



UNIVERSIDAD DE MATANZAS
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química

**TRABAJO DE DIPLOMA
EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**Metodología para la evaluación de alternativas de
gestión de subproductos y residuos de la agroindustria
azucarera mediante Análisis de Ciclo de Vida**

AUTORA: Claudia Ramírez González

TUTOR: M.Sc. Javier Díaz Pineda

Matanzas, 2021

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL

Yo, Claudia Ramírez González, declaro que soy la única autora del siguiente Trabajo de Diploma, titulado: *Metodología para la evaluación de alternativas de gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera mediante Análisis de Ciclo de Vida*, 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, 1 de diciembre de 2021.

Claudia Ramírez González

PENSAMIENTO

Cuando estamos motivados por metas que tienen un significado profundo, por sueños que necesitan completarse, por puro amor que necesita expresarse, entonces vivimos verdaderamente la vida.

Greg Anderson

DEDICATORIA

A mis padres, Elizabeth y Guillermo porque son mi motor impulsor, mi guía y mi luz en los momentos más oscuros.

A Enriquito, por ser la personita más hermosa que he visto jamás y que me hace continuar cada día.

A toda mi familia, por su incondicional apoyo frente a cualquier adversidad.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos:

A mi madre y a mi padre por haberme guiado hasta aquí y nunca desistir.

A mis hermanos por su apoyo, confianza y sobre todo peleas.

A mis sobrinos: Elizabeth y Enriquito, pues por ustedes aprendí lo q es ser realmente feliz.

A mi Yoyi, por su amistad, las tardes de oseo, porque lo extraño un montón y quisiera tenerle cerca.

A mi tutor, por su empeño, dedicación y esfuerzo.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo realizar una propuesta metodológica para la evaluación del impacto ambiental generado por alternativas tecnológicas empleadas en la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para ello, primeramente, se realiza una revisión bibliográfica sobre el uso de la metodología de ACV en la producción de azúcar y derivados. Para este estudio se eligió la Empresa Azucarera Jesús Rabi del municipio de Calimete y se proponen tres alternativas para la valorización de subproductos y residuos, con la finalidad de minimizar la generación de emisiones contaminantes al medio ambiente. La metodología propuesta, se desarrollará 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. 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. Con el estudio de las alternativas se analizan las ventajas ambientales de la producción de biogás, alimentos para animales y fertilizantes a partir de subproductos y residuos de la producción de azúcar de caña, con el objetivo de identificar y cuantificar los aspectos que tienen el mayor impacto ambiental en cada alternativa y sugerir mejoras a la industria.

ABSTRACT

The goal of this research is to carry out a methodological proposal for the evaluation of the environmental impact generated by technological alternatives used in the management of by-products and residues of the sugar agroindustry through Life Cycle Assessment (LCA). To do this, first a bibliographic review is carried out on the use of the LCA methodology in the production of sugar and derivatives. For this study, the Jesús Rabí Sugar Company of the municipality of Calimete was chosen and three alternatives are proposed for the recovery of by-products and waste, in order to minimize the generation of polluting emissions to the environment. The proposed methodology will be developed following the guidelines of the ISO 14040 series standards, using the SimaPro 8.0 software, the Ecoinvent 3 database and the ReCiPe 2016 method. 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. With the study of the alternatives, the environmental advantages of the production of biogas, animal feed and fertilizers from by-products and residues of the cane sugar production are analyzed, with the aim of identifying and quantifying the aspects that have the greatest impact in each alternative and suggest improvements to the industry.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1. La agroindustria azucarera y el medio ambiente.....	4
1.1.1. Situación actual de la industria del azúcar de caña y sus derivados en Cuba	5
1.1.2. Etapas del proceso de producción de azúcar crudo	7
1.1.2.1 Etapa de recepción, preparación y molienda de la caña de azúcar.....	7
1.1.2.2. Etapa de purificación.....	9
1.1.2.3. Etapa de evaporación y concentración	10
1.1.2.4. Cristalización y centrifugación.....	11
1.1.3. Principales impactos ambientales de la agroindustria azucarera	11
1.1.4. Metodologías para evaluar impactos ambientales	12
1.2. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental	14
1.3. Fundamentos generales de la metodología del ACV	15
1.4. Modelación del Inventario de Ciclo de vida (ICV).....	17
1.4.1. Inventario del ciclo de vida del azúcar de caña.....	20
1.4.2. Parametrización del Inventario del Ciclo de Vida.....	20
1.4.3. Análisis de incertidumbre del ICV.....	23
1.5. Métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida	24
1.6. Herramientas informáticas comerciales utilizadas para el ACV.....	26
1.7. Antecedentes del ACV en la agroindustria azucarera	28
1.8. Conclusiones parciales	29
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1. Definición de objetivos y alcance del ACV.....	33
2.1.1. Objetivos del estudio.....	33
2.1.2. Alcance del estudio.....	34
2.1.2.1. Función y descripción del sistema en estudio	34
2.1.2.2. Selección de la unidad funcional.....	34
2.1.2.3. Establecimiento de los límites del sistema	35
2.1.2.4. Asignación de cargas ambientales.....	36
2.1.2.4.1. Variantes agroindustriales de la industria azucarera cubana.....	37

2.1.2.5. Tipos de impacto a evaluar, metodología e interpretación.....	39
2.1.2.6. Suposiciones y limitaciones	39
2.1.2.7. Requisitos de calidad de los datos	40
2.2. Desarrollo del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).....	41
2.2.1. Inventario del subsistema agrícola.....	42
2.2.2. Inventario del subsistema industrial.....	45
2.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)	47
2.3.1. Clasificación	48
2.3.2. Caracterización.....	51
2.4. Interpretación de los resultados	52
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXOS	64

INTRODUCCIÓN

La agroindustria azucarera y sus derivados es considerada como uno de los sectores estratégicos para el desarrollo y la transformación productiva del país, según el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030 (PNDES). 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. 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).

La caña de azúcar ofrece posibilidades de valorización integral a través del procesamiento de subproductos, con un gran potencial en el mercado nacional e internacional. Los subproductos de la industria azucarera se pueden agrupar en etapas: los que se originan durante la cosecha (etapa agrícola) son las hojas y cogollos, los que se forman durante el proceso industrial incluyen el bagazo, cachaza y melaza. El bagazo se usa como combustible para producir vapor y electricidad para el propio proceso de la industria y el exceso de electricidad se entrega a la red nacional. También, las aguas residuales de la industria azucarera pueden ser de utilidad económica a través de la producción de biogás y la fertirrigación de los suelos (Almazán et al., 2016).

Diferentes trabajos (Contreras *et al.*, 2009; Luo *et al.*, 2009; Moya *et al.*, 2013; Prasara *et al.*, 2019) consideran la diversificación de la industria azucarera como una estrategia de desarrollo lógica y económicamente ventajosa debido al alto valor que se puede obtener de la caña y sus derivados, junto a los beneficios ecológicos existentes. Sin embargo, el análisis científico disponible que evalúa todo el impacto ambiental generado por las etapas de producción de azúcar con o sin procesamiento de subproductos es limitado. La evaluación económica y ambiental de las diferentes opciones de diversificación es de primordial importancia para optimizar el uso de los recursos y reducir el impacto ambiental asociado.

La evaluación de la sostenibilidad ambiental de una alternativa tecnológica requiere la consideración de todo el ciclo de vida del producto, que puede lograrse mediante la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que aborde el problema ambiental del producto. Este análisis va desde la adquisición

de la materia prima hasta la disposición final (desde la cuna hasta la tumba), a través de las cuatro etapas del ACV: definición de objetivos y alcance, análisis del inventario, evaluación de impacto e interpretación. Actualmente, el ACV puede considerarse una de las mejores herramientas para la evaluación de la sostenibilidad de opciones tecnológicas, ya que tiene en cuenta todos los efectos en el ecosistema y la población. La metodología de ACV integra todos los impactos ambientales ocurridos a lo largo del ciclo de vida del producto y los relaciona con problemas ambientales específicos, permitiendo detectar situaciones en las que un determinado sistema parece “más limpio” que otro simplemente porque transfiere las cargas ambientales a otros procesos o región geográfica, sin un mejoramiento real desde el punto de vista global, además permite establecer prioridades para definir las estrategias preventivas de mejoramiento del desempeño ambiental. Un ACV completo es costoso y requiere tiempo, pero este puede retornar significativas ganancias en disminución de impactos, conservación de recursos y reducción de costos. Además, las técnicas computarizadas muestran avances en la facilidad y eficacia del método. SimaPro 8.0 es una poderosa herramienta que permite modelar cualquier ciclo de vida y analizar sus resultados inmediatamente, es el software para ACV más usado (Contreras *et al.*, 2009; Curran, 2017).

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. 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, ya que, si los cambios no se hacen en concordancia con el medio ambiente, se corre el riesgo de estancarse ante las exigencias ambientales actuales. Por otra parte, la literatura muestra que el aprovechamiento integral de la caña de azúcar mediante la industrialización de subproductos y derivados permite la diversificación de la economía nacional con gran aporte ecológico y que el estudio de las posibilidades que ofrece la caña de azúcar se ha abordado profundamente desde el punto de vista técnico-económico y teóricamente desde el punto de vista ambiental regional, pero no existe en Cuba una evaluación ambiental cuantitativa y global que permita comparar las alternativas de diversificación que pueden ser analizadas.

Además, 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.

Ubicada en la parte más oriental del municipio de Calimete en la provincia de Matanzas, se encuentra la Empresa Azucarera Jesús Rabí, 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, que permite evaluar el impacto ambiental a partir de nuevas alternativas tecnológicas en el maco productivo.

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?

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, se podrá evaluar cuantitativamente el impacto ambiental generado por diferentes alternativas tecnológicas empleadas en la gestión de subproductos y residuos en dicha industria.

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 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 derivados.
2. Proponer alternativas tecnológicas para la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera 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 este capítulo se aborda todo lo relacionado con el Análisis del Ciclo de Vida del azúcar de caña, a partir de la utilización de diferentes fuentes bibliográficas. Para ello, se analizan las etapas del proceso de producción de azúcar de caña, así como su situación actual en Cuba y los impactos medioambientales ocasionados por esta industria. Posteriormente, se profundiza en el Análisis del Ciclo de Vida como herramienta de evaluación ambiental, sus fundamentos generales, los métodos de evaluación de impacto y las herramientas informáticas comerciales utilizadas para este. También se evalúa los antecedentes de aplicación del Análisis del Ciclo de Vida en la industria azucarera. Las recopilaciones de estos elementos hacen posible el desarrollo de la investigación.

La investigación se realiza mediante búsqueda bibliográfica en bibliotecas científico técnicas y en las diferentes bases de datos disponibles en internet, a través del uso de buscadores existentes, como: Google, AltaVista, Scirus, entre otros. Además, se emplean bases de datos remotas (EBSCO, ScienceDirect, entre otros) y bibliotecas virtuales de química e ingeniería química.

1.1. La agroindustria azucarera y el medio ambiente

Dentro del sector industrial, la producción de azúcar crudo se considera uno de los procesos más importantes en el área de la industria alimentaria y el comercio, por los innumerables aportes que realiza a la economía del país. Cualquier investigación dirigida a aumentar la calidad y eficiencia del proceso de producción de azúcar crudo, beneficia la sociedad (Almazán *et al.*, 2016).

Si esta industria no está controlada adecuadamente, puede provocar contaminación ambiental o riesgos ecológicos de distintas formas: descargas de residuos orgánicos o gases que empeoran la calidad del aire y producen sustancias tóxicas; uniéndose a esto el uso de tecnologías anticuadas.

El impacto que han ocasionado las actividades industriales sobre el medio ambiente no es un fenómeno de nuestro tiempo, aunque el impacto causado por el hombre primitivo que comenzó a asentarse en comunidades agrícolas, fue prácticamente insignificante. Con la Revolución industrial la sociedad se desarrolló y se logró un aprovechamiento más amplio de la naturaleza, pero la industrialización trajo consigo la contaminación del medio ambiente (Armenteros *et al.*, 2018; Bach, 2019).

Actualmente, el hombre con su acción descontrolada sobre la naturaleza, ha provocado daños irreparables al planeta que son casi irreversibles y provocan un desequilibrio natural, entre ellas: la contaminación del aire, el suelo y el agua, como resultado de las actividades agrícolas e industriales.

La conservación del medio ambiente debe considerarse como un sistema de medidas dirigidas a la utilización racional de los recursos naturales y la defensa del medio ambiente ante la contaminación (Planos Gutiérrez *et al.*, 2012; NC ISO 14 001: 2004).

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

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 alcohol, aguardiente y otras bebidas alcohólicas, la miel urea Bagacillo y el bagazo para la cogeneración de energía (Almazán *et al.*, 2016).

La caña de azúcar constituye una planta excepcional cuyo potencial genético no está siendo bien aprovechado en la fabricación de otros disímiles productos. A pesar de que la industria azucarera ha tenido una amplia expansión en la mayor parte de los continentes, y de que su producción ha ido en ascenso constantemente, el desarrollo de los derivados comienza a iniciarse después del presente siglo. De dicha planta es posible obtener energía convencional y alimentos en una cierta competencia conciliable, sucediendo lo mismo con los residuales industriales y evitando a su vez la degradación del medio ambiente (Morrell, 2012).

El proceso de instalación de nuevos centrales o la conversión de las antiguas manufacturas en modernas fábricas se extendió a todo el país, la que asumió diferentes características por regiones. En la región central el fenómeno se manifiesta de forma tardía en comparación con el Occidente. Según Moreno (2014), al señalar... “no existió un ingenio tipo, con mantenidas características a lo largo del tiempo y el espacio cubanos. Por el contrario, dentro de cada época y en las distintas regiones hubo siempre diferencias notables entre diversas manufacturas según la capacidad productiva, tecnología, carácter de antiguas o recién fundadas y otros parámetros específicos”.

Para Cuba, este fenómeno ha sido igualmente adverso, la instalación de un sistema Generador de Vapor- Turbo Generador requería una inversión de al menos 40 millones de dólares referidos al índice de costo en el año 2000 (Pérez *et al.*, 2009) que estimado para el año 2015 es de 58,2 millones de dólares; lo que evidencia desde un punto de vista práctico la necesidad de aumentar la eficiencia en la generación y consumo de vapor para que en base a la tecnología existente obtener resultados, no tan distantes al que se tendrían si se pudiesen adquirir cabalmente la tecnología existente en el primer mundo.

En los últimos tiempos se ha fomentado en nuestro país iniciativas para la diversificación de la producción de los derivados de la caña de azúcar en aras de incrementar la capacidad comercial y la sustitución de importaciones de acuerdo a la política económica seguida a raíz del Sexto Congreso del Partido (específicamente en el lineamiento no. 211 referido a la agroindustria azucarera que plantea: “realizar un incremento en la producción de azúcar, con el objetivo de cubrir los gastos operacionales, realizándose un aporte neto para el país”). Según Armenteros *et al.* (2016) se ha avanzado en la fabricación de productos biotecnológicos en el sector, aunque no a gran escala, como es el caso del Fitomás, un bioestimulante muy barato en comparación con el Biotec o Vitzamine, ambos producidos en el exterior. También ha crecido la producción de proteína unicelular, de hongos *Pleurotus* (altamente valorado en la gastronomía internacional), de Hidrocoloides, de *Azospirillumsp.*, bacteria fijadora de nitrógeno cuyo medio de cultivo pueden ser los residuales de destilería (altamente contaminantes) entre otros que ha demás de poner bien en alto el talento científico de los azucareros cubanos, suponen una promesa para el fortalecimiento de la industria.

La agroindustria azucarera cubana, debido a las transformaciones que se han estado efectuando en la misma desde el año 2002 y que comenzaron con la desactivación de 95 fábricas de azúcar, cuenta actualmente con 56 ingenios, de ellos 46 estuvieron operando durante la zafra 2011-2012. La producción de derivados de la caña de azúcar también se incluye dentro de las transformaciones y proyecciones de desarrollo planificadas para el sector, por su decisivo aporte a soluciones necesarias en las esferas de la alimentación animal, la producción de alcoholes y de bioproductos. La obtención industrial de derivados, a partir de los productos y coproductos de la agroindustria azucarera cañera en nuestro país, ha pasado por etapas de auge y desarrollo, descapitalización y deterioro, así como por la interrupción de inversiones y/o el cese de producciones establecidas. Adicionalmente, y a partir del 2006, comenzó en el sector una etapa que continúa hasta el presente, de rehabilitación y modernización de las destilerías para la producción de alcoholes de diferentes calidades (PCC, 2017).

En el pasado 2017, se produjeron 2 millones de toneladas de crudo, la cifra más alta de las últimas 15 cosechas, creciendo la zafra en un 20 % con respecto al 2016 a pesar de las afectaciones ocasionadas por la sequía. Dicha zafra contó con la participación de 54 ingenios, la mayor cantidad desde que se efectuó el proceso de redimensionamiento de la agroindustria y la rama de los derivados tuvo un buen comportamiento, destacándose la producción de alimento animal, renglón que se cumplió y creció 48% respecto al año anterior, con la producción de 199 000 toneladas (Pérez, 2017).

La industria azucarera, como es conocido, tiene la ventaja de ser auto energética, o sea que se autoabastece de energía y no necesita ningún combustible externo para utilizarlo en su proceso productivo, pudiendo además entregar electricidad a la red nacional, para lo que actualmente tiene todos los centrales azucareros sincronizados al sistema electro energético nacional (Gil *et al.*, 2013).

1.1.2. Etapas del proceso de producción de azúcar crudo

El proceso de producción de azúcar crudo comienza con la etapa de cultivo donde es necesario preparar el terreno, para ello, se estudian las potencialidades de regadío, las variedades de caña de acuerdo a la programación de corte, entre otras actividades que garantizan una efectiva constitución de azúcar en la caña(Rein, 2017).

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 (Rein,2017). El diagrama de flujo de este proceso se presenta en el ANEXO 1 donde se especifican las principales operaciones de cada etapa.

El proceso tecnológico de producción de azúcar crudo se puede dividir en cuatro grandes etapas:

1. Recepción, preparación y molienda de la caña.
2. Purificación y calentamiento.
3. Evaporación.
4. Cristalización y centrifugación.

1.1.2.1 Etapa de recepción, preparación y molienda de la caña de azúcar

El proceso de producción de azúcar comienza en los cañaverales, donde se cultiva la caña de azúcar y luego se corta de forma automatizada. Se transporta en camiones hasta el central, donde se pesa y muestrea cada una hora en el laboratorio, para verificar la calidad de la materia prima(Hugot, 1986).

Una vez pesada la caña, esta es descargada en el basculador, el cual está formado por una estera transportadora y una elevadora que conducen la caña hacia los equipos de preparación, que facilitan el posterior proceso de extracción del jugo en los molinos. Dentro de estos equipos de preparación, se encuentran el rompe bultos o gallegos, dos niveladores y dos juegos de cuchillas. El basculador es el encargado de recepcionar la caña y entregarla al área de preparación del colchón de caña, esta pasa por

los niveladores y después por las cuchillas, para cortar la caña en pequeños trocitos o astillas para facilitar el trabajo de los molinos. 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 (Rein,2017)

La caña preparada por las picadoras llega a los molinos, constituidos cada uno de ellos por dos o tres mazas metálicas y mediante presión se extrae el jugo de la caña. Cada molino está equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino se agrega agua de imbibición, generalmente caliente, para extraer al máximo la cantidad de sacarosa que contiene el material fibroso. Este proceso de extracción es llamado maceración (Bianchini, Magalhães, & Braunbeck, 2001).

La extracción de jugo se lleva a cabo en la planta moledora. Para ello es necesario sumar al alto grado de preparación obtenido la aplicación de la maceración combinada y presiones hidráulicas (De Matos *et al.*, 2020; Falcón *et al.*,1995)

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. 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).

1.1.2.2. Etapa de purificación

Esta etapa tiene por objetivo fundamental, alcanzar la mayor separación posible de impurezas presentes en el jugo logrando que en su mayoría salgan en forma de cachaza seca y lograr que la mayoría de dichas impurezas salgan del proceso como sólidos secos, mediante procedimientos químicos y físicos. En esta etapa se pretende eliminar la materia fina y coloidal en suspensión que contiene el jugo mezclado. (Falcón *et al.*, 1995).

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 (Morell, 1985).

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).

La clarificación del jugo se da por sedimentación; por lo que el jugo claro queda en la parte superior del tanque. Este jugo sobrante se envía a los evaporadores y la cachaza sedimentada, que todavía contiene sacarosa, pasa a un proceso de filtración antes de verterse al campo para el mejoramiento de suelos con deficiencia de materia orgánica (White *et al.*, 2006).

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. Este subproducto de la producción azucarera contiene gran parte de materia orgánica coloidal dispersa en el jugo, la cual al alcalinizar se precipita con los aniones orgánicos en forma de sales de calcio, junto con otros materiales que son arrastrados en estos precipitados (Gálvez, 2000).

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 (Hugot, 1986).

1.1.2.3. Etapa de evaporación y concentración

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 (Cortés *et al.*, 2021).

Se comienza a evaporar el agua del jugo que se recibe en los evaporadores con un porcentaje de sólidos solubles entre 10 y 12 % y se obtiene una meladura o jarabe con una concentración aproximada de sólidos solubles del 55 al 65 %. En el proceso de evaporación se obtiene el jarabe o la meladura. Se utilizan evaporadores de múltiples efectos al vacío, que consisten en una solución de celdas de ebullición dispuestas en serie (Rein, 2017).

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 % (Rein, 2017).

1.1.2.4. Cristalización y centrifugación

El proceso continúa con la etapa de cristalización, la cual se divide en tres sub etapas: cristalización en caliente, donde se origina el cristal de sacarosa; cristalización en frío, donde se desarrolla el grano; y centrifugación, donde se separa el cristal de sacarosa de la miel. 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 (Rein, 2012).

La masa pasa por las centrífugas (máquinas giratorias en las cuales los cristales se separan del licor madre), por medio de una masa centrífuga aplicada a tambores rotatorios que contienen mallas interiores. La miel que sale de las centrífugas se bombea a tanques de almacenamiento para luego someterla a superiores evaporaciones y cristalizaciones en los tachos. Al cabo de dos cristalizaciones sucesivas se obtiene una miel final (melaza) que se retira del proceso y se comercializa como materia prima para la elaboración de alcoholes (Acosta *et al.*, 2011).

1.1.3. Principales impactos ambientales de la agroindustria azucarera

Según NC ISO 14001: 2004 el MA se conforma por dos medios: el físico y el socio-económico. Todos los autores coinciden en que es algo amplio y complicado en el que se enfatiza la relación entre la sociedad y la naturaleza, ya que esta última le sirve a la primera para su actividad existencial y que el mismo está conformado por dos medios: el físico y el socioeconómico.

Según NC 14040: 2009, el medio ambiente es el entorno en el cual una organización opera, incluidos el aire, el agua, el suelo, los recursos naturales, la flora, la fauna, los seres humanos y sus interrelaciones.

Entre las inminentes amenazas que comprometen a corto plazo, no solamente la calidad de vida de la humanidad y demás especies animales y vegetales, sino la propia supervivencia de los seres vivos, se encuentra la contaminación del medio ambiente, que se encuadra en el campo de lo social, teniendo en

este ámbito un aspecto industrial muy relevante, lo que ha impulsado a considerarla como una característica más de la gestión empresarial (Herrera, 2012).

En la industria azucarera la mayoría de los subproductos del proceso son considerados fuentes de contaminación, por tanto, presenta un riesgo para el medio ambiente. Las aguas residuales que llevan consigo una cantidad de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, que pueden ser contaminantes de las fuentes de agua si no reciben un tratamiento adecuado. Los mostos o vinazas de residuos alcohólicos, son productos viscosos con 4 a 10 °Brix, que a temperaturas y concentraciones altas son muy corrosivos. La cachaza o torta de filtro, físicamente es el principal residuo de la industria del azúcar de caña, con una producción entre 30 y 50 kg t⁻¹ de materia prima procesada, lo cual representa entre 3 y 5 % de la caña molida (García *et al.*, 2011).

Otro residuo del proceso de transformación de la caña es la producción de dextrana. Las dextranas son polisacáridos de elevado peso molecular y baja solubilidad; son compuestos indeseables, su contenido en la propia caña es muy bajo, pero se forman por acción de la enzima dextranasacarasa de microorganismos contaminantes que se alojan en la savia de la planta o la atacan posteriormente al ser dañada su corteza (Rodríguez, 2013a).

Con el fin de ocupar menos espacio, el bagazo se comprime para formar pacas que se apilan en el exterior del ingenio, normalmente se deja espacio entre las pilas para que el aire circule y las pacas se sequen; posteriormente, se envían a otras industrias para utilizarlas de inmediato o almacenarlas hasta su uso en espacios abiertos. El bagazo fresco y húmedo apilado a la intemperie produce un residuo de jugo que es susceptible de ser fermentado por levaduras. La temperatura favorece el crecimiento de muchas especies de hongos, principalmente actinomicetos termo y mesofílicos. Cuando el bagazo está viejo y seco se enmohece y puede contener grandes cantidades de esporas (240 a 500 millones por gramo) de las que una parte se liberan hacia el ambiente, sobre todo cuando se manejan y transportan las pacas, o cuando se rompen, se trituran o se muelen (Moya, 2007).

1.1.4. Metodologías para evaluar impactos ambientales

Un sistema de gestión ambiental eficaz puede ayudar a una organización a evitar, reducir o controlar los impactos ambientales adversos de sus actividades, productos y servicios, asegura un mejor cumplimiento de los requisitos legales aplicables y otros requisitos que la organización suscriba, y ayuda a la mejora continua del desempeño ambiental.

Según NC 14040: 2009 la gestión ambiental como: el conjunto de actividades, mecanismos, acciones e instrumentos, dirigidos a garantizar la administración y uso racional de los recursos naturales mediante la conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo del medio ambiente y el control de la actividad del hombre en esta esfera. La gestión ambiental aplica la política ambiental establecida mediante un enfoque multidisciplinario, teniendo en cuenta el acervo cultural, la experiencia nacional acumulada y la participación ciudadana.

Para poder determinar si una sustancia es perjudicial o no para el medio ambiente, lo debemos probar con toda la evidencia científica de la que disponemos el impacto de todas las materias primas, el consumo de energía, la contaminación del aire, del agua y el suelo, el mantenimiento, reciclaje y gestión de residuos para cualquier material utilizado (Márquez, 2007).

Para lograr una gestión ambiental planificada y correctamente organizada se aplican producción más limpia, que es una estrategia de mejoramiento continuo que ofrece muchas ventajas cuando se compara con los métodos tradicionales de control y remediación de la contaminación, especialmente porque no sólo beneficia al medio ambiente, sino que trae consigo ventajas competitivas y económicas para aquellas organizaciones que la implementan.

La producción más limpia se aplica a:

- Los procesos de producción: conserva las materias primas y la energía, elimina materias tóxicas y reduce la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y residuos.
- Los productos: reduce los impactos negativos a lo largo del ciclo de vida de un producto hasta su disposición final.
- Los servicios: incorpora la preocupación ambiental en el diseño y suministro de servicios (Folleto de P+L, 2006).

La producción limpia es hoy una opción de gestión ambiental que además ha probado ser un requisito para corregir las alternativas de tratamiento y desecho con las cuales no es compatible. Los especialistas ambientales en los últimos años han desarrollado herramientas y habilidades que pueden ayudar en la implementación general de acciones de producción más limpia.

La situación actual de la industria azucarera en cuanto al aporte de la carga contaminante de sus fábricas, representa alrededor del 80% de la carga contaminante total que aportan las Industrias al medioambiente natural del país. Dada la característica de sus residuales líquidos, cuando estos no son bien tratados provocan grandes afectaciones en ríos, zonas costeras, lagunas y el manto freático,

constituyen focos de vectores, producen fetidez, afectan la flora, la fauna y el ecosistema en general (Rodríguez *et al.*, 2013a). Es por ello que reviste gran importancia el estudio de la actividad ambiental en el sector azucarero, pues no existe una visión clara de las consecuencias desfavorables en cuanto a la agresión al medio ambiente.

1.2. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental

El desarrollo progresivo de todas las actividades llevadas a cabo en una empresa produce impactos en el medio ambiente, de ahí la necesidad de analizar en detalle cómo reducir el impacto de sus productos, no sólo en su producción o en su eliminación, sino en todas y cada una de las fases por las que el producto pasa.

La industria azucarera, es una de las que provoca mayor impacto negativo sobre el medio ambiente, ya que en ella confluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, de residuales con una alta demanda química y bioquímica de oxígeno, así como una alta incidencia sobre el suelo, dado por los métodos de producción y cosecha de la caña de azúcar (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2014). La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental, y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (NC, 2009a, 2009b).

Un análisis de ciclo de vida (Life Cycle Assessment (LCA) en inglés), es una herramienta de diseño que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho) (Meza-Palacios *et al.*, 2019). El ACV es por tanto una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto y de su proceso de producción, con el fin de evaluar el impacto potencial sobre el ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados con el sistema que se está evaluando (White *et al.*, 2006).

En los últimos años de la década de los ochenta, el concepto de la "administración del ciclo de vida" llegó a convertirse en un tema estrella, era preciso obtener una herramienta fiable, con la capacidad para evitar problemas derivados de percepciones subjetivas. Surge así el "Análisis del Ciclo de Vida", que en general se puede definir como: "una aproximación por parte de la administración de la empresa

para reducir el impacto de un producto, paquete o actividad sobre la salud humana y el medio ambiente (Gunawan *et al.*,2019).

1.3. Fundamentos generales de la metodología del ACV

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), conocidas como serie ISO 14 040, en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14 000. El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema, evaluación de impactos ambientales asociados a las mismas e interpretación de los resultados de las fases de inventario y evaluación de impactos con relación a los objetivos del estudio (Rieradevall, 1999). La técnica utilizada en ACV es la creación de modelos. Se elabora un modelo del complejo sistema utilizado para producir, transportar, usar y eliminar un producto, resultando en un árbol de procesos con todos los aspectos relevantes. Se recopilan todas las entradas y salidas, obteniéndose una larga lista de entradas y salidas, que en muchos casos es difícil de interpretar (Moya *et al.*,2013). Durante la evaluación del impacto, se usa otro modelo para describir la relevancia de entradas y salidas (modelo de mecanismo ambiental). Las aplicaciones más importantes del ACV son: análisis de la contribución de estados de ciclos de vida a la carga ambiental general, con el objetivo de tratar preferentemente los puntos débiles; mejora del producto o proceso, comparación de productos con similar función, comparación de opciones de procesos tecnológicos o manejo de residuos, evaluación de nuevos productos, planeación y evaluaciones estratégicas (Companiononi, 2009).

Dentro de las diferentes etapas del análisis ciclo de vida, los impactos en la fase de extracción de materia prima están relacionados con el origen del material. Los materiales no-renovables tienen un impacto mayor que los renovables. Además, la energía necesaria en el proceso de extracción, es un factor determinante (Gunawan *et al.*, 2019).

En la fase de producción, la efectividad y la cantidad de los insumos en el proceso de producción como la energía y el agua, al igual que los residuos de esta fase, así como las emisiones son factores significativos en el impacto ambiental. El medio de transporte, la distancia y los tipos de empaques son determinantes del impacto ambiental durante la fase de distribución. Por otro lado, La fase del uso puede resultar prioritaria para los productos que requieren energía y/o necesitan agua u otros aditivos para su funcionamiento (Perez Gil *et al.*, 2013).

El tratamiento en la última fase del ciclo de vida, la disposición final juega un papel importante respecto al impacto ambiental para los casos en los que la vida útil del producto es muy corta. Especialmente para los envases y los empaques esta fase determina gran parte del impacto total durante el ciclo de vida (Pérez Gil *et al.*,2013).

El ACV es un proceso en el que se reconocen las siguientes fases (Anexo 2):

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis del inventario del ciclo de vida
- Evaluación del impacto del ciclo de vida
- Interpretación del ciclo de vida

En las conexiones entre estos cuatro pasos se puede reconocer que se trata de un proceso iterativo, el cual permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones (Güereca, 2006). El primer paso, definición de objetivo y alcance, debe expresar claramente el propósito y la extensión del estudio, además debe describir el o los sistemas estudiados y la unidad funcional.

La unidad funcional se refiere a la cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir la función que se compara, sirve de base para la comparación entre sistemas, a partir de ella se cuantifican las entradas y salidas funcionales de un sistema productivo o de servicios. Debido a su naturaleza global, un ACV completo puede resultar muy extenso. Por esta razón se deben establecer límites perfectamente identificados. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios se deben incluir dentro del ACV. Varios factores determinan los límites del sistema, incluyendo la aplicación prevista del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión, los datos, las limitaciones económicas y el destinatario previsto (Güereca, 2006).

El Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV), comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de un sistema, tomando como referencia la unidad funcional. Estas entradas y salidas pueden incluir el uso de recursos y las emisiones al aire, agua y suelo asociadas con el sistema a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final. Esos datos también constituyen las entradas para la evaluación de impacto de ciclo de vida (NC-ISO 14040: 2009).

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), va dirigida a evaluar la importancia de los impactos potenciales ambientales, utilizando los resultados del análisis de inventario. En general, este proceso implica la asociación de datos del inventario con impactos ambientales específicos tratando de

valorar dichos impactos. El nivel de detalle, la elección de impactos evaluados y las metodologías usadas dependen del objetivo y alcance del estudio (NC-ISO 14040: 2009).

Finalmente, la interpretación que es la fase del ACV donde se evalúan los resultados y se plantean conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio (NC-ISO 14040: 2009). El término Análisis de Ciclo de Vida es todavía joven, pero por sus aplicaciones y factibilidad se ha propagado por el mundo en un corto período de tiempo (Güereca, 2006).

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

Los AICV coinciden con los ACV en las siguientes etapas: definición del objetivo 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. 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, artículos científicos, conocimientos de expertos, estadísticas, legislaciones o cualquier otra fuente científicamente validada (Albrecht *et al.*, 2020; Gabisa *et al.*, 2019). Los datos finales del ICV (parámetros) cuantifican los flujos referidos a la unidad funcional, relacionan propiedades de estos, así como factores de emisión, rendimientos y consumos que faciliten la estimación de los flujos que no pueden ser directamente medidos.

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; Nguyen y 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 nivel de detalle que se alcance en el inventario depende de la disponibilidad y del grado de complejidad con que se obtenga la información. Cuando no existen los datos se puede usar un “valor calculado” en función de datos reportados por procesos unitarios que usen una tecnología similar (NC-ISO 14 044: 2009). 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 (DQI, por sus siglas en inglés), necesarios para una interpretación adecuada de los resultados del AICV y la credibilidad del estudio. Diferentes autores (Sonnemann *et al.*, 2013; Weidema *et al.*, 2013)

Los DQI 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 y el alcance definido; incluye las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia.

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; NCISO 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 (Gustav *et al.*, 2014; Weidema *et al.*, 2013).

Por otra parte, la verificación de coherencia se realiza antes de llegar a conclusiones, para comprobar que la compilación de los datos, las suposiciones y los métodos son coherentes con el objetivo y el alcance.

1.4.1. Inventario del ciclo de vida del azúcar de caña

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. Según Ramjeawom *et al.* (2004), 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 DQI, 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 (Jafar *et al.*, 2008; 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.

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.

Contreras (2007) y Rodríguez (2014), 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. Además, no validan el ICV mediante ninguna de las técnicas expuestas con anterioridad. 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.

1.4.2. Parametrización del Inventario del Ciclo de Vida

La parametrización del ICV consiste en la modelación de los procesos unitarios que conforman el sistema del producto en función de parámetros. Esto permite realizar ACV de modelos complejos; disponibles para todas las etapas y procesos unitarios que pueden ser fácilmente mantenidos, donde el usuario puede verificar la procedencia de los resultados y determinar las correlaciones numéricas entre los impactos ambientales y los parámetros más significativos del ICV.

Los ICV parametrizados permiten evaluar y comparar escenarios, analizar la incertidumbre asociada a los datos y a los resultados por categorías de evaluación de impactos, facilitan el análisis de sensibilidad mediante la modificación de escenarios (Pérez *et al.*, 2011a, b; Smith *et al.*, 2012; Zimmermann, 2013).

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. En el ICV parametrizado, la estructura es la descripción del proceso mediante ecuaciones (parámetros calculados) y los parámetros de entrada son los valores independientes que modifican la estructura. Se emplean ecuaciones para estimar las propiedades físicas y termodinámicas de los flujos, así como factores numéricos para correlacionar parámetros.

Los parámetros calculados pueden a su vez ser empleados para cuantificar otros parámetros (Pérez *et al.*, 2012; Weidema *et al.*, 2013). 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. Smith *et al.* (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.

Ostad y Collado (2011), modelan el ICV parametrizado para la estimación rigurosa del perfil ambiental de grúas de brazo articulado con el objetivo de implementarlo en la fase de diseño para la selección de productos con el mejor desempeño ambiental. En este estudio los parámetros de entrada están referidos a los datos de diseño y los calculados se editan en función de modelos matemáticos derivados de la documentación existente, propiedades físicas de los materiales empleados o datos estadísticos. Zimmermann (2013), modela el ICV para diferentes convertidores de energía eólica en función de un número limitado de parámetros relevantes con el objetivo de proporcionar una herramienta que permita la evaluación ambiental de estas tecnologías renovables de energía con la mayor exactitud y el menor esfuerzo.

Por otra parte, (Herrera, 2012), muestran la aplicabilidad de un ICV parametrizado para el sector de la madera; evaluándose la efectividad de los ICV paramétricos en el cálculo de los impactos ambientales de productos en este sector con diferentes diseños y la influencia de la variabilidad de los parámetros sobre el perfil ambiental del producto.

En estas investigaciones es común 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 desarrolladas por Pérez *et al.* (2016), 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. 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 fijos) 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. Al mismo tiempo, se manifiesta que la modificación en estos parámetros se relaciona directamente con la categoría de efectos respiratorios de compuestos inorgánicos evaluada con el método del Eco-indicador 99. 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.

1.4.3. Análisis de incertidumbre del ICV

La incertidumbre de los datos se puede determinar por métodos estadísticos. Sima-Pro da la posibilidad de utilizar la técnica Monte Carlo (Contreras, 2007). El ACV no sigue una metodología fija y por lo tanto se debe estar familiarizado con los métodos científicos de investigación y con la evaluación antes de realizar este tipo de estudio, el mismo es de carácter dinámico, por lo que a medida que se obtienen resultados, se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites o los objetivos.

En la presentación del ICV es necesario dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado para que el usuario pueda evaluar su idoneidad, es decir, caracterizar la incertidumbre o dispersión de los valores. Para los ICV la incertidumbre es un término general e impreciso que se refiere a la falta de certeza en los componentes del inventario. El análisis de incertidumbre de los datos se debe realizar a nivel de proceso unitario para asegurar la validez del estudio (Tichy y Bebtley, 2014). Diferentes autores (Amaya *et al.*, 2014; Mosquera, 2007), coinciden en que las incertidumbres 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. Gustav *et al.* (2014), destacan la necesidad de introducir la cuantificación de las incertidumbres en los datos del ICV a nivel de proceso unitario para la credibilidad de los ACV. Exaltan la parametrización de los inventarios del ciclo de vida como una opción eficiente para ACV objetivos, al permitir la modificación de los parámetros según las características de los escenarios de cada usuario.

Mattila *et al.* (2012), a través de un estudio de la incertidumbre asociada a la toma de decisiones, demuestran que en un ACV se debe prestar mayor atención a la incertidumbre asociada a la selección

de los métodos de evaluación, así como a las relacionadas a los indicadores individuales dentro de cada método. 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.

1.5. Métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida

Una vez completada la fase de inventario, se evalúan los impactos, en la práctica, ACV plantea impactos ambientales potenciales, por lo tanto, no es correcto suponer que los impactos totales se obtienen de una simple sumatoria de estos en cada subsistema. Sin embargo, en el caso de impactos globales o de efectos prolongados (ej. calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico), es posible sumar las contribuciones de cada fase del ciclo de vida (Zaror, 2000). Existe cierto consenso respecto a los elementos que constituyen la evaluación de impacto en un ACV: Selección y categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización, clasificación, caracterización y valoración, la asignación de los resultados del inventario a cada una de las categorías de impacto, el cálculo de los resultados de los indicadores de cada categoría (Rodríguez *et al.*, 2014).

Las diferentes metodologías de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida, según (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 Ecoscarcity (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.

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

- 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 2008 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 2008 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 2008 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 (E. *et al.*, 2016; Rosas, 2017).

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

1.6. Herramientas informáticas comerciales utilizadas para el ACV

Basados en la metodología del ACV se han desarrollado numerosos programas para facilitar su cálculo. 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 Model*, GaBi 4 Software *System and Databases*, y SimaPro (PRé Consultants, 2001a, b; GaBi 4, 2012) (Anexo 3).

SimaPro constituye una herramienta poderosa que contiene distintos métodos de evaluación de impactos y diferentes bases de datos de inventario propias y bibliográficas, las cuales pueden ser editadas y ampliadas sin limitaciones, lo que facilita el análisis, así como, la representación gráfica de ciclos de vida complejos en una forma sistemática y transparente, acorde a las normas de la serie ISO 14 000 (PRé Consultants, 2012), por lo que se puede adaptar a las condiciones de otros países y comparar productos.). El software SimaPro 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 (Pré Consultans, 2012)

SimaPro es una herramienta de elevada potencia por su grado de impacto en los procesos industriales y en el Ecodiseño, además por su fácil manejo e interpretación para los usuarios, ya que es una fuente que engloba una amplia base de datos concernientes al estudio de impacto ambiental, realiza comparaciones con otros procesos industriales para la optimización y la toma de decisiones con la finalidad de proporcionar una mejora continua ambiental en sus procesos y productos desde la “cuna a la tumba” (Rodríguez *et al.*, 2014).

Entre las bases de datos utilizadas se destaca Ecoinvent, con gran variedad de datos, aplicación constante de límites de sistema y distribución bien documentados. Es un recurso muy amplio que satisface casi todas las necesidades por datos de fondo (Rieradevall, 2000; Pré Consultants, 2001a; Ecoinvent Centre, 2003).

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 (Kellenberger, 2007; Moreno *et al.*, 2013; Pérez, 2015; Weidema *et al.*, 2013). 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 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

Los estudios de ACV del azúcar crudo y sus derivados, han permitido identificar los mayores contribuyentes del ICV a los efectos perjudiciales sobre diferentes elementos del medio ambiente; facilitando la planeación de estrategias de mejoras ambientales.

En Cuba se han realizado algunas contribuciones al desarrollo de esta herramienta (Llanes *et al.*, 2005), este estudio sólo se ha enfocado al aspecto energético y considerando tres categorías de impacto (Calentamiento Global, Acidificación, Formación de partículas en suspensión).

Rodríguez (2002b) aplica el ACV para obtener una estrategia de mejoras ambientales, usando el Ecoindicador 95.

Contreras (2009) realiza un estudio comparativo del uso de los subproductos de la caña de azúcar en Cuba, demostrando la ventaja ambiental de la valorización de residuos y subproductos de esta industria. Pérez (2009), realiza la evaluación de impacto mediante análisis de ciclo de vida en la empresa azucarera Panchito Gómez Toro de la provincia Villa Clara, donde se evidencian los beneficios ambientales por la alta eficiencia energética en esta empresa. No obstante, en este sector se requiere continuar trabajando para lograr obtener la evaluación en las restantes empresas del país (Companioni, 2009).

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.

Según Beltrán, (2014) el Análisis del Ciclo de Vida y energético 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.

Herrera (2016) 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.

1.8. Conclusiones parciales

Una vez finalizado el capítulo se puede presentar las siguientes conclusiones parciales:

1. El proceso de producción de azúcar crudo se distribuye en cuatro etapas fundamentales que van desde la recepción y manipulación de la caña de azúcar hasta la etapa de centrifugación, midiendo en cada una de ellas los parámetros de calidad que permiten obtener un grano en condiciones óptimas, para su posterior consumo y comercialización.
2. Los estudios de ACV del azúcar crudo y subproductos, específicamente las aguas residuales y la cachaza han permitido identificar los efectos perjudiciales de estos sobre diferentes elementos del medio ambiente; facilitando la planeación de estrategias de mejoras ambientales.
3. La agroindustria azucarera tiene fuerte incidencia negativa sobre el medio ambiente, para ello se utiliza como herramienta de evaluación ambiental el Análisis del Ciclo de Vida, que investiga y evalúa los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su existencia: extracción, producción, distribución, uso y fin de vida (reutilización, reciclaje, valorización y eliminación/disposición de los residuos/desecho).
4. Los estudios de ACV se componen de cuatro fases; la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación, donde en esta última fase se evalúan los resultados y se plantean conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio.
5. Basados en la metodología del ACV se han desarrollado numerosos programas para facilitar su cálculo. Entre tantos se encuentra SimaPro 8.0, que constituye una herramienta poderosa y más

actualizada, que contiene distintos métodos de evaluación de impactos como es ReCiPe2016 y la base de datos Ecoinvent 3.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta una metodología basada en el ACV en la agroindustria de la caña de azúcar para las condiciones de Cuba, que da respuesta a la necesidad de contar con una estrategia para la toma de decisiones en los estudios de diversificación, y complementa, desde el punto de vista ambiental global, los análisis técnico-económicos para lograr Producciones más Limpias en el sector azucarero. La misma se desarrolla a partir de los resultados obtenidos anteriormente por diferentes autores, siguiendo las orientaciones de las normas de la serie ISO 14 040 y mediante el software profesional SimaPro 8.0, utilizando la metodología ReCiPe 2016, cuyos datos están actualizados con el conocimiento científico actual y comprende 18 categorías de impacto ambiental y como base de datos Ecoinvent 3 (LLanes *et al.*, 2005a; Contreras *et al.*2009).

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.

Posteriormente se proponen tres alternativas tecnológicas para la gestión de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera, con la finalidad de minimizar la generación emisiones contaminantes al medio ambiente. Para este estudio se eligió la Empresa Azucarera Jesús Rabí del municipio Calimete, Matanzas. En la figura 2.1 aparece el diagrama para la metodología propuesta.

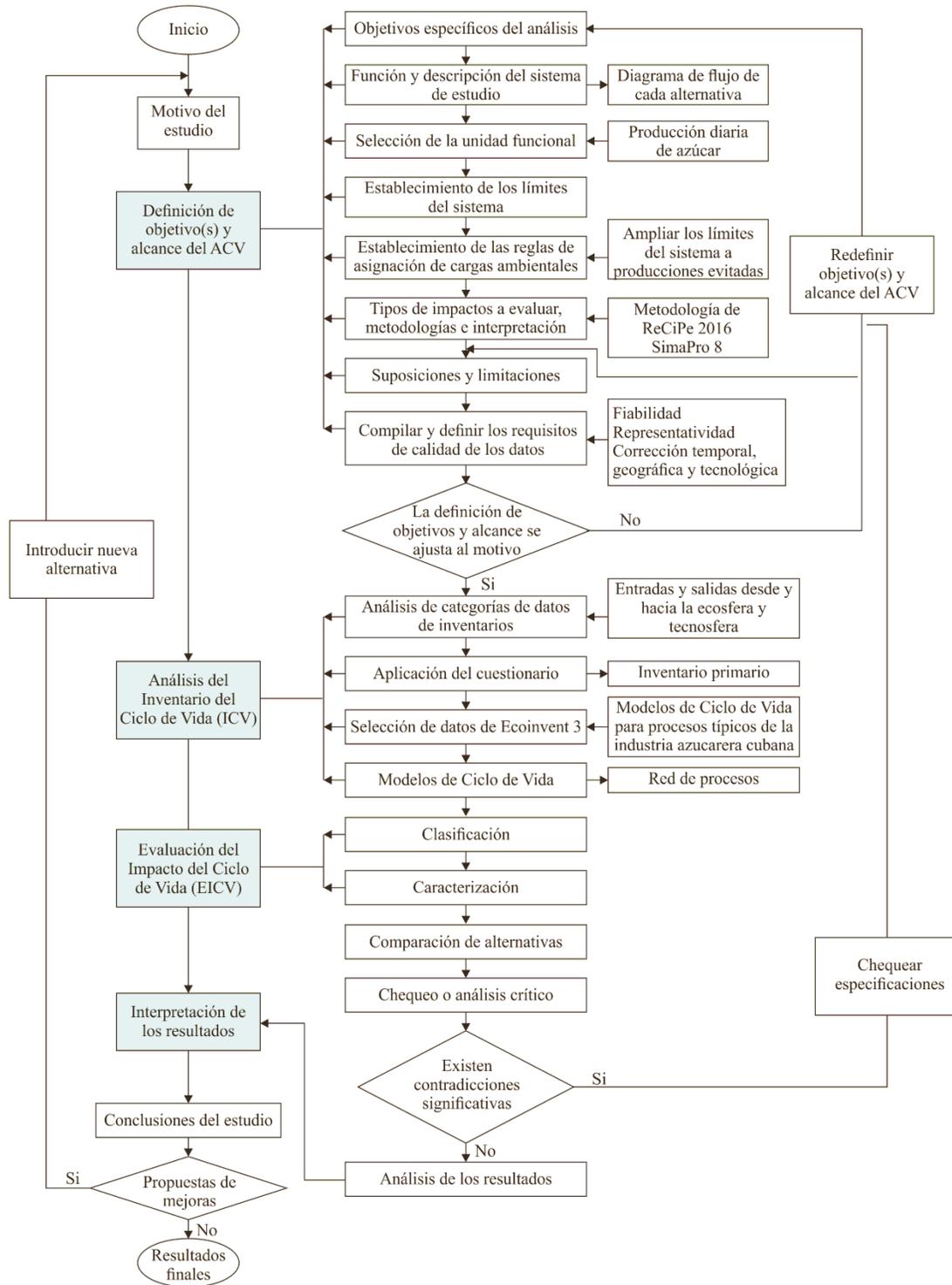


Figura 2.1. Diagrama para la metodología de ACV en la agroindustria azucarera.

2.1. Definición de objetivos y alcance del ACV

LLanes *et al.*, (2005), NC ISO 14040: 2005, coinciden en que los elementos a incluir en la sección de definición de objetivo y alcance son:

- 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 parte de la definición del objetivo y alcance del ACV, de acuerdo a la razón o motivo para realizar el estudio en general.

La metodología parte de la definición del objetivo y alcance del ACV, de acuerdo a la razón o motivo para realizar el estudio en general.

2.1.1. Objetivos del estudio

Los objetivos de la ejecución del ACV de la industria de la caña de azúcar son los siguientes:

1. Identificar y cuantificar los impactos ambientales generados por la producción de azúcar, considerando un escenario que responde a la producción de azúcar 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 producción de azúcar.

2.1.2. Alcance del estudio

El alcance puede ser ajustado durante el desarrollo y/o aplicación de la metodología siendo un proceso iterativo (NC-ISO 14 044: 2009) e incluye 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. 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 (Contreras *et al.*, 2009; Mashoko *et al.*, 2010; Chauhan *et al.*, 2011; Grillo *et al.*, 2011).

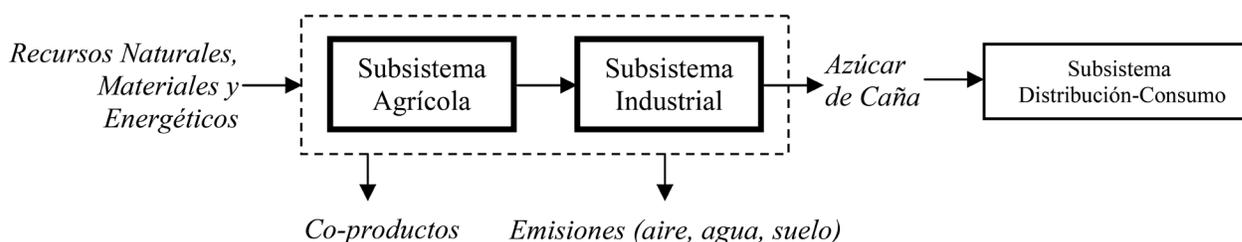


Figura 2.2 Modelo del ciclo de vida del azúcar de caña

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. (Kadam, 2002; Guo *et al.*, 2006; Gheewala *et al.*, 2006).

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, 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 y electricidad) 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 significa, cuantificar los recursos y emisiones evitadas por la valorización de los subproductos o residuos del proceso. 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	Alimento animal (maíz, cebada)
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 consiste en un ingenio Jesús Rabí productor de azúcar de caña en la provincia de Matanzas, con una capacidad de 250 t/d de azúcar de caña para las condiciones de producción convencionales. Esto representa la unidad funcional. Para la comparación se consideraron tres alternativas diferentes para el uso de subproductos y residuos de la producción de azúcar. En las cuatro 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. Se evitaban 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 sustituían 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 alcohol, biogás, alimentos para animales y fertilizantes a partir de los subproductos se hace evidente a través del estudio comparativo para el ahorro de recursos.

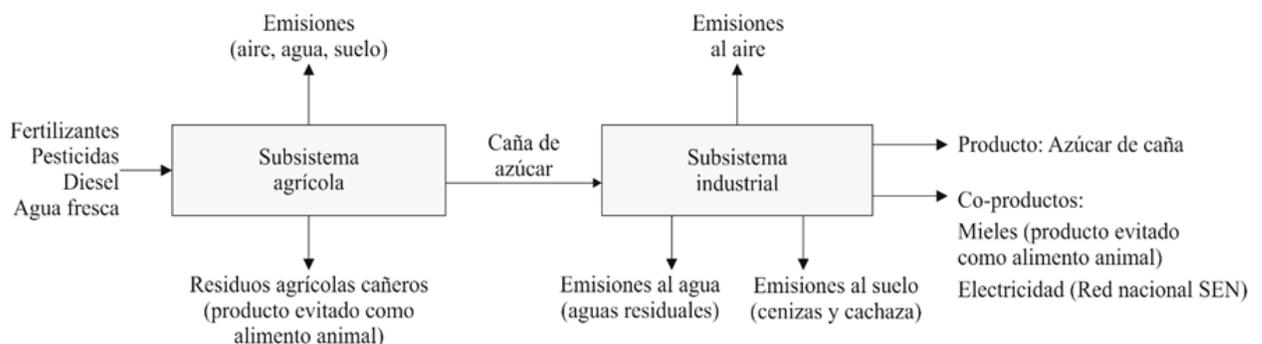


Figura 2.3 Alternativa tecnológica I (Caso base)

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.

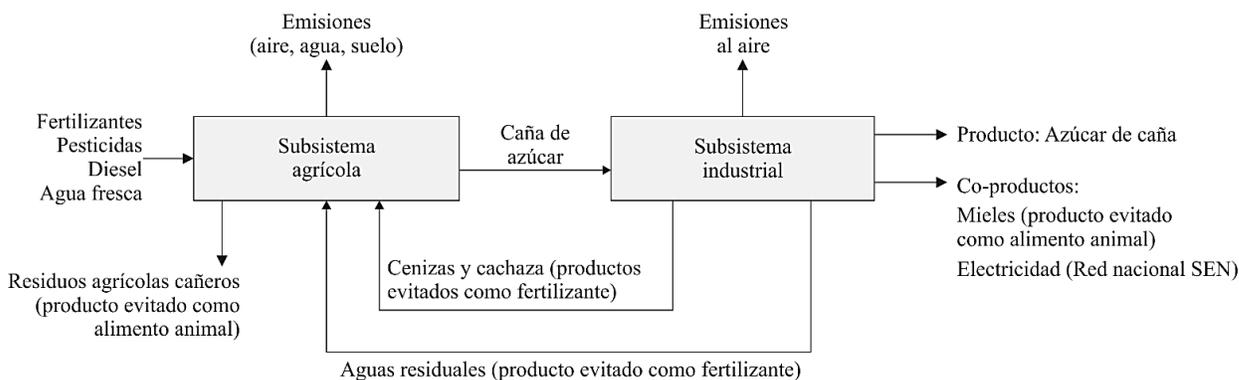


Figura 2.4 Alternativa tecnológica II

La alternativa II es similar a la primera, pero considera el uso de aguas residuales para riego por fertirrigación, la cachaza y las cenizas para la sustitución de fertilizantes sintéticos (producto evitado). Estos productos químicos evitados son urea, triple superfosfato y cloruro de potasio.

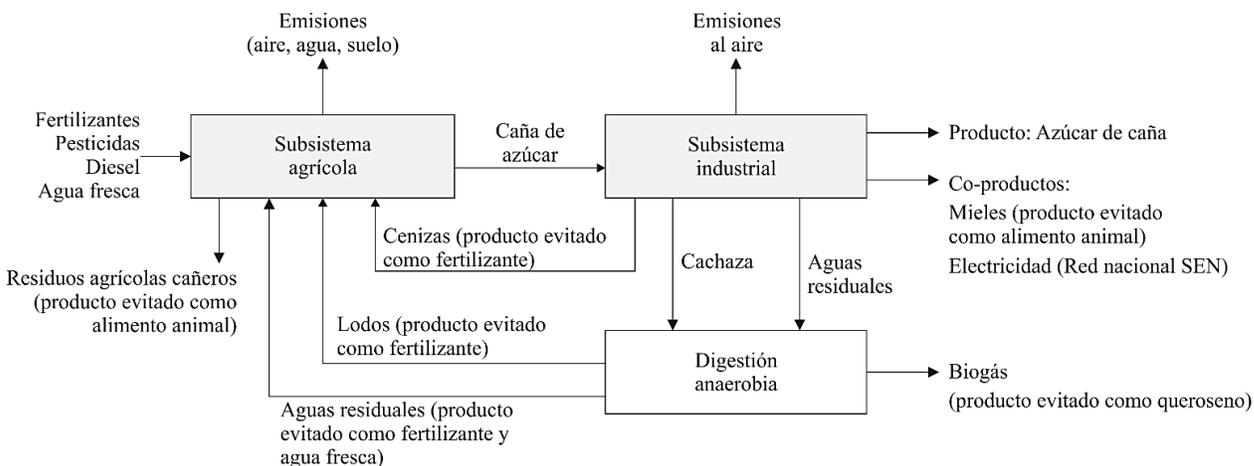


Figura 2.5 Alternativa tecnológica II

La alternativa III considera el uso de cenizas como fertilizante, similar a la alternativa II. La cachaza y las aguas residuales del central azucarero se utilizan para la producción de biogás 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.

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 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). Asimismo, 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 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 los rendimientos de 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), 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 tres 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 a la Red 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).

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 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 derivados de la caña de azúcar del ICIDCA (1986) 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 5 muestra los resultados del inventario de datos primarios para la etapa agrícola, los cuales son similares para las tres alternativas. En el anexo 6 se muestran los resultados de inventario primario para la etapa industrial de la Alternativa I; en el anexo 7 para la alternativa II y en el anexo 8 para la Alternativa III. 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 4 muestra el cuestionario recomendado en la metodología para el análisis en la industria azucarera. 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 (Pérez *et al.*, 2006).

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 las 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 tres alternativas se mantienen constantes.
Entradas desde la Tecnosfera	Combustible Fertilizantes Pesticidas Caña de semilla Operaciones de siembra, fertilización, irrigación y cosecha Transporte	En las tres alternativas se mantienen constantes.
Salidas a la Tecnosfera	Caña de azúcar RAC	En las tres 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 tres 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 las 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 tres 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 Miel Electricidad Biogás	Constante en todas las alternativas “ “ “ Función de la tecnología de cada alternativa En alternativas III

Emisiones a la Ecosfera	Emisiones al aire por cogeneración (óxidos de nitrógeno y material particulado) Emisiones al agua porresiduales líquidos Emisiones al suelo por cachaza y cenizas	Constante en todas las alternativas En alternativa I “ “ “
-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------

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 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 prod. 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 eIndustrial	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, 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 revisión crítica del estado del arte referido al Análisis del Ciclo de Vida en la producción de azúcar y derivados, permite clasificar los recursos y emisiones asociados a los diferentes procesos de acuerdo a las categorías de impacto y de daño establecidas en la metodología ReCiPe 2016.
3. Se proponen tres alternativas tecnológicas para la valorización de subproductos y residuos de la agroindustria azucarera, que permiten minimizar la generación de emisiones contaminantes al medio ambiente.
4. A partir de las orientaciones de las normas de la serie ISO 14040, el uso del software SimaPro 8.0, la base de datos Ecoinvent 3 y el método ReCiPe 2016, se propone una metodología para la evaluación del impacto ambiental en la agroindustria azucarera a través del ACV.

RECOMENDACIONES

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

1. Culminar los estudios referidos a la metodología planteada, a partir de valores reales del inventario para cada subsistema, procesando los datos a través del Software SimaPro 8.0 para determinar el impacto ambiental de cada alternativa.
2. Aplicar la metodología propuesta a los estudios de diversificación en la agroindustria azucarera en la Empresa Azucarera Jesús Rabí, para evaluar el impacto ambiental de esta industria de forma global, incluyendo todas las etapas del Ciclo de Vida de las alternativas consideradas.

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.

Amaya, M. I., Echeverry, C., Rizzo, A., Leal, F. A., Rey, I. C., Bastos, J. M., Carrillo, A. & González, D. (2014). *Manual de evaluación del programa de inventario de emisiones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Consultor: K2 Ingeniería Ltda*. República de Colombia. Revisado 2014.

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.

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.

China [Article]. *Journal of Cleaner Production, 161*, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.078>

- Companiononi, D. (2009). *Análisis del Ciclo de Vida de la producción de Azúcar Crudo en la Empresa "Ecuador"*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Contreras, A. M. (2007). *Metodología para el análisis del ciclo de vida combinado con el análisis energético en la industria azucarera cubana*. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba.
- Contreras, A. M. y Rosa, E. (2009). *Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar productions*.
- 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://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/642
- 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>
- 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, 3353-44. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.078>
- Dunand C, R. y colaboradores. (2007). El Tratamiento Magnético y la Disminución de Residuales Líquidos en la Industria Azucarera. II Conferencia Internacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA). ICINAZ.
- E., M. R., T., L., J., R., L., V., G., B., y G., W. (2016). Documentation of changes implemented in theecoinvent database v3.3. *Ecoinvent*.
- Echeverría (ISPJAE). (2006). *Producciones más limpias y otras técnicas de minimización de residuos*. Facultad de Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería. Folleto de producción más limpia. Capítulo V.
- Ecoinvent Centre. (2003). *The Life Cycle Inventory Data Version 1.01*. (Ecoinvent data V1.01), Dec. 2003, © Swiss Centre for Life Cycle Inventories / 2003.

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>

Folleto de producción más limpia. (2006). Capítulo V. *Producciones más limpias y otras técnicas de minimización de residuos*.

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.

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>

García, H.R.; Peña, A.C.; López, R. A. (2009). Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela: tercer Informe de Avance del proyecto", CORPOICA, Bogotá-Colombia.

Grillo, M. L., Silva, E. E., Escobar, J. C., Venturini, O. J., Buchgeister, J. & Almanzan, O. (2011). A LCA (*Life Cycle Assessment*) of the methanol production from sugarcane bagasse. *Energy* 36, 3716-3726.

Güerrecá, L.P., (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*.

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,

Guo, A. C., Chen, B., Yu, X. L., Huang, C. H., Liu, L. & Nie, X. H. (2006). *Assesment of cleaner production options for alcohol industry of China*. Journal of cleaner production 14, 94-103. <http://www.elsevier.com/locate/jclepro>

Gustav, P. J., Bartholomeus, J., Heijungs, R., Koning, A. & M, D. (2014). *A protocol for horizontal averaging of unit process data including estimates for uncertainty*. The International Journal of Life Cycle Assessment 19, 429-436.

Herrera, I. (2016). "*Análisis de ciclo de vida de la producción de etanol combustible proveniente del bagazo de caña de azúcar*." International Journal of Life Cycle Assessment 17, 696-705

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.

Hunt R., Franklin W. LCA -How it came about. Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. Int. J. LCA 1(1), 1996, pp. 4-7. International Journal of Life Cycle Assessment 17, 696-705

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.

Kellenberger, D. (2007). *Modelling principles for the collection of consistent and comprehensive lci data*. SCION, Sustainable Consumer Products, LCA Group-89.

Llanes, E. et al. (2005 b) *Aplicación de metodología Análisis del ciclo de vida en la empresa arrocera en la provincia Granma, Cuba*. Revista Ciencias .com, código ISPN de la publicación EEEykVyAApnPQZibfX, <http://www.revistaciencias.com>.

- Maranghi, S., y Brondi, C. (2020). *Life Cycle Assessment in the Chemical Product Chain*. Springer.
- Márquez Gómez, I., (2007). *Análisis del ciclo de vida en la producción de zumo de mango ecológico*. [Tesis para optar por el título de master en seguridad tecnológica y ambiental. Universidad Central de Las Villas], Cuba.
- 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, 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.
- Mashoko, L., Mbohwa, C. & Thomas, V. M. (2010). *LCA of the South African sugar industry*. *Journal of Environmental Planning and Management* 53(6), 793-807.
- Mattila, T., Leskinen, P., Soimakallio, S., y Sironen, S. (2012). Uncertainty in environmentally conscious decision making: beer or wine? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(6), 696-705. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0413-z>
- 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>
- 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., Weidema, B. P., Bauer, C., Nemecek, T., Vadenbo, C. O., Treyer, K. & Wernet, G. (2013). *Documentation of changes implemented inecoinvent Data 3.0*. Ecoinvent Report 5 (v4). St. Gallen: The ecoinvent Centre.

Mosquera, C. R. (2007). *Comparación entre los métodos de evaluación de incertidumbre y estudios de repetibilidad y reproducibilidad para la evaluación de las mediciones*. [Tesis presentada en opción al grado de Máster en Ciencias en Gestión Industrial].

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. (2009). *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. (2009). *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. L. T., y Hermansen, J. E. (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>

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>

PE International, (2012). Software Gabi [WWW Document]. Product Sustainability Software. URL <http://www.gabi-software.com/support/latest-update/webinar-landuse/>

Pérez Gil, M., Contreras Moya, A. M., y Rosa Domínguez, 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>

Pérez, H. E., Goza, O., Santana, R. y Pérez, O. (2005). Notas sobre la producción de azúcar crudo [Monografía]. <https://www.researchgate.net/publication/317290643>

Pérez, M. (2009). *Evaluación ambiental del proceso de cogeneración con bagazo en la Industria Azucarera Cubana mediante el Análisis del Ciclo de Vida*. [Tesis presentada en opción del Título de Master en Ingeniería en Saneamiento Ambiental. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba].

Pérez, M. (2016). *Modelación de los inventarios parametrizados del azúcar crudo en Cuba para la evaluación ambiental con enfoque de ciclo de vida*. [Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas].

Pérez, M., Contreras, A. M. y Rosa, E. (2012). *Development of the parameterized inventories of life cycle for the production of crude sugar in Cuba: a case study*. 20th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012. Prague, Czech Republic.

Pérez, M., Contreras, A. M. y Rosa, E. (2013). *Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry*. *Journal of Cleaner Production* 41, 222-231. <http://www.elsevier.com/locate/jclepro>

Pérez, M., Contreras, A. M., Rosa, E. & Espinosa, V. (2011a). *Modelación del Inventario del Ciclo de Vida en la Empresa Azucarera Heriberto Duquesne*. *Centro Azúcar* 38, 62-73.

Pérez, M., Contreras, A. M., Rosa, E., Rodríguez, V. & Kumar, K. (2011b). *Development of the parameterized inventories of life cycle and modelling of environmental profiles for the production of crude sugar in Cuba*. IV Conference International of Life Cycle Assessment, CILCA 2011. Coatzacoalcos, Veracruz, México.

- Planos Gutiérrez, E. O., Rivero Vega, R., y Guevara Velazco, V. (2012). *Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*.
- Pré Consultants. (2001a). "User Manual ECO-it 1.1". Junio, 2001. <http://www.pre.nl/eco-it/default.htm>
- Pré Consultants. (2001b). "ECO-edit 1.1. Manual". Junio, 2001. 161.
- Pré Consultants. (2012). SimaPro 6.0. LCA software: the powerful life cycle solution, The Netherlands. <http://www.pre.nl/>Last update 24 January 2006.
- PRé, various authors. (2019). SimaPro Database Manual Methods Library. Retrieved from <https://support.simapro.com/articles/Manual/SimaPro-Methods-manual> producción de azúcar crudo. Instituto Superior Politécnico José Antonio Química. Grupo de Investigación de Azúcar.
- Ramjeawon, T. (2004). *Life cycle assessment of cane-sugar on the Island of Mauritius*. The International Journal of Life Cycle Assessment 9, 4.
- Rein, P. (2017). *Cane Sugar Engineering* (2nd ed.). Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Rieradevall, J. and col. (octubre, 2000). "Ecodiseño de envases. El Sector de la Comida Rápida".
- Rieradevall, J. and J. Vinyets (diciembre, 1999). "Ecodiseño y ecoproductos". *Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006, IDT)*. Oficina Nacional de Normalización., La Habana (Cuba).
- Rodríguez, B., Contreras, A., Rosa, E., (2013a). *Análisis ambiental de Alternativas de producción de azúcar en Cienfuegos*. ICIDCA.
- Rodríguez, J. (2002). *La Ingeniería Ambiental entre el reto y la oportunidad*. Madrid.
- Rodríguez-Pérez, B., Contreras-Moya, A. M., & Rosa-Domínguez, E. (2014). *Análisis de alternativas de mejora para la producción de azúcar en la provincia de Cienfuegos*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 48(1), 44-53.
- 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.

- Smith, J., Noon, M. & Kahn, E. 2012. Parameterization in Life Cycle assessment of cane-sugar.
- 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.
- Valdés, A. (2005). Combustibles y energías renovables a partir de la biomasa azucarera. Reunión Regional sobre Biomasa para la producción de energía, CITMA. <http://www.fao.org/DOCREP>.
- Weidema, B. P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T. Reinhard, J., Vadenbo, C. O. & Wernet, G. (2013). Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1 (v3). St Gallen: The Ecoinvent Centre.
- White, W.H.; Tew, T.L.; Richard, E.P. Jr. (2006). Association of sugarcane pith, rind hardness, and fiber with resistance to the sugarcane borer. *J. Am. Soc. Sugar Cane Technol.* 26, 87-100.
- Zaror, C. A. (diciembre, 2000). *“Introducción a la Ingeniería Ambiental para la industria de procesos”*. Chile, Universidad de Concepción.
- Zimmermann, T. (2013). *Parameterized tool for site specific LCAs of wind energy converters*. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 49-60.

ANEXOS

Anexo 1

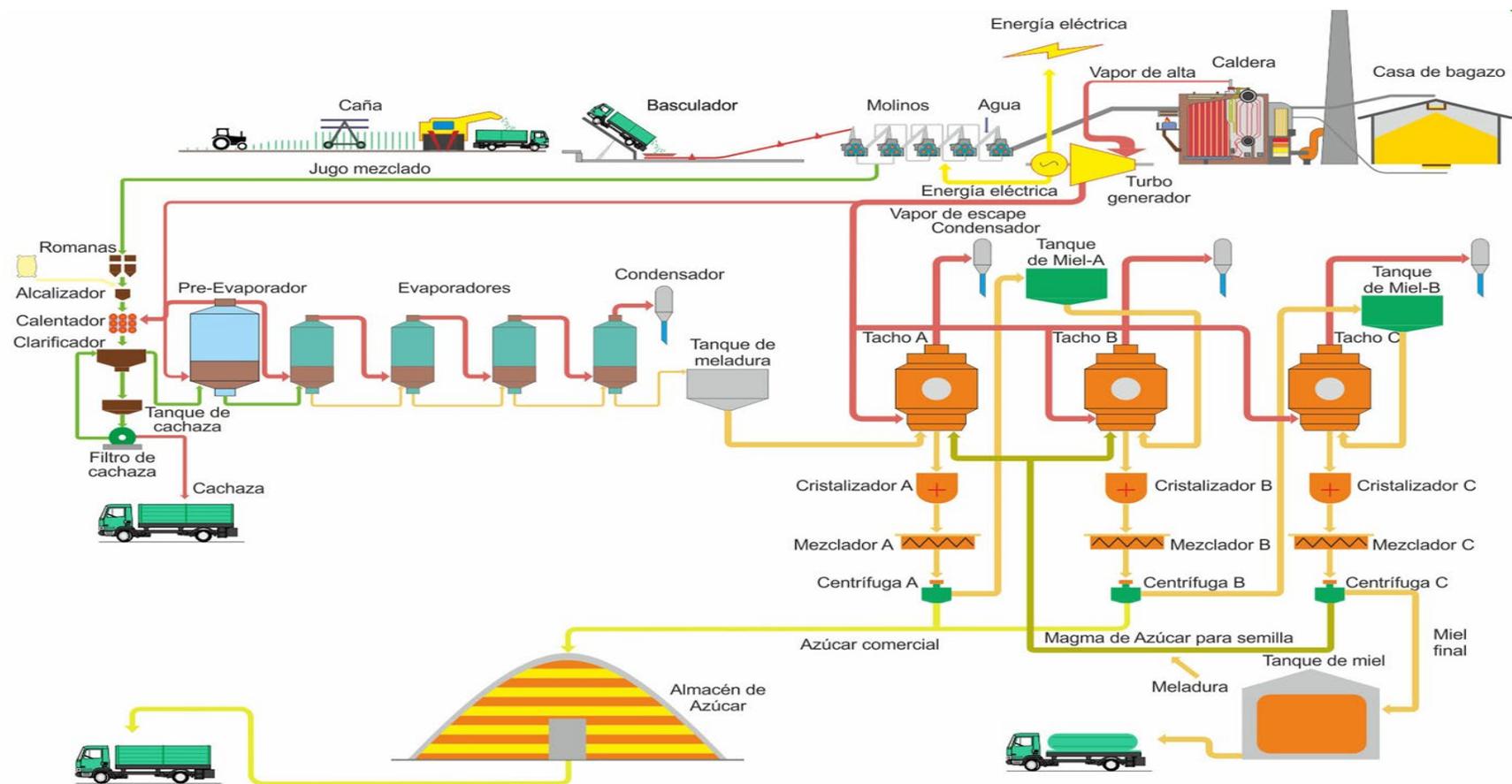


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso tecnológico de producción de azúcar crudo. **Fuente:** www.azcuba.cu/es/infografia-del-proceso-de-fabricación-industrial.

Anexo 2

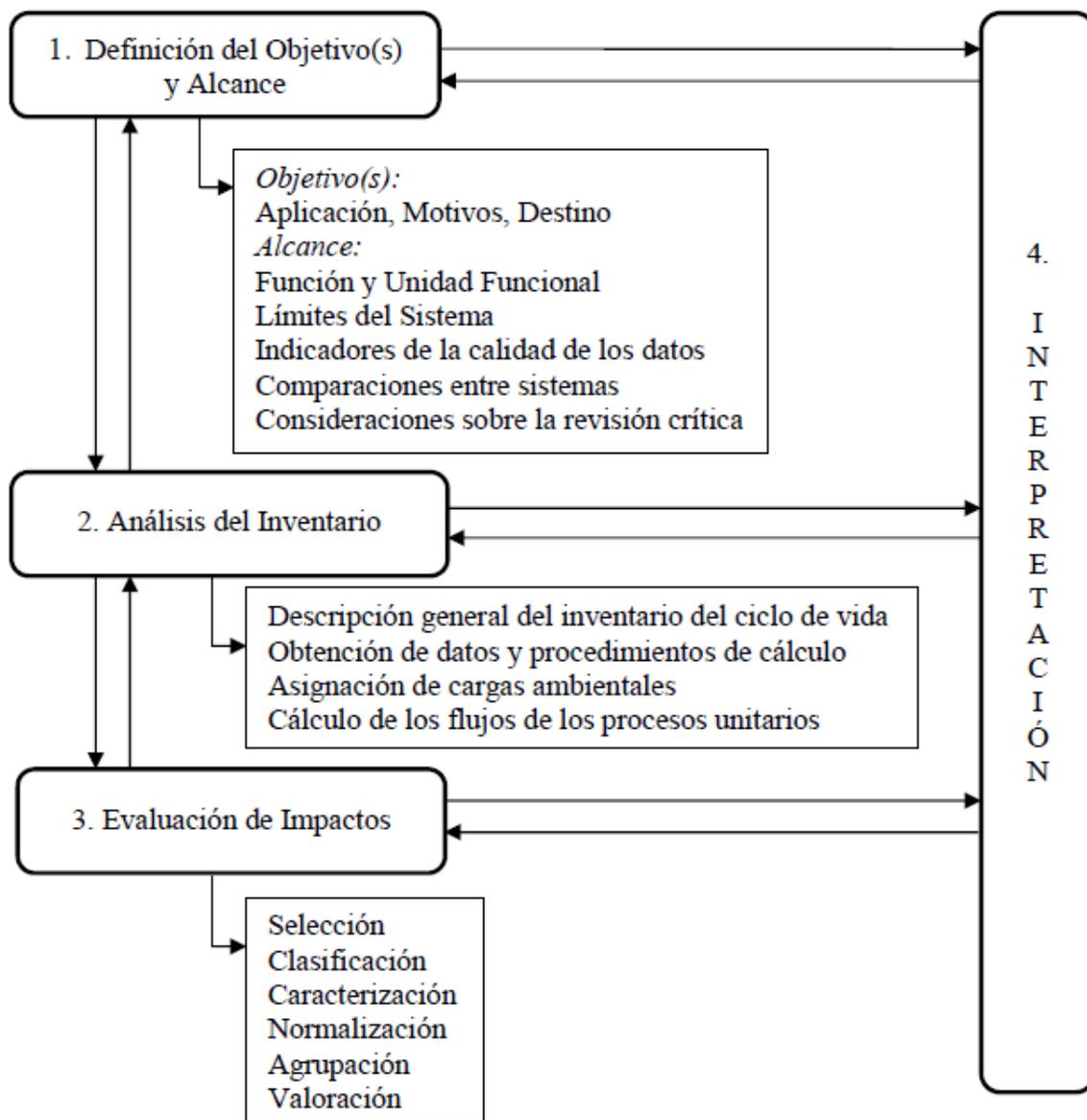


Figura 2. Resumen de las etapas de un ACV. **Fuente:** NC ISO 14 040: 2009.

Anexo 3.

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 Industritenik	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

Anexo 4

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- Calculados E- 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.
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	Etapa	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 5

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 6

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		" "
Acido 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)
Oxidos de nitrógeno	t/d		" "

Anexo 7

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

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		" "
Acido 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)
Oxidos de nitrógeno	t/d		" "

Anexo 8

Tabla 13. Inventario de datos primarios. Subsistema Industrial. Alternativa III

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 las cenizas	tkm		Estimado por reportes de la empresa
Salidas			
Azúcar	t/d		Balances de materiales y energía
Miel Final	t/d		" "
Energía exportada a la red nacional	GJ/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 parabiogás	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)
Óxidos de nitrógeno	t/d		" "