diferentes soluciones que se proponen en

cada alternativa para los residuos y el rendimiento de las diferentes etapas de acuerdo con índices y otros reportes de la literatura.

A continuación, se especifican las consideraciones hechas en cada alternativa con respecto a las soluciones de los residuos:

- El sistema de estudio considerado es una fábrica de azúcar crudo de caña, genérica, con capacidad de 250 toneladas de caña diaria, para las condiciones de producción convencionales (proceso base) y también se produce etanol a partir de los jugos o mieles obtenidos en el proceso anteriormente mencionado, con los límites y regla de asignación establecidas, en la cual cambian las modalidades de utilización de subproductos y residuos, como se explica en las diferentes alternativas planteadas.
- En las dos alternativas se mantienen las mismas consideraciones para la etapa agrícola y los resultados de los balances de materiales y energía para una fábrica típica de esa capacidad.
- En cada alternativa se van incorporando los nuevos procesos, se recalculan los balances para dichas condiciones y se analizan los subproductos y residuos por concepto de productos evitados.
- En la evaluación del uso de la cachaza, las cenizas y lodos como fertilizantes, se consideró el ahorro de los fertilizantes químicos que comúnmente se emplean en la agricultura en Cuba (urea, cloruro de potasio y superfosfato triple) y que los mismos proceden de procesos similares a los contenidos en la base de datos Ecoinvent 3.
- Con el uso de aguas residuales para fertirrigación se considera el ahorro de agua y fertilizantes equivalente a los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio del agua.
- La generación de electricidad satisface las necesidades en la industria, de acuerdo al esquema tecnológico de cada alternativa y el resto se envía al Sistema Electroenergético Nacional.
- El biogás producido se usa como combustible doméstico, sustituyendo cantidades equivalentes de queroseno (1 m³ de biogás sustituye a 0,58 L de queroseno).
- El etanol producido es considerado como biocombustible, con lo que se sustituyen cantidades equivalentes de gasolina en vehículos automotores, con el objetivo de evaluar un uso con muchas perspectivas en la actualidad.

2.1.2.7. Requisitos de calidad de los datos

En este punto se deben especificar los requisitos a cumplir por los datos para que sean coherentes con los objetivos del estudio. Para definir el perfil de los datos, los elementos fundamentales a tener en cuenta son:

- El tiempo de recolección de los datos: Para estudios de ACV breves o revisiones se pueden usar datos ya disponibles, datos de la literatura, datos de SimaPro 8.0 y algunos estimados que sean necesarios. Para estudios amplios y detallados se recomienda recolectar datos de balances de materiales y energía y caracterización de residuos durante el tiempo que se considere adecuado para el estudio específico.
- Región: Los datos se deben corresponder con la instalación objeto de estudio, o casos generales del país.
- Representatividad y tipo de tecnología: Se recomienda usar datos de procesos específicos, promedios de procesos similares o de bases de datos y la literatura, así como, especificar el estado de la tecnología.

En los archivos de datos suministrados por SimaPro 8.0 estas características están establecidas para cada proceso. Automáticamente compara el perfil de cada proceso con el establecido en el proyecto y un indicador de calidad de los datos (DQI) con códigos de colores indica hasta dónde un proceso cumple con los requisitos. El color verde muestra que el material o proceso seleccionado es aplicable al proyecto, amarillo que es bastante aceptable, naranja que se aleja más y rojo significa que, aunque utilizable, el proceso o material está fuera de los requerimientos del proyecto. Además, la calidad puede controlarse mediante su contraste con otras fuentes, por comparación de datos tomados por diferentes vías con valores promedio de la literatura o procesos específicos. Por último, el alcance también debe incluir el tipo de revisión crítica a efectuar, si esta es necesaria de acuerdo con los objetivos del estudio y el tipo y formato que tendrá el informe final.

2.2. Desarrollo del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

En el Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) consiste en la elaboración de un modelo del ciclo de vida del producto con todas las entradas y salidas ambientales. Se cuantifican los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua, derivados de todos los procesos que están dentro de los límites del sistema, en relación con la

unidad funcional seleccionada. El nivel de detalle que se alcanza en el inventario depende de la disponibilidad de los datos y el nivel de complejidad con que se obtengan, pudiéndose aplicar una aproximación o simplificación de los mismos, en los casos que sea necesario.

Es útil diferenciar entre dos tipos de datos:

1. Datos de primer plano
2. Datos de fondo

Los datos de primer plano se refieren a datos específicos que describen un sistema particular de producción. En el caso de la industria azucarera, se corresponden con los resultados de los balances de materiales y energía en los procesos involucrados en las alternativas consideradas y caracterización de los residuos asociados. Pueden hacerse estimados usando datos de procesos similares, índices establecidos por el Grupo Empresarial AZCUBA, reportes de las instalaciones y otros disponibles en el Manual de los derivados de la caña de azúcar del ICIDCA (2000) y la documentación para fábricas de azúcar de la EPA (1997). Para las dos etapas se toman algunos datos de los índices reportados en la literatura para las diferentes acciones en la etapa de cultivo y etapa industrial que aparecen reflejados en el cuestionario de datos primarios.

El anexo 6 muestra los resultados del inventario de datos primarios para la etapa agrícola, los cuales son similares para las dos alternativas. En el anexo 7 se muestran los resultados de inventario primario para la etapa industrial de la alternativa I y en el anexo 8 para la alternativa II. Los datos de fondo son datos para materiales generales, energía, transporte y sistemas para el manejo de desechos. En general, estos datos se encuentran en bases de datos y en la literatura. Se recomiendan los datos de las bases de datos de Ecoinvent 3, disponibles en SimaPro 8.0. Se recomienda utilizar cuestionarios específicos para la recolección de los datos, los cuales deben incluir una introducción, instrucciones y tablas que detallen la información requerida para cada tipo de datos. El anexo 5 muestra el cuestionario recomendado en la metodología para el análisis en la agroindustria azucarera y la producción de etanol. Los resultados del cuestionario constituyen el inventario primario.

A continuación, se refieren los aspectos más importantes a considerar para cada subsistema.

2.2.1. Inventario del subsistema agrícola

En el cultivo de la caña se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Superficie agrícola cultivada.

- Preparación de la tierra (si se utilizan equipos de tracción animal o mecanizada).
- Labores culturales.
- Rendimiento agrícola promedio.
- Variedades que se cosechan.
- Índice de madurez de la caña.
- Tiempo de ocupación del área cultivable.
- Cultivos intercalados.
- Formas de regadío que se utilizan.
- Consumo de recursos naturales como agua para regadío y sus características, energía solar.
- Consumo de energía eléctrica por concepto de regadío.
- Tipos de herbicidas que son aplicados al suelo. Cantidad.
- Empleo de productos químicos u orgánicos como fertilizantes.
- Uso de controladores biológicos.
- Consumo de combustibles en toda la etapa por diferentes conceptos.
- Medida en que los productos aplicados al suelo emigran a los compartimientos fuera del área agrícola (aire, agua, suelo natural e industrial).
- Cantidad de estas sustancias que se emiten accidentalmente en el agua de servicio inmediata.
- Método de precorte empleado (quema de caña).
- Tipo de corte (manual y/o mecanizado).
- Utilización y volumen de los residuales agrícolas (RAC).
- Transportación de la materia prima, teniendo en cuenta los medios utilizados, la distancia a recorrer, las condiciones higiénico-sanitarias de los vehículos y sus capacidades.
- Tiempo transcurrido entre el corte de la caña y su procesamiento.

Algunos de estos aspectos son cualitativos y si bien no inciden directamente en la cuantificación del impacto ambiental, permiten arribar a conclusiones importantes en la interpretación de los resultados, por lo que deben ser analizados. Las fuentes de datos para esta etapa, las constituyen los índices reportados en la literatura para las diferentes acciones en la etapa de cultivo, datos tomados en las empresas y criterios de expertos en la siembra y cosecha de la gramínea.

Los resultados de este inventario primario (datos primarios), se editan en cada uno de los modelos que sea necesario crear mediante SimaPro 8.0, ya que el proceso de producción de azúcar no aparece en las bases de datos. Aquí los datos se agrupan de acuerdo a:

- Entradas de la naturaleza
- Entradas de la tecnosfera
- Emisiones
- Residuos

En la siguiente tabla se presentan dichas categorías desglosadas para el subsistema agrícola del ciclo de vida del azúcar.

Tabla 2.2 Categorías de inventario y consideraciones para el subsistema agrícola del ciclo de vida del azúcar.

Categoría	Recursos y procesos	Consideraciones
Entradas desde la Ecosfera	Energía solar Ocupación del terreno Agua	En las dos alternativas se mantienen constantes.
Entradas desde la Tecnosfera	Combustible Fertilizantes Pesticidas Caña de semilla Operaciones de siembra, fertilización, irrigación y cosecha Transporte	En las dos alternativas se mantienen constantes.
Salidas a la Tecnosfera	Caña de azúcar RAC	En las dos alternativas se mantienen constantes.
Emisiones a la Ecosfera	Emisiones al agua por pesticidas y fertilizantes Emisiones al suelo por pesticidas. Emisiones al aire por fertilizantes	En las dos alternativas se mantienen constantes.

2.2.2. Inventario del subsistema industrial

Es imprescindible definir:

- Materia prima procesada.
- Índice de materias extrañas en caña.
- Utilización del agua fresca para la imbibición, alimentación a calderas, reposición al enfriadero, limpieza de equipos y pisos.
- Insumos como hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, hidróxido de calcio, zeolita.
- Generación de vapor y sus características. Se puede determinar mediante balances en caldera, índices de generación u otro tipo de información.
- Consumos energéticos (se incluye la energía eléctrica y calorífica).
- Combustibles empleados para la generación de vapor (bagazo, paja, fuel-oil, etc.), sus propiedades y consumos.
- Productos intermedios, subproductos y producto final cuya cuantía se determina mediante balances totales y parciales.
- Derrames de productos azucarados en cualquier etapa.
- Otros derrames (grasas, lubricantes, etc.).
- Residuales sólidos (bagazo, cachaza, cenizas). Disposición final y posible utilización como materia prima para otros procesos.
- Residuales líquidos (agua de limpieza y lavado de equipos, derrames de productos azucarados y todo líquido en general que va a parar a la zanja principal). Sus características y disposición final. Si se emplean los residuales líquidos en fertirriego debe especificarse el volumen empleado.
- Residuales gaseosos (gases de combustión). Características.

La fuente de datos principal de esta etapa es el balance de materiales y energía, complementado con la caracterización de residuales, reportes de las instalaciones, estimados y otras informaciones disponibles.

En la siguiente tabla se presentan las categorías de inventario desglosadas para el subsistema industrial del ciclo de vida del azúcar.

Tabla 2.3 Categorías de inventario y consideraciones para el subsistema industrial del ciclo de vida del azúcar.

Categoría	Recursos y procesos	Consideraciones
Entradas desde la Ecosfera	Agua	Depende de la Alternativa
Entradas desde la Tecnosfera	Caña de azúcar	Constante en las dos alternativas
	Cal	“ ”
	Hidróxido de sodio	“ “
	Ácido clorhídrico	“ “
	Transporte	Depende de las operaciones en cada alternativa
	Sulfato de amonio	“ “ “
	Ácido sulfúrico	“ “ “
Salidas a la Tecnosfera	Azúcar	Constante en todas las alternativas
	Miel	“ “ “
	Electricidad	Función de la tecnología de cada alternativa
	Biogás	En alternativas II
Emisiones a la Ecosfera	Emisiones al aire por cogeneración (óxidos de nitrógeno y material particulado)	Constante en todas las alternativas
	Emisiones al agua por residuales líquidos	En alternativa I
	Emisiones al suelo por cachaza y cenizas	“ “ “

El resultado final es el modelo de ciclo de vida para la alternativa en cuestión, que permite la obtención del inventario total del proceso agrupado en cuatro compartimientos: materias primas, emisiones al agua, emisiones al aire y emisiones al suelo. El inventario primario se completa con información de las bases de datos, ya que cuando los datos primarios implican procesos ya creados, como es el caso de los insumos de la etapa agrícola e industrial, se produce la generación de datos de fondo que incluyen a su vez, todos los insumos, operaciones y emisiones involucrados en este proceso. SimaPro 8.0 permite representar gráficamente el modelo de Inventario Final mediante la red del proceso.

2.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

La evaluación de impacto para el ciclo de vida es definida como la fase del ACV dirigida a entender y evaluar la magnitud y el significado de los impactos potenciales para el medio ambiente de un sistema o producto. Consiste en desarrollar las siguientes acciones:

- Elaboración de un inventario de categorías de impacto a que pueden dar lugar las diversas cargas ambientales generadas por el sistema del producto.
- Selección de las categorías de impacto a considerar para el sistema en estudio.
- Asignación de los resultados del inventario a las categorías de impacto a que contribuyen.
- Cálculo de las contribuciones de cada parámetro del inventario al impacto ambiental.
- Establecimiento de un orden de importancia entre los impactos considerados.

Se propone realizar la evaluación mediante el software SimaPro 8.0, usando el método de ReCiPe 2016, lo cual ofrece innumerables posibilidades. Esta fase hace corresponder cada parámetro obtenido en el Análisis de Inventario con el potencial impacto ambiental a que da lugar, por lo que facilita la interpretación y combinación de los datos del inventario a formas más relevantes para la toma de decisiones.

2.3.1. Clasificación

En la clasificación, los datos recopilados en el análisis de inventario son asignados a distintas categorías de impacto según el efecto ambiental esperado. El resultado del inventario del ACV usualmente contiene cientos de emisiones y parámetros de extracción de recursos diferentes. Una vez que las categorías de impactos relevantes hayan sido determinadas, los resultados de inventario deben ser asignados a estas categorías de impacto. En la metodología se consideran las categorías de impacto incluidas en ReCiPe 2016 y la asignación de acuerdo al software SimaPro 8.0. De forma general, los resultados de la clasificación para la industria azucarera atendiendo a las 18 categorías de impacto de ReCiPe 2016, se comportan de la forma que se muestra en la tabla 2.4

Tabla 2.4 Clasificación de los elementos del inventario en las categorías de impacto.

Categoría de Inventario		Origen	Subsistemas	Categoría de Impacto	Categoría de daño
Entrada	Salida				
Combustibles (carbón, gas natural, oil)		Transporte, producción de fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos, generación de electricidad	Agrícola e Industrial	Agotamiento de los recursos fósiles	Daños a los Recursos
Minerales (aluminio, Cromo, hierro, níquel, Zinc, etc)		Producción de fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos, combustibles, maquinarias.	Agrícola e Industrial	Agotamiento de los recursos minerales	
Ocupación y transformación del suelo		Terreno dedicado al cultivo y diferentes instalaciones	Agrícola e Industrial en menor proporción	Uso del Suelo	Daños al Ecosistema
	Emisiones al aire de gases ácidos, Compuestos inorgánicos	Producción y uso de combustibles, fertilizantes y productos químicos	Agrícola e Industrial	Acidificación terrestre / Eutrofización de las aguas frescas	
	Emisiones al aire, agua y suelo de metales pesados y otros tóxicos	Producción y uso de combustibles, fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos	Agrícola e Industrial	Ecotoxicidad terrestre Ecotoxicidad de aguas frescas	
	Emisiones al aire de gases efecto invernadero, CO ₂ , metano, otros	Producción y combustión de combustibles fósiles, actividades agrícolas, producción y uso de productos químicos	Agrícola e Industrial	Cambio climático	Daños a la Salud Humana

	Emisiones al aire de CFC-12, Halon-1211 y otros compuestos Fluorocarbonados	Producción de combustibles, fertilizantes y otros productos químicos	Fundamentalmente en Etapa Agrícola.	Agotamiento de la capa de ozono
	Emisiones al aire, agua y suelo de Dioxinas, Cloroformo, Arsénico	Producción de fertilizantes y otros productos químicos	Agrícola eIndustrial	Toxicidad humana
	Emisiones al aire de hidrocarburos, y otros compuestos orgánicos	Producción de pesticidas, combustibles	Fundamentalmente en Etapa Agrícola	Formación de material particulado Formación de ozono fotoquímico
	Emisiones al aire de óxidos de Nitrógeno, partículas	Combustión de bagazo, uso de fertilizantes	Agrícola eIndustrial	Formación de material particulado Formación de ozono fotoquímico
	Emisiones al aire y agua de isótopos	Producción de combustibles y fertilizantes	Fundamentalmente en Etapa Agrícola	Radiaciones Ionizantes

2.3.2. Caracterización

Una vez que las categorías de impacto hayan sido definidas y los resultados del inventario hayan sido asignados a estas categorías de impacto se procede a la caracterización. La caracterización tiene por objetivo la aplicación de modelos a las categorías de impacto para obtener indicadores ambientales. La tendencia es a agregar las distintas cargas ambientales dentro de una categoría de impacto utilizando factores de equivalencia. El resultado de la caracterización es un «perfil ambiental» del sistema, compuesto por el conjunto de los indicadores ambientales de todas las categorías de impacto consideradas. Es necesario definir factores de caracterización que reflejen la contribución relativa de un resultado del inventario al indicador de la categoría de impacto, para lo cual se selecciona, entre todas las especies que contribuyen a un impacto, la más representativa, expresándose el resto en función de ella.

Mediante la metodología ReCiPe 2016 se convierten los resultados del inventario en un modelo ambiental para cada una de las categorías de impacto consideradas. Las categorías de impacto que se relacionan con un mismo punto final pueden ser agrupadas en tres categorías de daño que se expresan en una unidad común.

Se puede definir la unidad del factor de caracterización del punto medio (CFm), esto se debe a que se ha introducido una sustancia de referencia, por lo que el factor de caracterización es un número adimensional que expresa la fortaleza de una cantidad de una sustancia relativa a la de la sustancia de referencia. Los factores de caracterización de punto final (CFe) se derivan directamente del CFm, con un factor constante de punto medio a punto final por categoría de impacto por

$$CFe_{x,c,a} = CFm_{x,c} \times F_{M \rightarrow E,c,a}$$

Donde c denota la perspectiva cultural, a denota el área de protección (salud humana, ecosistemas terrestres, ecosistemas de agua dulce, ecosistemas marinos o escasez de recursos), x denota el factor estresante de preocupación y $FM \rightarrow E, c, a$ es el punto medio al punto final factor de conversión para la perspectiva cultural c y área de protección a. Estos factores de punto medio a punto final son constantes por categoría de impacto, porque los mecanismos ambientales se consideran idénticos para todos los factores estresantes después de la ubicación del impacto del punto medio en la ruta de causa-efecto.

2.4. Interpretación de los resultados

En esta etapa se combinan los resultados de las dos etapas anteriores (Análisis de Inventario y Evaluación de Impacto), con la finalidad de extraer, de acuerdo a los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones futuras con respecto a los cambios tecnológicos que sea conveniente introducir en la producción de azúcar, enfocados al desarrollo de alternativas de diversificación o la integración de procesos, sobre la base de un estudio sólido de la componente ambiental de los análisis de tecnologías.

Esta etapa puede incluir propuestas cualitativas y cuantitativas de mejoras, como cambios en el producto, en el proceso, en el diseño, sustitución de materias primas, gestión de residuos, etc. De igual forma, puede ir asociada con las herramientas de prevención de la contaminación industrial, tales como minimización de residuos, o rediseño de productos. Se propone realizar chequeos que permitan analizar si las conclusiones del estudio son adecuadamente apoyadas por los datos y los procedimientos utilizados.

CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Con la propuesta metodológica para el Análisis del Ciclo de Vida en la agroindustria azucarera y la producción de etanol, se puede evaluar cuantitativamente el impacto ambiental generado por diferentes alternativas tecnológicas empleadas en la gestión de subproductos y residuos en dicha industria, por lo que se valida la hipótesis planteada.
2. La realización de una revisión crítica del estado del arte referido al Análisis del Ciclo de Vida en la producción de azúcar y etanol, permite conocer el impacto generado sobre el medio ambiente, mediante el uso del método ReCiPe 2016, la cual integra y relaciona todos los impactos con sus problemas ambientales específicos
3. Se proponen dos alternativas tecnológicas para la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera y la producción de etanol, con la finalidad de minimizar la generación emisiones contaminantes al medio ambiente.
4. Basada en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14 000, el método de caracterización ReCiPe 2016, el procedimiento empleado en el software SimaPro 8.0 y la base de datos Ecoinvent 3, se propone la metodología de ACV.

RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Aplicar la metodología propuesta a los estudios de integración del proceso de producción de azúcar crudo y etanol en la Empresa Azucarera Jesús Rabí, formada por en Central azucarero Jesús Rabí y la Destilería con el mismo nombre, para evaluar el impacto ambiental de esta industria de forma global, incluyendo todas las etapas del Ciclo de Vida de las alternativas consideradas.
2. Ampliar los estudios realizados en la etapa del desarrollo del Análisis del Inventario de Ciclo de Vida para así obtener mejores resultados en la investigación.
3. Lograr un soporte informático para almacenar una base de datos de Análisis de Ciclo de Vida donde se puedan encontrar los estudios realizados en Cuba, dando la posibilidad a los investigadores de continuar los análisis de los sistemas de producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, D. S. N., Rodríguez, I. E. B., Mendoza, D. J. D., y González, D. G. R. (2011). *Algunas operaciones básicas de la Industria química para el ingeniero industrial*.
- Albrecht, S., Fischer, M., Leistner, P., y Schebek, L. (2020). *Progress in Life Cycle Assessment 2019*. Springer.
- Almazán, O., Casanova, E., Gálvez, L. O., Lodos, J., Fernández, N., y Abril, A. J. (Eds.). (2016). *Patrimonio científico del nuevo ICIDCA. Una contribución al desarrollo de la industria azucarera y de los derivados*. Editorial ICIDCA.
- Amezcuca-Allieri, M. A., Martínez-Hernández, E., Anaya-Reza, O., Magdaleno-Molina, M., Melgarejo-Flores, L. A., Palmerín-Ruiz, M. E., Eguía-Lis, J. A. Z., Rosas-Molina, A., Enríquez-Poy, M., y Aburto, J. (2019). Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico [Article]. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 281-292. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.09.014>
- Amores, O. M. G. (2018). *Procedimiento para evaluar el impacto ambiental de la UEB Derivados Heriberto Duquesne en el Consejo Popular Adela*. [Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniería Industrial, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, 2018.
- Anne Renouf, M., Pagan, R. J., y Wegener, M. K. (2011). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing [Article]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(2), 125-137. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0233-y>
- Silalertruksa, T., Gheewala, S.H., Environmental sustainability assessment of bio-ethanol production in Thailand (2009) *Energy*, 34 (11), pp. 1933-1946
- Smeets, E.M.W., Bouwmanw, L.F., Stehfest, E., Contribution of N₂O to the greenhouse gas balance of first-generation biofuels (2009) *Glob Chang Biol*, 15 (1), pp. 1-23; (2009) Ecoinvent Database, <http://www.ecoinvent.ch/>, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Version 2.0. December 2010
- Thomassen, M.A., Dalgaard, R., Heijungs, R., Attributional and consequential LCA of milk production (2008) *Int J Life Cycle Assess*, 13 (4), pp. 339-349

- Von Blottnitz, H., Curran, M.A., A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective (2007) *Journal of Cleaner Production*, 15 (7), pp. 607-619. , DOI 10.1016/j.jclepro.2006.03.002, PII S0959652606001016
- Wang, M., Wu, M., Huo, H., Life-cycle energy use and greenhouse gas emission implications of Brazilian sugarcane ethanol simulated with the GREET model (2008) *Int Sugar J*, 110 (1317), pp. 527-545
- Araujo-Gonzalez, E. d. V. (2017). *Elaboración de una propuesta para la adopción de un sistema de gestión ambiental en empresas productoras de alcohol etílico* [Tesis en opción al título de Magíster Scientiae en Gestión de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad de los Andes]. Mérida, Venezuela.
- Armenteros, Y. Q., Domínguez, E. R. R., Aguirre, S. D., Martínez, D. M. P., Moya, A. M. C., y Álvarez, J. Á. (2016). Aplicación de la metodología de inspección estatal de la actividad reguladora ambiental con enfoque de ciclo de vida en la industria azucarera. *Revista Cubana de Ingeniería*, V, 13.
- Armenteros, Y. Q., Gutiérrez, C. M., Domínguez, E. R. R., y Aguirre, S. D. (2018). Enfoque de ciclo de vida en la inspección estatal ambiental a procesos en Cuba. *Revista Cubana de Ingeniería*, IX, 80.
- Bach, C. R. (2019). *Impactos ambientales ocasionados por la empresa maple etanol s.a. y propuesta de un plan de mitigación* [Tesis en opción al Título Profesional de Ingeniería Química, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Lambayeque, Perú.
- Bamforth, C. W., y Cook, D. J. (2019). *Food, fermentation, and micro-organisms* (Vol. 2nd ed.).
- Basosi, R., Cellura, M., Longo, S., y Parisi, M. L. (2019). *Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies: The Italian Experience*. Springer.
- Bergmann, J. C., Trichez, D., Sallet, L. P., Silva, F., y Almeida, J. R. (2018). Technological advancements in 1G ethanol production and recovery of by-products based on the refinery concept.

Advances in sugarcane biorefinery, 73-95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804534-3.00004-5>

Brambila-Paz, J. J., Martínez Damián, M. Á., Rojas Rojas, M. M., y Pérez Cerecedo, V. (2013). Real options, biorefineries and bioeconomy: The case of bioethanol and sugar. *Agrociencia*, 47, 281-292. <https://doi.org/http://www.redalyc.org/pdf/302/30226978007.pdf>

Buddadee, B., Wirojanagud, W., Watts, D. J., y Pitakaso, R. J. E. I. A. R. (2008). The development of multi-objective optimization model for excess bagasse utilization: A case study for Thailand. 28(6), 380-391.

Caldeira-Pires, A., Benoist, A., Luz, S. M. D., Silverio, V. C., Silveira, C. M., y Machado, F. S. (2018). Implications of removing straw from soil for bioenergy: An LCA of ethanol production using total sugarcane biomass [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 181, 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.119>

Calero de Hoces, M., Aloma Vicente, I. d. I. C., Rodriguez Rico, I. L., Cortes Falcon, M. F., y Angeles Martin-Lara, M. (2011, Jun). Life cycle assessment on producing a heavy metals biosorbent from sugarcane bagasse. *Desalination and Water Treatment*, 30(1-3), 272-277. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2093>

Cardoso, T. F., Watanabe, M. D. B., Souza, A., Chagas, M. F., Cavalett, O., Morais, E. R., Nogueira, L. A. H., Leal, M. R. L. V., Braunbeck, O. A., Cortez, L. A. B., y Bonomi, A. (2019). A regional approach to determine economic, environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil [Article]. *Biomass and Bioenergy*, 120, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.018>

Cavalett, O., da Cunha, M. P., Junqueira, T. L., de Souza Dias, M. O., Farias de Jesus, C. D., Mantelatto, P. E., Cardoso, T. d. F., Junqueira Franco, H. C., Maciel Filho, R., y Bonomi, A. (2011). Environmental and Economic Assessment of Bioethanol, Sugar and Bioelectricity Production from Sugarcane. En J. J. Klemes, P. S. Varbanov, y H. L. Lam (Eds.), *Pres 2011: 14th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, Pts 1 and 2* (Vol. 25, pp. 1007-1012). <https://doi.org/10.3303/cet1125168>

- Cavalett, O., Junqueira, T. L., Dias, M. O. S., Jesus, C. D. F., Mantelatto, P. E., Cunha, M. P., Franco, H. C. J., Cardoso, T. F., Filho, R. M., Rossell, C. E. V., y Bonomi, A. (2012). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil [Article]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(3), 399-410. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>
- Cedeño, E. L. (2017). Análisis del ciclo de vida como herramienta para la evaluación del comportamiento ambiental de un proceso. Caso de estudio central eléctrica de fuel oil 110 kv en la provincia Granama, Cuba. . *Revista Científica y Tecnológica UPSE, IV No 2*, 45.
- Chauhan, M. K., Chaudhary, S., Kumar, S. J. R., y Reviews, S. E. (2011). Life cycle assessment of sugar industry: A review. *15(7)*, 3445-3453.
- Chen, J. C. P., y Chou, C. C. (1993). *Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists* (12th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Contreras-Lisperguer, R., Batuecas, E., Mayo, C., Diaz, R., Perez, F. J., y Springer, C. (2018, Nov 1). Sustainability assessment of electricity cogeneration from sugarcane bagasse in Jamaica. *Journal of Cleaner Production*, 200, 390-401. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.322>
- Contreras, A. M., Rosa, E., Pérez, M., Van Langenhove, H., y Dewulf, J. J. J. o. C. P. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *17(8)*, 772-779.
- Cortés, M. F., Armas, A. C., Alomá, I., y Morales, M. (2021). Impacto de la extracción del jugo de los filtros en la sostenibilidad de un complejo azucarero industrial. *Centro Azúcar*, 48(1), 59-70. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/642
- de Azevedo, A., Fornasier, F., da Silva Szarblewski, M., Schneider, R. D. C. D. S., Hoeltz, M., y de Souza, D. (2017). Life cycle assessment of bioethanol production from cattle manure [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 162, 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.141>
- De Matos, M., Santos, F., y Eichler, P. (2020). Sugarcane world scenario. En F. Santos, S. C. Rabelo, M. De Matos, y P. Eichler (Eds.), *Sugarcane biorefinery, technology and perspectives* (pp. 1-19). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>

- Díaz, E. P. (1986). *Tecnología Azucarera II*. Editorial ISPJAE.
- Díaz, E. P. (2012). *Principios sobre tecnología de clarificación de jugos de caña*. Editorial ICIDCA.
- Díaz, L. B. (2014). *Análisis del Ciclo de Vida y Exergético de la Obtención de Etanol a Partir del Bagazo de la Caña* [Tesis en opción al Título de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Ding, N., Yang, Y., Cai, H., Liu, J., Ren, L., Yang, J., y Xie, G. H. (2017). Life cycle assessment of fuel ethanol produced from soluble sugar in sweet sorghum stalks in North China [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 161, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.078>
- EPA (1997). Emission Factor Documentation for AP-42, Section 9.10.1.1, Sugarcane Processing, Final Report, June 1997. U. S. Environmental Protection Agency, EPA.
- Falcón, F., Peláez, M., y Esturo, C. (1995). *Manual de operaciones para la producción de azúcar crudo de caña*. Dirección de Tecnología, Ministerio del Azúcar.
- Farahani, S. S., y Asoodar, M. A. (2017, Oct). Life cycle environmental impacts of bioethanol production from sugarcane molasses in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(28), 22547-22556. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9909-1>
- Gabisa, E. W., Bessou, C., y Gheewala, S. H. (2019). Life cycle environmental performance and energy balance of ethanol production based on sugarcane molasses in Ethiopia [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 234, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.199>
- Gálvez, L. O. (Ed.). (2000). *Manual de los derivados de la caña de azúcar* (3ra ed.). Editorial ICIDCA.
- Gálvez, L. O. (Ed.). (2019). *Resultados de los institutos cubanos de investigación, desarrollo e innovación en las tecnologías sobre azúcar y derivados*. Editorial ICIDCA.
- García, C. A., Fuentes, A., Hennecke, A., Riegelhaupt, E., Manzini, F., y Masera, O. (2011). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico [Article]. *Applied Energy*, 88(6), 2088-2097. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.072>

- Gil, M. P., Moya, A. M. C., y Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal the cleaner production*, 41, 222-231.
- González, E., Pedraza, J., Rosa, E., García, A., Rodríguez, I., Gallardo, I., Curbelo, A., Villanueva, G., Lauchy, A., y Oquendo, H. (2005). *Vías para el diseño de nuevas instalaciones de la industria de procesos químicos fermentativos y farmacéuticos*. Editorial Científico-Técnica.
- Gunawan, Bantacut, T., Romli, M., y Noor, E. (2019). Life Cycle Assessment of Cane-sugar in Indonesian Sugar Mill: Energy Use and GHG Emissions. International Conference on Science and Innovated Engineering 2018, i-COSINE 2018,
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., y Olsen, S. I. (2018). *Life cycle assessment* (Vol. 2018). Springer.
- Herrera, L. V. (2012). *Desarrollo de los inventarios parametrizados de ciclo de vida y modelación de los perfiles ambientales para la producción de azúcar crudo en la UEB Carlos Baliño* [Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering* (3rd ed.). Elsevier.
- Jafar, A. H., Al-Amin, A. Q., y Siwar, C. J. R. E. (2008). Environmental impact of alternative fuel mix in electricity generation in Malaysia. 33(10), 2229-2235.
- Jenkins, G. H. (1971). *Introducción a la Tecnología del Azúcar de Caña*. Editorial Ciencia y Técnica.
- Khawiwada, D., y Silveira, S. (2011, Sep). Greenhouse gas balances of molasses based ethanol in Nepal. *Journal of Cleaner Production*, 19(13), 1471-1485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.012>
- Laluce, C., Leite, G., Zavitoski, B., Zamai, T., y Ventura, R. (Eds.). (2016). *Fermentation of sugarcane juice and molasses for ethanol production*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118719862.ch3>
- Linares, Y. M. (2017). *Análisis del ciclo de vida de los alimentos incluyendo las categorías falta de inocuidad alimentaria* [Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.

- Maranghi, S., y Brondi, C. (2020). *Life Cycle Assessment in the Chemical Product Chain*. Springer.
- Martín, L. M. P. (2019). *Evaluación técnica, económica y ambiental de la producción de ácido cítrico a partir de miel de caña de azúcar* [Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Martínez, D. M. P., Moya, A. M. C., y Pérez, F. J. R. C. A. (2010). Análisis de Ciclo de Vida en la Empresa Panchito Gómez Toro. *37*(3).
- Martínez, E. A. (2018). *Análisis del Ciclo de Vida enfocado a la construcción de una vivienda unifamiliar compuesta por tableros de madera contralaminada*. Universidad de Coruña]. La Coruña, España.
- Meyer, J., Rein, P., Turner, P., y Mathias, K. (2013). *Good Management Practices for the Cane Sugar Industry*. Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Meza-Palacios, R., Aguilar-Lasserre, A. A., Morales-Mendoza, L. F., Pérez-Gallardo, J. R., Rico-Contreras, J. O., y Avarado-Lassman, A. (2019). Life cycle assessment of cane sugar production: The environmental contribution to human health, climate change, ecosystem quality and resources in México [Article]. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, *54*(7), 668-678. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1579537>
- Miranda, F. R., Cuellar, M., y Jover, D. S. (2018). El desarrollo tecnológico y social de la industria azucarera. El caso de las biorefinerías. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos*, *10*, 295-300. <https://doi.org/http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Mohammadi, F., Roedl, A., Abdoli, M. A., Amidpour, M., y Vahidi, H. (2020). Life cycle assessment (LCA) of the energetic use of bagasse in Iranian sugar industry [Article]. *Renewable Energy*, *145*, 1870-1882. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.023>
- Morell, I. (1985). *Tecnología Azucarera*. Editorial Pueblo y Educación.
- Moreno, E., Lérová, T., Reinhard, J., Valsasina, L., Bourgault, G., y Wernet, G. (2016). Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.3. *Ecoinvent*.

- Moya, A. M. C. (2007). *Metodología para el análisis de ciclo de vida combinado con el análisis exergético en la industria azucarera cubana*. [Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Moya, C., Domínguez, R., Van Langenhove, H., Herrero, S., Gil, P., Ledón, C., y Dewulf, J. (2013). Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 59, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.028>
- NC. (2009a). *NC ISO 14040: 2009. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006, IDT)*. Oficina Nacional de Normalización., La Habana (Cuba).
- NC. (2009b). *NC ISO 14044: 2009. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006, IDT)*. Oficina Nacional de Normalización., La Habana (Cuba).
- Nguyen, T., y Hermansen, J. (2012). System expansion for handling co-products in LCA of sugar cane bio-energy systems: GHG consequences of using molasses for ethanol production [Article]. *Applied Energy*, 89(1), 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.023>
- Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., y Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels [Article]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 502-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
- Nogueira, L. A. H. (2018). *Sugarcane bioenergy for sustainable development: expanding production in Latin America and Africa*. Routledge.
- Ouchida, K., Fukushima, Y., Ohara, S., Sugimoto, A., Hattori, T., Terajima, Y., Okubo, T., y Kikuchi, Y. (2019, Nov 1). Integrated sugarcane farming and sugar milling with selective fermentation: A simulation-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 236, Article Unsp 117521. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.352>
- Palma-Rojas, S., Caldeira-Pires, A., y Nogueira, J. M. (2017, Mar). Environmental and economic hybrid life cycle assessment of bagasse-derived ethanol produced in Brazil. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(3), 317-327. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0892-9>

- PCC. (2017). *Bases del plan nacional de desarrollo económico y social hasta el 2030: Visión de la nación, ejes y sectores estratégicos. Documento aprobado por el VII Congreso del PCC*. La Habana: Editorial Granma.
<http://www.granma.cu/file/pdf/gaceta/%C3%BAltimo%20PDF%2032.pdf>
- Pedrosa, R. (1975). *Fabricación de azúcar crudo de caña*. Editorial Científico Técnica.
- Pérez, B. R. (2014). *Metodología para la evaluación de impacto de ciclo de vida para la industria cubana*. [Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Perez Gil, M., Contreras Moya, A. M., y Rosa Dominguez, E. (2013, Feb). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.006>
- Planos Gutierrez, E. O., Rivero Vega, R., y Guevara Velazco, V. (2012). *Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*.
- Prasara-A, J., Gheewala, S. H., Silalertruksa, T., Pongpat, P., y Sawaengsak, W. (2019, Sep). Environmental and social life cycle assessment to enhance sustainability of sugarcane-based products in Thailand. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(7), 1447-1458. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01715-y>
- Quasem Al-Amin, A., Siwar, C., y Hamid Jaafar, A. J. T. O. R. E. J. (2009). Energy use and environmental impact of new alternative fuel mix in electricity generation in Malaysia. 2(1).
- Ramesh, C. R., y Ramachandran, S. (2019). Bioethanol production from food crops. Sustainable sources, interventions, and challenges. *Academic Press*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2017-0-00234-3>
- Ramjeawon, T. J. J. o. C. P. (2008). Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *16(16)*, 1727-1734.
- Ramjeawon, T. J. T. i. j. o. l. c. a. (2004). Life cycle assessment of cane-sugar on the island of Mauritius. *9(4)*, 254-260.

- Rathnayake, M., Chaireongsirikul, T., Svangariyaskul, A., Lawtrakul, L., y Toochinda, P. (2018, Jul 20). Process simulation based life cycle assessment for bioethanol production from cassava, cane molasses, and rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 190, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.152>
- Ree, R. (2013). The role of biorefining in a future bioeconomy. *Austria: IEA*.
- Rein, P. (2017). *Cane Sugar Engineering* (2nd ed.). Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Renó, M. L. G., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Buchgeister, J., y Almazan, O. J. E. (2011). A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. 36(6), 3716-3726.
- Rojas, D. C. (2009). *Análisis del ciclo de vida de la producción de azúcar crudo en la empresa azucarera Ecuador* [Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniería Química, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Rosas, D. C. (2017). *Software para el cálculo del impacto ambiental en la industria azucarera cubana*. [Tesis en opción al título de Ingeniería Informática, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Rowe, I. V. (2017a, Apr). 6th International Conference on Life Cycle Assessment in Latin America- CILCA 2015, Lima, Peru, July 13-16, 2015 Abstracts. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 479-484. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1272-4>
- Rowe, I. V. (2017b). Life Cycle Assessment: a tool for innovation in Latin America. *Int J Life Cycle Assess*, 22, 479-484. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1272-4>
- Santos, F., Rabelo, S. C., de Matos, M., y Eichler, P. (2020). Sugarcane biorefinery, technology and perspectives. *Academic Press*. <https://doi.org/https://doi.org710.1016/C2017-0-00884-4>
- Shaked, S., Crettaz, P., Saade-Sbeih, M., Jolliet, O., y Jolliet, A. (2015). *Environmental life cycle assessment*. CRC Press.

- Sharma, T., Dasgupta, D., Singh, J., Bhaskar, T., y Ghosh, D. (2020, Jan). Yeast lipid-based biofuels and oleochemicals from lignocellulosic biomass: life cycle impact assessment. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(1), 387-398. <https://doi.org/10.1039/c9se00540d>
- Singh, P., y Tiwari, A. K. (2018). *Sustainable sugarcane production*. CRC press.
- Sonnemann, G., Tsang, M., y Schuhmacher, M. (2018). *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes and Products*. CRC Press.
- Sosa, M. I. P. (2019). *Análisis técnico, económico y ambiental de una planta para la producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña*. [Tesis en opción al título de Ingeniería Química, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- Valverde, B. J. B. (2012). *Análisis del Ciclo de Vida para el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio utilizada como retardantes de flama* [Tesis en opción al título de máster en ciencias y tecnología ambiental, Universidad Central de Las Villas]. Villa Clara, Cuba.
- van der Poel, P. W., Schiweck, H. M., y Schwartz, T. K. (1998). *Sugar Technology: Beet and Cane Sugar Manufacture*. Verlag Dr. Albert Bartens KG.

ANEXOS

Anexo 1

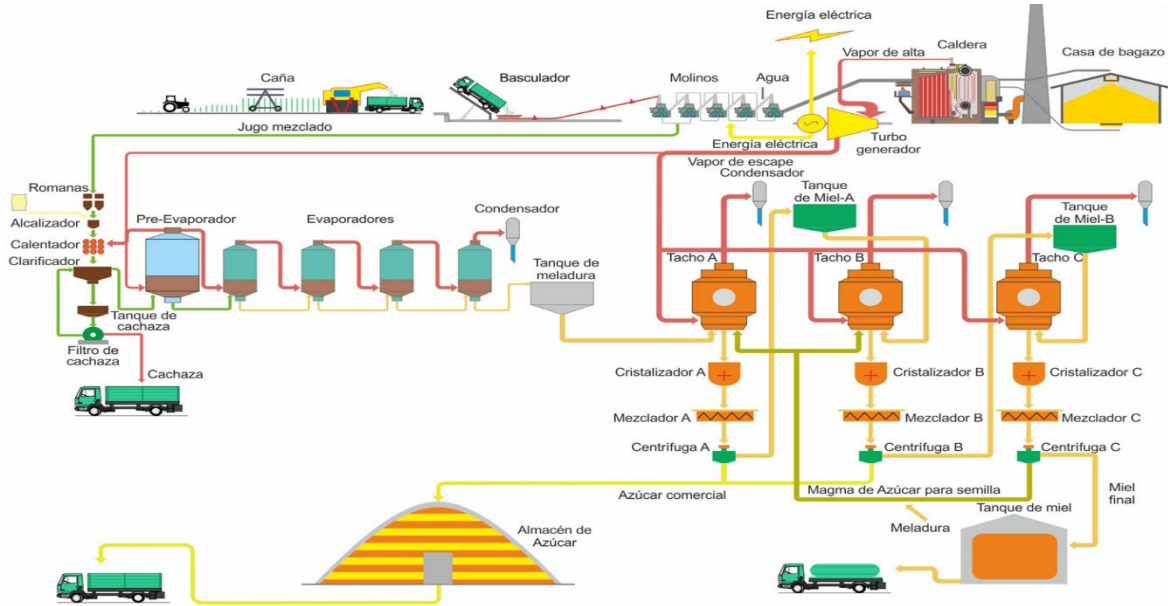


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo.

Fuente: www.azcuba.cu/es/infografia-del-proceso-de-fabricación-industrial

Anexo 2

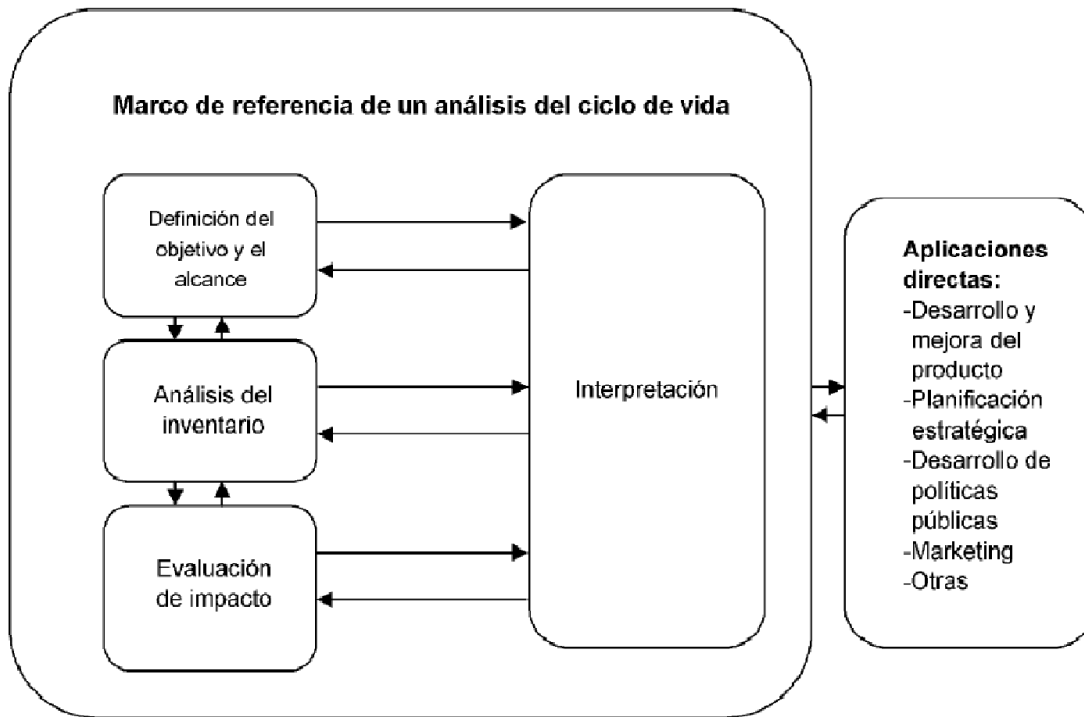


Figura 2. Etapas de un ACV. Fuente NC ISO 14 040: 2009.

Anexo 3

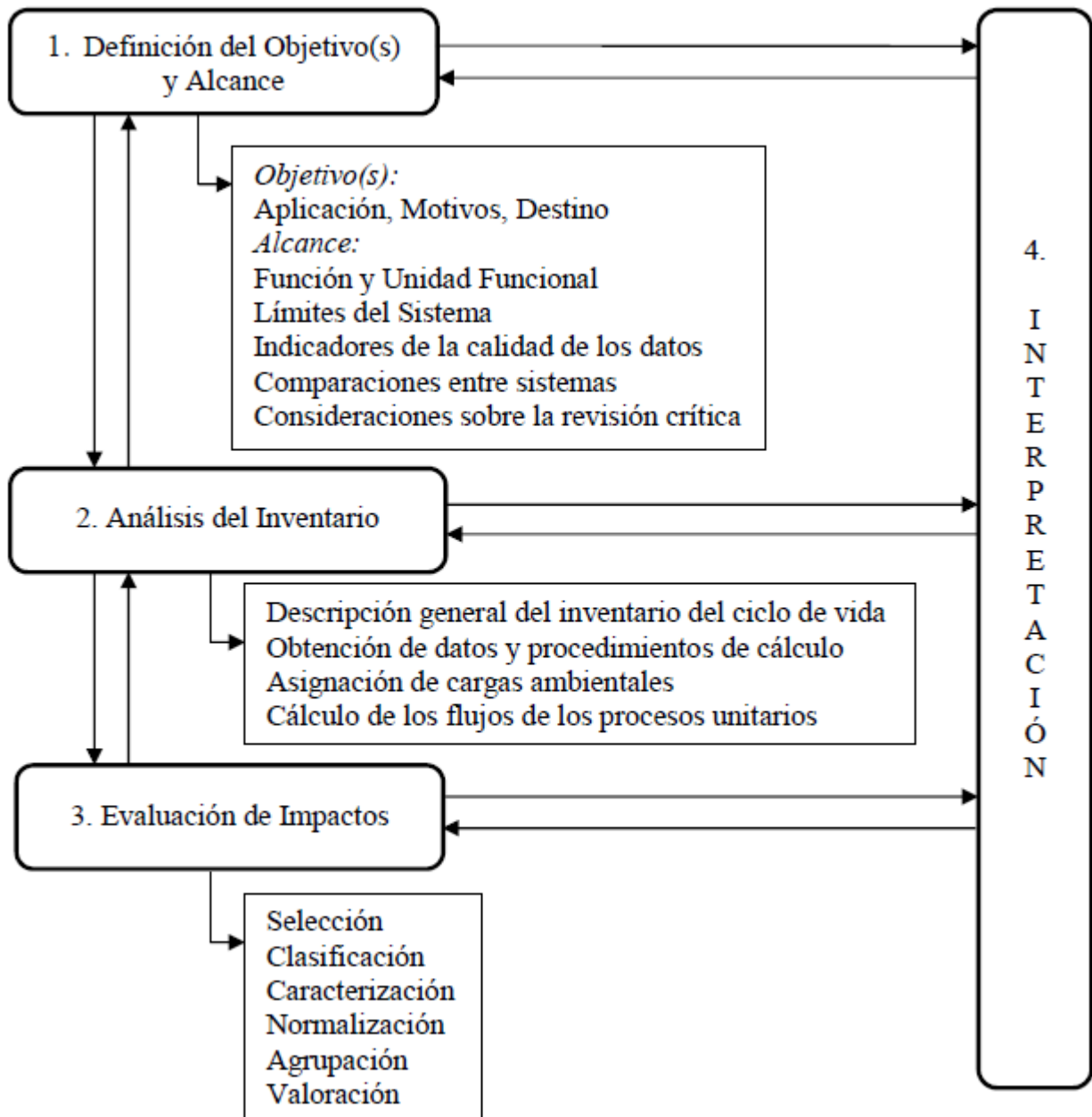


Figura 3. Resumen de las etapas de un ACV. Fuente: NC ISO 14 040: 2009.

Anexo 4

Tabla 1. Principales Herramientas Informáticas utilizadas en la elaboración de ACV.

Software	Compañía	País	Observaciones	Más información
Gabi	Stuttgart University	Germany	En contraste son las herramientas clásicas de ACV este programa ofrece además un análisis económico	www.gabi-software.com
Simapro	Pré-consultants	The Netherlands	Compara y analiza complejos productos descomponiéndolos en todos sus materiales y procesos	www.pre.nl
Boustead	Bousted Consulting	United Kingdom	Aplicación industria química, plásticos, acero,...	www.bousted-consulting.co.uk
LCAit	Chalmers Industriteknik	Sweden	Balance de energía y materiales. Aplicación principal en el sector envases y productos papel	www.ekologik.cit.chalmers.se
Euklid	Fraunhofer-Institut	Germany	productos industriales	www.ivv.fhg.de
KCL ECO	Finnish Pulp and Paper Research Institute	Finland	industria papelera	www.kcl.fi/eco/
WISARD	Pricewaterhouse Coopers	France	Análisis del impacto económico y ambiental del residuo sólido municipal	www.pwcglobal.com
Umberto	Ifeu-Institut	Germany	preparación de ACV , ecobalances empresariales	www.ifeu.de/umberto.htm
TEAM	Ecobilan	France	Muy completo, su base de datos incluye más de 500 módulos de diferentes sectores	www.pwcglobal.com

Fuente: (Pérez, 2017).

Anexo 5

ACV de la producción de azúcar de caña en Cuba.

Cuestionario para la colección de los datos del Inventario de Ciclo de Vida

Este cuestionario tiene como objetivo coleccionar los datos necesarios para la Evaluación del Ciclo de Vida de la producción de azúcar de caña para las condiciones de Cuba, que responde a la necesidad de disponer de una herramienta para la toma de decisiones en los estudios de diversificación, ya que complementa, desde el punto de vista ambiental global, los análisis técnico-económicos para lograr Producciones más Limpias en el sector azucarero.

La Evaluación del Ciclo de Vida considera todos los impactos durante la etapa agrícola e industrial del ciclo de vida de la producción de azúcar de caña, desde la adquisición de materias primas hasta la obtención del producto, incluyendo el transporte entre las etapas

Los datos proporcionados serán usados para desarrollar perfiles ambientales del proceso basados en las entradas y salidas al mismo, lo que puede resultar muy útil para la mejora del desempeño ambiental del proceso. Los datos particulares de una empresa pueden mantenerse anónimos, si es solicitado por la misma, es decir se garantiza confidencialidad sobre los datos, siempre que el propietario lo solicite, pero sí se requiere precisión y representatividad en la información.

Su información permitirá obtener resultados que reflejen el comportamiento ambiental de su proceso, que podrán ser aplicados directamente para identificar las áreas prioritarias con respecto a la introducción de mejoras, a la vez que permitirán ampliar y mejorar las bases de datos para la investigación y desarrollo de la herramienta de ACV en Cuba.

Por estas razones su cooperación será muy apreciada por el grupo de investigaciones relacionadas con el ACV del azúcar de caña en la Universidad de Matanzas.

Contactos: Javier Díaz Pineda < javier.pineda@umcc.cu >, Claudia Ramírez González < claudia.ramirez@est.umcc.cu >, Nainely Grillo Guzmán < nainely.grillo@est.umcc.cu >

Instrucciones

1. Lea el texto introductorio a cada tabla antes de llenar el cuestionario.
2. Indique donde se encuentra disponible la información suministrada (reportes, cálculos, etc).
3. Cuando el soporte de información esté disponible como documento independiente, por favor, adjunte el mismo, refiriendo a que página o tabla del cuestionario está asociado.

4. Si el formato que se ofrece, o parte de él, no es adecuado para suministrar sus datos, por favor copie la página de datos adecuada y adjúntela a este cuestionario, con los correspondientes comentarios.
5. Todos los datos deben referirse a la unidad funcional (producción diaria de azúcar en la instalación), incluyendo subproductos y residuales del proceso.
6. Tenga en cuenta el significado y abreviaturas que se indican en la Tabla para los diferentes índices.

Tabla 2. Cuestionario para el inventario en la industria azucarera

Índices de tipo de transporte
A- Camiones grandes, diésel B- Camiones pequeños, diesel C- Camiones pequeños, gasolina D- Transporte por ferrocarril E- Transporte por barco F- Otros (especificar en la sección de comentarios)
Índices de indicador de calidad de datos
M- Medidos C- CalculadosE- Estimados A- Asumidos
Índices de métodos de tratamiento / disposición de aguas residuales
A- Descarga directa en aguas superficiales B- Descarga en lagunas de oxidación C- Descarga en alguna otra instalación de tratamiento de residuales D- Descarga directa al suelo E- Uso para fertirriego F- Otros (especificar en la sección de comentarios)
Índices de manejo de subproductos del proceso
D- Descarga directa al suelo R- Reciclado (especificar en la sección de comentarios) U- Utilización con diferentes fines (especificar en la sección de comentarios)

A continuación, se presentan siete tablas que facilitan la colección de los datos atendiendo a las diferentes categorías.

Tabla 3. Información general de la instalación

1. Nombre de la empresa:
2. Nombre de la instalación:
3. Localización (dilección):
4. Productos que se obtienen:
5. Nombre de quien ofrece la información:
6. Cargo:
7. Teléfono:
8. Fax: Email:
9. Fecha:

Tabla 4. Información sobre la producción de azúcar

1. Producción anual de los últimos tres años (t):
2. Destino de la producción (mercado nacional o internacional):
3. Breve descripción de la instalación para la producción de azúcar:
4. Eficiencia y rendimiento en los últimos tres años:
5. Información sobre la transportación del producto:

Destino (ciudad o país)	Distancia (km)	Tipo de Transp.	Capacidad (t)	Carga real. (t)	No viajes Retorno vacío (Sí/No)
a)
b)
c)
d)
e)

Tabla 5. Entradas de materiales primarios y auxiliares en la etapa agrícola e industrial

1. Los materiales primarios son aquellos que pasan a formar parte del producto y los auxiliares los que asisten la producción pero no pasa a formar parte del producto
2. Suministre el No. de CAS del producto químico de que se trate
3. Especifique las cantidades de productos por año, consumidos durante los tres últimos años.
4. Especifique los contenidos de cada material que se reciclan
5. Utilice las abreviaturas especificadas en las instrucciones para cada índice.

Materiales 1 ^{os} Etapa Agrícola	CAS #	Cantidad Por un. funcional	Un.	DQI	Cantidad que se recicla	Cantidad Anual consumida	Información sobre transporte					Fuente de datos	
							Dist.	T. transp	# viajes	Capac.	C. real		ret. vacío
Semilla													
Energía solar													
Agua													
Mat. Aux. Etapa Agric.													
Ocupación terreno													
Combustible													
Fertilizantes													
Pesticidas													

Comentarios sobre las características (datos disponibles) de las operaciones de siembra, fertilización, irrigación, cosecha y transporte

Materiales 1^{os} Etapa Ind.	CAS #	Cantidad Por un. funcional	Un.	DQI	Cantidad que se Recicla	Cantidad Anual consumida	Información sobre transporte						Fuente de datos
							Dist.	T. transp	# viajes	Capac.	C. real	ret. Vacío	
Caña de azúcar													
Agua													
Materiales Auxiliares Etapa Ind.													
Cal													
Aire													
Hidróxido de sodio													
Acido clorhídrico													
Transporte													
Agua													
Sulfato de amonio													
Acido sulfúrico													

Comentarios:

Tabla 6. Entradas de utilidades

Utilidades	Cantidad anual	Cantidad por un. funcional	Un.	DQI	Información sobre transporte						Fuente de datos
					Distancia	Tipo Transp.	# de viajes	Capac.	Cap. Real	Ret. vacío	
Electricidad de Red Nac.											
Agua suavizada											
Combustible											
Aire											
Vapor											
Generación propia (Cogeneración)											

Comentarios:

Tabla 7. Emisiones al aire

1. Se relacionan las emisiones más significativas, usted puede adicionar cuantas crea necesarias

Emisiones	Etapas	CAS #	Cantidad por un. Funcional	Cantidad anual	Un.	DQI
Material particulado						
SOx						
NOx						
CO2						

Comentarios:

Tabla 8. Emisiones de aguas residuales

1. Incluya todas las corrientes residuales
2. Si tiene certificación de caracterización de residuales, adjúntela al cuestionario
3. Exprese claramente las unidades de cada parámetro
4. Preferentemente presente record de caracterización durante los tres últimos años

Tabla 8.a

Corriente de agua residual	Cantidad	Un.	DQI

Tabla 8.b

Parámetro	CAS #	Concentración	Un.	Método de trat./disposición
ST				
SS				
SD				
DQO				
DBO				
Grasas				
P				
N				
K				
pH				
...				

Comentarios:

Tabla 9. Subproductos del proceso

Subproducto	Cantidad anual	Cantidad por unidad funcional	Un.	DQI	Destino	Información sobre transporte					
						Dist	T.Tran.	#viajes	Cap.	Cap.Real	R. vac
RAC											
Bagazo											
Mieles											
Cachaza											
Cenizas											

Comentarios

Anexo 6

Tabla 10. Inventario de datos primarios. Subsistema Agrícola.

Subsistema Agrícola.				
Entradas	Unidad	Cantidad	Fuente de dato	
Pesticidas				
Diuron	t/d		Reportes de la empresa	
Glyphosate	t/d		“	“
Gesapox 80	t/d		“	“
MSMA 72	t/d		“	“
Sal de Amina 72	t/d		“	“
Esterisocílico48	t/d		“	“
Asulox 40	t/d		“	“
Finale 15	t/d		“	“
Gramoxone	t/d		“	“
Doblete20	t/d		“	“
Amigan65	t/d		“	“
Merlin75	t/d		“	“
Sulfatante90	t/d		“	“
Agrotín	t/d		“	“
Fertilizantes				
Urea	t/d		“	“
Superfosfato Triple (P ₂ O ₅).	t/d		“	“
Cloruro de Potasio (K ₂ O).	t/d		“	“
Diesel	t/d		Reportes de consumo actividades agrícolas	
Semilla de caña	t/d		Cálculo por índices (Valdés, 2005)	

			http://www.fao.org/DOCREP	
Energía Solar	GJ/d		Cálculo por software Univ. Massachusetts (2002) http://energy.caeds.eng.uml.edu	
Uso de la tierra	Ha/d		Reportes de la empresa	
Cosecha	Ha/d		“ “	
Fertilización	Ha/d		“ “	
Siembra	Ha/d		“ “	
Irrigación	Ha/d		“ “	
Transporte de RAC	tkm.		Reportes de las empresas	
Salidas				
Caña	t/d		Reportes de las empresas	
RAC	t/d		Cálculo por índices (Valdés, 2005)	
			http://www.fao.org/DOCREP	
Emisiones				
Consideradas				
Emisiones de N total al agua	t/d		Emission Factor Documentation (EPA, 1997).	
Emisiones de	t/d		“ “	
pesticidas al agua				
Emisiones	t/d		“ “	
pesticidas al suelo				
Emisiones de N ₂ O al aire	t/d		“ “	

Anexo 7

Tabla 11. Inventario de datos primarios. Subsistema Industrial. Alternativa I

Subsistema Industrial			
Entradas	Unidad	Cantidad	Fuente de dato
Hidróxido de calcio.	t/d		Balances de materiales y energía
Hidróxido de sodio. 50% en H ₂ O.	t/d		" "
Ácido clorhídrico 30% in H ₂ O	t/d		" "
Caña	t/d		" "
Transporte de la caña.	tkm		" "
Agua	t/d		" "
Aire	t/d		" "
Ablandamiento del agua	t/d		" "
Transporte de la cachaza	tkm		Estimado por reportes de la empresa
Transporte de las cenizas	tkm		" "
Salidas			
Azúcar	t/d		Balances de materiales y energía
Miel Final	t/d		" "
Energía exportada a la red nacional	GJ/d		" "
Cachaza como fertilizante	t/d		Balances de mat. y energía- Análisis de emisiones, otros datos
Cachaza (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Cachaza (K ₂ O equiv.)	t/d		" "
Cachaza (Urea equiv.)	t/d		" "
Cenizas como fertilizante	t/d		" "
Cenizas (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Cenizas (K ₂ O equiv.)	t/d		" "
Agua residual como fertilizante	t/d		Caracterización de residuales
Agua residual (Urea equiv.)	t/d		" "
Agua residual (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Emisiones al aire			
Material particulado (PM-10)	t/d		Análisis de emisiones (EPA, 1997)
Óxidos de nitrógeno	t/d		" "

Anexo 8

Tabla 12. Inventario de datos primarios. Etapa Industrial. Alternativa II

Etapa Industrial			
Entradas	Unidad	Cantidad	Fuente de dato
Hidróxido de calcio.	t/d		Balances de materiales y energía
Hidróxido de sodio. 50% en H ₂ O.	t/d		" "
Ácido clorhídrico 30% in H ₂ O	t/d		" "
Caña	t/d		" "
Transporte de la caña.	tkm		" "
Agua	t/d		" "
Aire	t/d		" "
Ablandamiento del agua	t/d		" "
Sulfato de amonio	t/d		Balances de materiales y energía
Ácido sulfúrico	t/d		" "
Levadura	t/d		" "
Agua	m ³		" "
Transporte de las cenizas	tkm		Estimado por reportes de la empresa
Salidas			
Azúcar	t/d		Balances de materiales y energía
Energía exportada a la red nacional	GJ/d		" "
Miel Final para alcohol	t/d		" "
Etanol	t/d		" "
Vinazas para biogás	t/d		" "
Biogás	t/d		" "
Residual (Urea equiv.)	t/d		" "
Residual (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Residual (K ₂ O equiv.)	t/d		" "
Cenizas como fertilizante	t/d		Balances de mat. y energía- Análisis de emisiones, otros datos
Cenizas (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Cenizas (K ₂ O equiv.)	t/d		" "
Cachaza y Agua residual para biogás	t/d		" "
Biogás	t/d		" "
Residual (Urea equiv.)	t/d		" "
Residual (P ₂ O ₅ equiv.)	t/d		" "
Residual (K ₂ O equiv.)	t/d		" "
Emisiones al aire			
Material particulado (PM- 10)	t/d		Análisis de emisiones (EPA, 1997)
Oxidos de nitrógeno	t/d		" "