



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE LA PRODUCCIÓN DE
AZÚCAR ESTÁNDAR DE UN INGENIO AZUCARERO EN
MÉXICO**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

MÓNICA RODRÍGUEZ CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. ALEJANDRO JUVENAL GUZMÁN GÓMEZ



CD. MX., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/407/19

ASUNTO: Asignación de Jurado

Alumno (a): Rodríguez Castillo Mónica

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. GONZALO RAFAEL COELLO GARCÍA
VOCAL	M. en I. ALEJANDRO JUVENAL GUZMÁN GÓMEZ
SECRETARIO	M. en C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
SUPLENTE	I.Q. CONSUELO MATIAS GARDUÑO
SUPLENTE	DRA. MARÍA GUADALUPE SALINAS JUÁREZ

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
CD. MX, a 21 de junio de 2019.

JEFE DE CARRERA


M. EN C. CESAR SAÚL VELASCO HERNÁNDEZ

DEDICATORIAS

A mis padres por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera y por brindarme todo lo necesario para concluir esta tesis.

A mi madre Lency Castillo Alcántara por todos sus esfuerzos, sacrificios, cuidados, amor y apoyo incondicional que me brindo para que pudiera culminar mis estudios. Hubo muchos momentos difíciles, pero usted siempre estuvo conmigo y me dio ánimos de luchar y seguir adelante. Gracias por recordarme que debo confiar en mí misma y que las metas que me proponga las puedo lograr con dedicación y esfuerzo. Te amo y admiro.

A mis hermanos Eldher Edwin Rodríguez Castillo y Lency Dennis Rodríguez Castillo por escucharme, animarme y acompañarme en cada momento. Me siento muy orgullosa de ustedes y quiero ser su ejemplo para demostrarles que todos los objetivos que se pongan los pueden llegar a lograr. Los quiero mucho.

A mi familia por su cariño, consejos y confianza en lo que hago, son mi ejemplo de lucha y perseverancia.

A Valentin Tostado Ramirez por tu compañía, cariño, comprensión y no dejar que me rindiera en los momentos más difíciles. Gracias por ayudarme a concretar mis metas, apoyarme en todos mis proyectos y en especial por compartir tu alegría conmigo.

A mis amigos por estar presentes, alentarme a seguir mis sueños y mostrarme el lado positivo a cada situación.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM y a la FES Zaragoza por permitir mi desarrollo profesional y personal.

A mi director de tesis M. en I. Alejandro Juvenal Guzmán Gómez por su asesoría, tiempo, constancia y dedicación en la realización de este trabajo. Y a cada uno de mis sinodales por el tiempo dedicado para la revisión del mismo.

Agradezco a cada una de las personas que con sus conocimientos, enseñanzas y experiencia me llevaron a concretar esta meta muy importante en mi vida.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	II
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	III
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	VI
CAPÍTULO 1. LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA	1
1.1. La caña de azúcar	1
1.2. El azúcar	2
1.3. Perspectiva mundial	3
1.3.1. <i>Producción mundial</i>	4
1.3.2. <i>Consumo mundial</i>	5
1.4. Mercado nacional	7
1.4.1. <i>Antecedentes de la agroindustria azucarera en México</i>	8
1.4.2. <i>Producción nacional</i>	10
1.4.3. <i>Consumo nacional</i>	12
1.5. Problemática y justificación	13
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	15
2.1. Antecedentes del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	15
2.2. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	17
2.3. Formas de presentar el ACV	18
2.4. Etapas del ciclo de vida	19
2.5. Marco normativo	20
2.6. Aplicaciones de los ACV	22
2.7. Ventajas y desventajas del ACV	24
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	26
3.1. Definición de objetivos y alcance	28
3.1.1. <i>Definición de objetivos de estudio</i>	28
3.1.2. <i>Alcance del estudio</i>	28
3.2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)	30
3.3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)	32

3.4.	Interpretación de resultados	34
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL ACV AL AZÚCAR ESTÁNDAR DE UN INGENIO AZUCARERO EN MÉXICO.		
4.1.	Metodología.....	36
4.1.1.	<i>Objetivos del estudio</i>	36
4.1.2.	<i>Alcance del estudio</i>	37
4.1.3.	<i>Unidad funcional</i>	38
4.1.4.	<i>Procedimientos de asignación</i>	38
4.2.	Descripción de los límites del sistema	39
4.3.	Descripción del proceso	39
4.3.1.	<i>Recibo de la caña</i>	40
4.3.2.	<i>Extracción del jugo (molienda)</i>	42
4.3.3.	<i>Clarificación</i>	43
4.3.4.	<i>Evaporación</i>	43
4.3.5.	<i>Cristalización y centrifugación</i>	44
4.3.6.	<i>Secado, enfriado y envasado</i>	45
4.4.	Análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) del caso de estudio.....	45
4.4.1.	<i>Ingenio azucarero</i>	46
4.4.2.	<i>Balances de masa</i>	47
4.4.3.	<i>Requerimientos energéticos</i>	63
4.4.4.	<i>Envase, comercialización y uso del azúcar estándar</i>	70
4.4.5.	<i>Resumen de entradas y salidas del sistema</i>	72
4.5.	Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV)	76
4.5.1.	<i>Clasificación</i>	76
4.5.2.	<i>Caracterización</i>	81
4.6.	Interpretación del ACV.....	88
4.6.1.	<i>Análisis de resultados</i>	88
CAPÍTULO 5. PROPUESTAS PARA LA MINIMIZACIÓN DE LOS DAÑOS IDENTIFICADOS.....		
5.1.	Daños a la calidad del ecosistema	94
5.2.	Daños a la salud humana.....	95
5.3.	Daños a los recursos	96

CONTENIDO

CONCLUSIONES	98
GLOSARIO DE TÉRMINOS	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXOS	112
Anexo A. Marco legal y normativo en materia ambiental aplicable a la agroindustria azucarera	112
Anexo B. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar del caso de estudio	114
Anexo C. Gráfico que relaciona los °Brix con el calor específico	116
Anexo D. Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de la sacarosa	117
Anexo E. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles	118
Anexo F. Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)	120
Anexo G. Tablas de caracterización completas para cada subsistema por cada categoría de impacto	121
Anexo H. Factores de caracterización de las categorías de impacto ambiental de la metodología Ecoindicador 99	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Principales productores de azúcar, 2016-17 y 2017-18*	5
Figura 1.2 Consumo mundial de azúcar, 2006-07 a 2017-18*	6
Figura 1.3 Principales consumidores de azúcar, 2016-17 y 2017-18*	7
Figura 1.4 Producción de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18*	11
Figura 1.5 Producción de tipos de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18*	12
Figura 1.6 Consumo de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18*	13
Figura 2.1 Etapas del ciclo de vida	20
Figura 3.1 Fases principales de un estudio de ACV	27
Figura 3.2 Inventario del ciclo de vida aplicado a un proceso unitario del sistema	31
Figura 4.1 Límites del sistema de estudio	39
Figura 4.2 Diagrama de producción típico de un ingenio azucarero.....	41
Figura 4.3 Diagrama de extracción de jugo de caña de azúcar.....	48
Figura 4.4 Diagrama de clarificación del jugo proveniente de los molinos.....	49
Figura 4.5 Diagrama de evaporación de quintuple efecto	53
Figura 4.6 Diagrama de cristalización básico para tres masas cocidas.....	58
Figura 4.7 Diagrama de secado de azúcar	61
Figura 4.8 Sistema de cogeneración tradicional de un ingenio azucarero.....	66
Figura 4.9 Daños a la calidad del ecosistema para 1kg de azúcar estándar.	89
Figura 4.10 Daños a la salud humana en DALY para 1 kg de azúcar estándar.....	90
Figura 4.11 Daños a los recursos en MJ excedentes para 1 kg de azúcar estándar.....	91
Figura 4.12 Categorías de impacto y categorías de daño en porcentaje causadas por la etapa de producción, envase o transporte del azúcar	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de azúcar	2
Tabla 2.1 Normativa internacional de gestión ambiental y del Análisis de Ciclo de Vida..	21
Tabla 2.2 Normativa mexicana de gestión ambiental y del Análisis de Ciclo de Vida.....	22
Tabla 3.1 Principales categorías de impacto.....	33
Tabla 4.1 Indicadores de rendimiento del caso de estudio zafras 2013-14 a 2017-18	46
Tabla 4.2 Flujos máxicos en t/h en operación de extracción	49
Tabla 4.3 Flujos máxicos en t/h en operación de clarificación.....	52
Tabla 4.4 Condiciones de operación en los evaporadores.....	54
Tabla 4.5 Relación de °Brix con el calor específico de una solución azucarada.....	55
Tabla 4.6 Flujos máxicos en t/h en operación de evaporación	57
Tabla 4.7 Flujos máxicos en t/h en operación de cristalización y secado	63
Tabla 4.8 Consumo teórico de energía térmica en cada etapa del procesamiento	65
Tabla 4.9 Composición máxica y molar de 100 kg de bagazo seco	68
Tabla 4.10 Composición final de los gases de combustión en la caldera por 100 kg bagazo quemado.....	69
Tabla 4.11 Entradas y Salidas del subsistema ingenio azucarero para la producción de 1kg de azúcar estándar	73
Tabla 4.12 Entradas y salidas del subsistema producto final de la comercialización de 1 Kg de azúcar estándar.....	75
Tabla 4.13 Valores de la contribución de categorías de impacto para la producción y comercialización de 1 kg de azúcar estándar	81

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

a	Composición de agua en las corrientes, en porcentaje masa.
A,B,C,E,F,G,J, etc.	Flujos máxicos de las entradas y salidas de las diferentes operaciones unitarias, en unidades de t/h (toneladas por hora).
ACV	Análisis de Ciclo de Vida.
AICV	Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química.
CEFP	Centro de Estudios de las Finanzas Públicas.
CNIAA	Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohola.
CONADESUCA	Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar.
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
CRE	Comisión Reguladora de Energía.
DALYs	Años de Vida Sometidos a una Discapacidad (<i>Disability Adjusted Life Years, en inglés</i>).
DOF	Diario Oficial de la Federación.
EICV	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.
EUSES	Sistema Europeo Uniforme para la Evaluación de Sustancias (<i>European Union System for the Evaluation of Substances, en inglés</i>).
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations, en inglés</i>).
FAS	Servicio Agrícola Extranjero (<i>Foreign Agricultural Service, en inglés</i>).
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
GTZ	Cooperativa Técnica Alemana (<i>Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, en alemán</i>).
ICV	Inventario de Ciclo de Vida.
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
INPer	Instituto Nacional de Perinatología.
ISO	Organización Internacional para la Estandarización (<i>International Organization for Standardization, en inglés</i>).

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

km	Kilómetros.
ns	Composición de aquellos componentes que no son sacarosa, en porcentaje masa.
mdt	Millones de toneladas.
MRI	Instituto de Investigación del Medio oeste (<i>Midwest Research Institute, en inglés</i>).
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
PCI	Poder Calorífico Inferior.
PEMEX	Petróleos Mexicanos.
PIB	Producto Interno Bruto.
REPA	Análisis del Perfil Ambiental y Recursos.
RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
s	Composición de sacarosa en las corrientes, en porcentaje masa.
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación.
SETAC	Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry, en inglés</i>).
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
SUCROMER	Empresa de Ingeniería y suministro de materia prima para la industria azucarera.
t	Toneladas.
t/h	Toneladas por hora.
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte.
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (<i>United Nations Environment Programme, en inglés</i>).
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
UNPASA	Unión Nacional de Productores de Azúcar S.A.
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (<i>United States Department of Agriculture, en inglés</i>).

RESUMEN

La industria azucarera en México además de ser una de las actividades productivas más importantes, genera un gran impacto al medio ambiente debido a su alto consumo de energía y generación de residuos al agua, el suelo y el aire. Uno de los métodos más novedosos para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales que se generan por un producto, servicio o proceso es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

En el presente trabajo se emplea la metodología general del ACV para determinar las cargas ambientales que ocasionan la elaboración y comercialización de azúcar estándar de un ingenio azucarero del centro del país. Las etapas que se realizaron en este estudio fueron los objetivos y alcances, se calcularon los balances de masa y energía, se consultaron diferentes datos para el análisis inventario (ICV), se llevó a cabo la evaluación de impactos a través del método Ecoindicador 99 (EICV), y finalmente se interpretaron los resultados y establecieron las conclusiones.

La aplicación de esta metodología nos permitió identificar los impactos ambientales asociados en la producción y comercialización que tienen una mayor contribución. Se determinó que éstos son la acidificación/ eutrofización, la emisión de sustancias al aire que generan el cambio climático y la extracción de combustibles fósiles. Estos impactos provocan un daño directo a la salud humana, al ecosistema y los recursos.

Entre las mejoras propuestas para minimizarlos de acuerdo con los resultados obtenidos se encuentran: el ahorro del agua, sistemas de tratamientos de agua, recuperación de residuos químicos peligrosos (grasas, aceites y productos químicos), sistemas de control de emisiones a la atmósfera eficientes y utilización de combustibles fósiles más limpios para la obtención de energía.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una creciente preocupación por la importancia del medio ambiente y los posibles impactos que se asocian con los productos fabricados y consumidos. La industria representa más de un tercio de todos los tipos de energía consumidos en el mundo (USDA, 2016).

Las industrias tienen una variedad de sistemas altamente intensivos en energía, es decir, vapor, calentamiento de procesos y equipos motorizados tales como compresores de aire, bombas, ventiladores, etc.

La agroindustria azucarera es una de las actividades productivas más importantes en México (CONADESUCA Y SAGARPA, 2016a). El proceso para la obtención de azúcar incluye la transformación de la materia prima que es la caña de azúcar, en una serie de procesos (molienda, clarificación, evaporación, cristalización y secado) los cuales generan un gran impacto al medio ambiente, ya que al igual que otras industrias cuenta con una gran cantidad de piezas móviles, lo que implica un alto consumo de electricidad y energía térmica.

Existen múltiples herramientas de sustentabilidad como la economía circular, ecoeficiencia, Sistemas de Gestión Ambiental (ISO 14000) y Evaluación de Impacto Ambiental. Y en el país el Programa Nacional de Auditoría Ambiental (industria limpia), Programa de Liderazgo Ambiental para la Competitividad y Sistema de Gestión de la Energía, entre otros. Sin embargo en esta tesis se aplicará el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ya que es uno de los métodos más novedosos utilizado para evaluar cuantitativamente estos impactos ambientales generados por los productos y procesos.

El ACV es una de las metodologías más adecuadas para evaluar la calidad ambiental de un producto, desde la adquisición de las materias primas hasta la producción, uso y disposición final, dicho proceso también es conocido como "de la cuna a la tumba". En éste se hace uso de distintos tipos de indicadores agregándolos según categorías de impacto debidamente calculadas, para que sea

posible analizar y resolver los diferentes problemas ambientales asociados al ciclo del producto.

Una de las etapas fundamentales del ACV contempla la recopilación de las entradas y salidas relevantes del sistema que se va a estudiar, resulta necesario tener establecidos los límites del sistema de acuerdo con los objetivos de estudio. Como flujos elementales que entran en el proceso se consideran la masa, energía y la importancia ambiental.

CAPÍTULO 1. LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA

1.1. La caña de azúcar

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2017): "La caña de azúcar es una gramínea tropical de tallo macizo, cilíndrico, alargado y sin ramificaciones, dividido en nudos y entrenudos, los que difieren o cambian con las diversas variedades en longitud, diámetro, forma y color".

La temperatura, la humedad y la luminosidad son los principales factores del clima que controlan su desarrollo. Es una planta tropical que se desarrolla mejor en lugares calientes y soleados. Es indispensable proporcionar una adecuada cantidad de agua durante su crecimiento. Se cultiva con éxito en suelos que mantienen materia orgánica y presentan buen drenaje, tanto externo como interno, y cuyo pH oscile entre 5.5 y 7.8 para su óptimo desarrollo (SAGARPA, 2017).

Una vez cosechada, la caña es enviada al ingenio azucarero, que es la planta industrial dedicada al procesamiento, transformación e industrialización de la caña de azúcar. (SAGARPA, 2016a)

Contiene un jugo rico en azúcar (sacarosa) que se emplea principalmente en alimentación como edulcorante nutritivo, aunque también se convierte en materia prima para la fabricación de papel, cemento, abonos y alimento animal. Los jugos que se obtienen en el proceso de producción pueden emplearse en la producción de alcohol (SAGARPA, 2016b).

Es una de las fuentes energéticas más económicas para el hombre, además está considerada como uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa (SAGARPA, 2016b).

En México la caña de azúcar se cultiva en 22 entidades federativas, principalmente Veracruz, Jalisco, y San Luis Potosí; su importancia radica en que es la materia prima de la industria azucarera (SAGARPA, 2017).

1.2. El azúcar

De acuerdo con el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA, 2016), el azúcar es un producto sólido que es obtenido por la cristalización de la sacarosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) y puede ser obtenida de los jugos de la caña de azúcar, de la remolacha azucarera o de otras especies vegetales mediante procesos industriales apropiados y específicos.

Se distinguen cuatro tipos de azúcar producidos en México a partir de la caña de azúcar, el crudo o mascabado, estándar, refinada y blanco especial, sus características se muestran en la tabla 1.1. Cada uno de ellas se distingue por el número de veces que ha sido procesada. El primer nivel o con menor número de procesamiento es el azúcar mascabado (CONADESUCA, 2016).

*Tabla 1.1 Tipos de azúcar. Fuente: CONADESUCA, 2016. * Consultar glosario de términos.*

Azúcar crudo (mascabado)	Azúcar estándar	Azúcar blanco especial	Azúcar refinada
Es el producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, que se encuentran cubiertos por una película de su miel madre, en una concentración mínima de 96 % de polarización*. Este tipo de azúcar se obtiene mediante proceso industrial conformado de las operaciones unitarias de extracción, clarificación, evaporación, cristalización y centrifugación.	Producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, en una concentración mínima de 99.40 % de polarización*. Este tipo de azúcar se obtiene mediante proceso similar al utilizado para producir azúcar crudo (mascabado), aplicando variantes en las etapas de clarificación y centrifugación, con el fin de conseguir la calidad del producto deseada.	Producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, en una concentración mínima de 99.70 % de polarización*. Este tipo de azúcar se obtiene mediante proceso similar al utilizado para producir azúcar crudo (mascabado) y estándar, optimizando las etapas de clarificación y centrifugación, para alcanzar la calidad deseada.	Producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, en una concentración mínima de 99.90 % de polarización*. Este tipo de azúcar se obtiene sometiendo el azúcar crudo (mascabado) o estándar a proceso de refinación.

El azúcar es un producto que pocas veces se consume en forma directa siendo lo usual adicionarlo a otros alimentos para mejorar su sabor, textura y cuerpo (bebidas, jugos, helados), utilizarlo como preservante (leche, frutas, jamones) y

como mejorador de la apariencia (panadería, pastelería). Ningún otro edulcorante puede realizar todas las funciones del azúcar con su costo y facilidad, por lo que el consumo de este producto es muy elevado (Perafán, 2009).

1.3. Perspectiva mundial

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2016), considera a la caña de azúcar el cultivo agrícola más importante del planeta.

La caña de azúcar es necesaria para satisfacer la demanda básica del cuerpo humano, por lo que resulta un producto esencial. La caña de azúcar también es un cultivo valioso para los bioproductos porque produce azúcar, que tiene una demanda muy alta en el mercado, y también bagazo que proporciona energía en forma de combustible para la generación de electricidad y vapor (Renouf et al., 2008). El bagazo se utiliza como recurso de entrada en 80 países productores de caña de azúcar (Botha y Blottnitz, 2006). En el pasado, la industria azucarera producía solo azúcar pero actualmente la mayoría de las industrias azucareras están involucradas en la producción de azúcar, electricidad y etanol (Ramjeawon, 2008).

La industria representa más de un tercio de todos los tipos de energía consumidos en el mundo. Las industrias tienen una variedad de sistemas altamente intensivos en energía, es decir, vapor, calentamiento de procesos y equipos motorizados tales como compresores de aire, bombas, ventiladores etc. La industria azucarera, así como otras industrias tienen muchas piezas móviles y de alto consumo de energía que tienen varios impactos en el medioambiente. Por lo tanto, se tienen altas demandas de electricidad y energía térmica. La mayor parte de la energía que utiliza proviene del sistema convencional de generación de electricidad (carbón, petróleo y gas) (USDA, 2016).

Es fundamental la reducción del consumo de electricidad y de los impactos en el medioambiente a nivel mundial. Existen diferentes formas y técnicas para resolver estos problemas, como el análisis del ciclo de vida (ACV) y la gestión de la

energía, que son herramientas primordiales para analizar los impactos ambientales (Rajan, 2001). Por lo tanto, es importante analizar los aspectos fundamentales de la obtención de este producto esencial, el azúcar desde la producción de las materias primas hasta su residuo final en un estudio de ACV.

1.3.1. Producción mundial

El azúcar se produce aproximadamente en 115 países en el mundo. De estos, 67 países producen azúcar a partir de caña de azúcar, 39 de remolacha azucarera y 9 países de caña de azúcar y remolacha azucarera (Lichts, 2007). En otras palabras, el azúcar se produce en un 70% a partir de la caña de azúcar y en un 30% a partir de la remolacha azucarera y la mandioca, etc. (Contreras, 2009).

La producción de azúcar durante el ciclo 2016-17 alcanzó 173.98 millones de toneladas (mdt) en todo el mundo. De acuerdo con las estimaciones del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) la producción para el edulcorante para el ciclo 2017-18 será de 191.81 mdt, un volumen superior en 17.83 mdt respecto al 2016-17.

Como se observa en la figura 1.1 los principales países productores en el mundo de azúcar son: Brasil, India, Unión Europea, Tailandia y China, que en conjunto aportan el 60% de la producción global (USDA y FAS, 2018).

Se pronostica que la producción mundial para el periodo 2018-19 por debajo de 4 mdt a 188 mdt. Aunque se tendrá una menor producción en Brasil, Pakistán y la Unión Europea, lo compensarán las cosechas récord en India y Tailandia. México ocupa el noveno lugar mundial su producción permanece esencialmente sin cambios por séptimo año con 6.4 mdt como producción estimada (USDA-FAS, 2018).

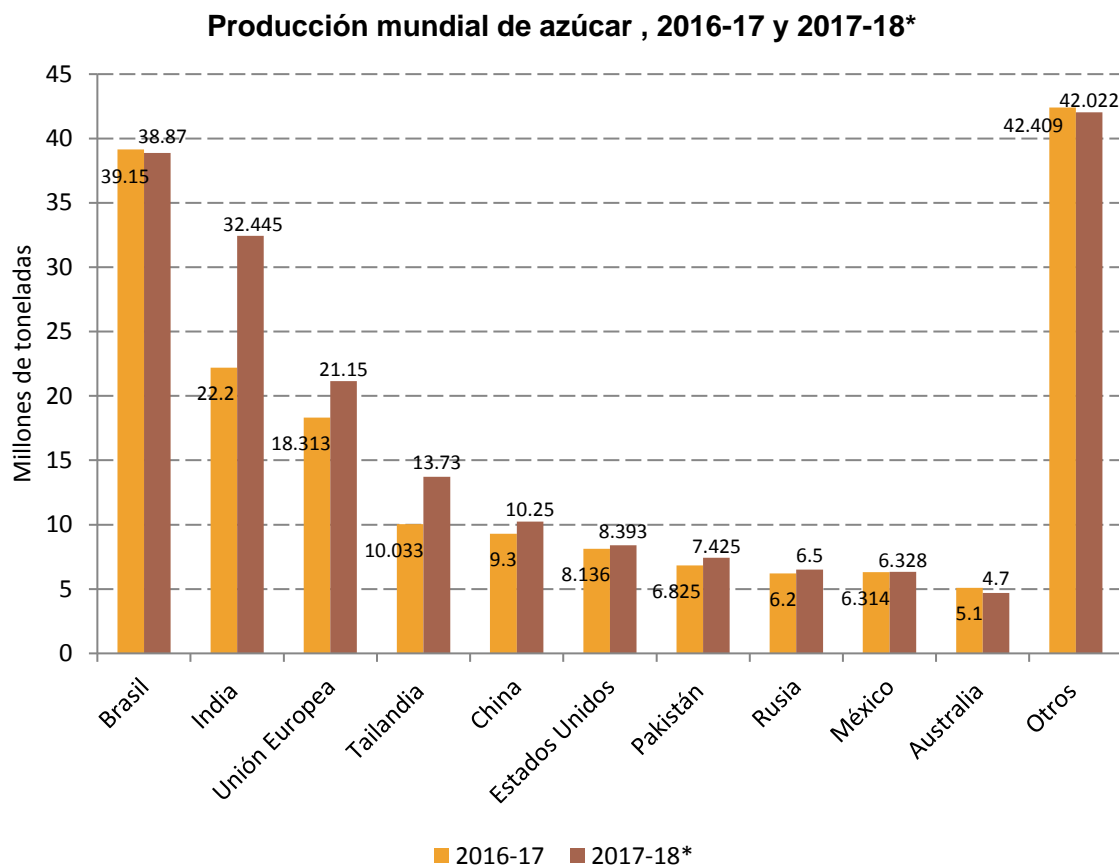


Figura 1.1 Principales productores de azúcar, 2016-17 y 2017-18* estimado. Fuente: USDA-FAS, 2018.

1.3.2. Consumo mundial

El consumo global de azúcar presenta tendencia al alza tal como muestra la figura 1.2. Las estimaciones más recientes de USDA pronostican que el consumo mundial de azúcar para 2017-18 fue de 174.1 mdt.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, 2015), se estima que el consumo mantenga una tendencia al alza en el corto y largo plazo, impulsado por mayor consumo en países en vías de desarrollo. Lo anterior derivado de los bajos precios en el mercado internacional. El aumento en el consumo se espera provenga, particularmente, de países de África y Asia.

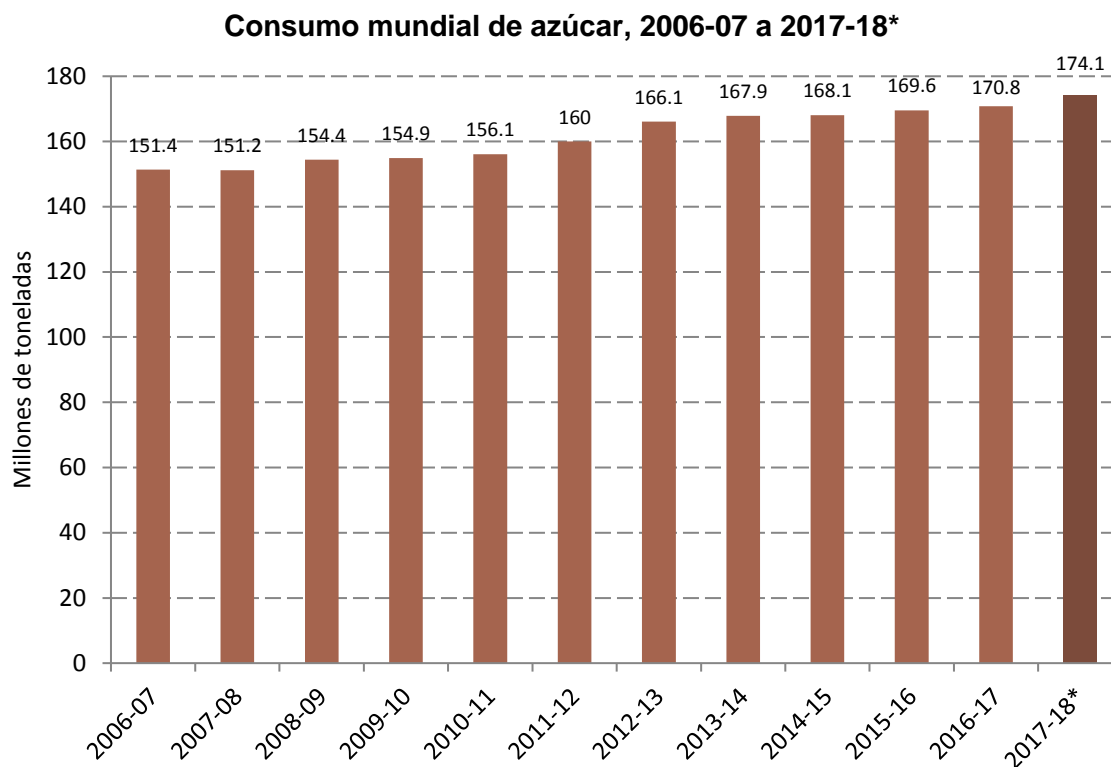


Figura 1.2 Consumo mundial de azúcar, 2006-07 a 2017-18 estimado. Fuente: USDA-FAS, 2018.*

Como muestra a continuación en la figura 1.3 los principales consumidores de azúcar a nivel mundial son India, Unión Europea y China.

En India, Unión Europea y China se concentra el 35% del consumo mundial de azúcar. En India, el consumo del edulcorante para el ciclo 2017-18 se pronosticó de 26.5 mdt con un incremento superior al ciclo pasado, impulsado por la fuerte demanda de la industria refresquera y para procesamiento de alimentos. Para la Unión Europea se estima un consumo de azúcar de 18.8 mdt para el ciclo 2017-18, lo que representa un consumo similar al del ciclo previo (18.7 mdt). Caso similar al de China con un consumo de 15.7 mdt y el ciclo previo fue de 15.6 mdt (USDA-FAS, 2018).

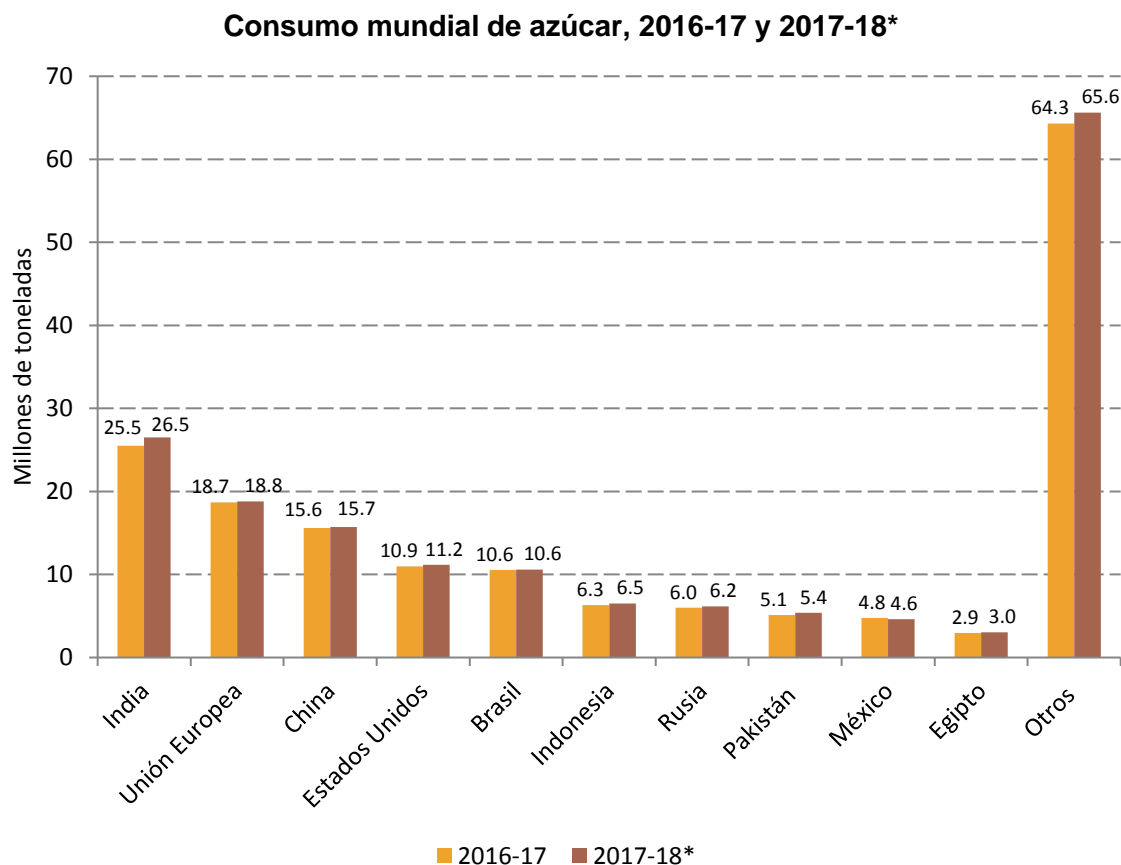


Figura 1.3 Principales consumidores de azúcar, 2016-17 y 2017-18 estimado. Fuente: USDA-FAS, 2018.*

Por otro lado, el consumo per cápita global muestra un aumento, al pasar de 24.5 kg en 2014 a 25.1 kg en 2017. Las proyecciones indican que el consumo per cápita se incrementará aproximadamente en un cuarto de kilo por año hasta el 2024 (OCDE y FAO, 2015).

1.4. Mercado nacional

El azúcar es un producto básico en la dieta de los mexicanos, está presente cotidianamente en nuestra mesa en el consumo de refrescos, jugos, néctares, galletas, chocolates y pasteles. La Ley de Desarrollo Rural Sustentable identifica la caña como un cultivo básico para el país (SAGARPA, 2016b).

Se ubica como uno de los 10 cultivos más consumidos por las familias en México, cuyo gasto en productos derivados de la caña de azúcar representa

aproximadamente 5% de gasto total de alimentos, bebidas y tabaco (SAGARPA, 2017).

1.4.1. Antecedentes de la agroindustria azucarera en México

La introducción de la caña en tierras americanas por Colón, Cortés, Pizarro y otros exploradores, tuvo como resultado que entre 1500 y 1600 este cultivo se desarrollara en la mayoría de los países tropicales de América, como México, Brasil, Perú, etc. En México fue cultivada por primera vez en San Andrés Tuxtla, Veracruz en 1519, la cual fue traída por Hernán Cortés de Cuba (Rivera, 2008).

La historia de la agroindustria del azúcar se remonta hasta el año de 1524, fecha en el que se instaló el primer trapiche para producir dulce y comenzó sus operaciones en 1538 (Rivera, 2008).

Los gobiernos revolucionarios, ante la necesidad de satisfacer la demanda nacional del dulce y obtener divisas por medio de su exportación, adoptaron medidas para fomentar la actividad. En el Código Agrario que se promulgó durante el gobierno de Obregón, se consideró como "Inafectables las tierras de los ingenios cultivadas con el fin de conservar su unidad agroindustrial". En esta época, la industria inició una etapa de crecimiento estable, aumentó el número de ingenios y la producción se incrementó hasta satisfacer la demanda nacional y canalizar cada vez más el azúcar al mercado internacional (Domínguez, 1989).

En 1938, bajo los auspicios del Gobierno del Gral. Cárdenas, se creó la Unión Nacional de Productores de Azúcar S.A. (UNPASA), que agrupó a todos los ingenios del país y se encargó de regular su producción, financiarla, distribuirla y comercializarla en toda la república. Asimismo, cuidó que el excedente se destinara a la exportación. En febrero de 1943 se constituyó la Financiera Nacional Azucarera S.A. como institución privada, financiera y fiduciaria, que en 1953 se convirtió en Institución Nacional de Crédito (Domínguez, 1989).

En 1959 se inicia el conflicto entre Estados Unidos y Cuba (que era su principal abastecedor), por lo que éste aumentó sus compras en Brasil, Haití, México y otros países. Como consecuencia de este incremento en la demanda externa, la

producción azucarera creció. Sin embargo, los empresarios queriendo aumentar sus ganancias retrasaron las nuevas inversiones, descuidaron el mantenimiento y desviaron subsidios y créditos de gobierno hacia otras actividades más redituables (Domínguez, 1989).

En 1968 la crisis productiva se agudizó en mayor medida y la producción de azúcar disminuyó (Crespo, 1988). La década de los 70's se caracteriza tanto por la transferencia de ingenios, como por el esfuerzo del sector público por renovar las instalaciones fabriles, responsabilizarse de su operación y generar la nueva capacidad necesaria para satisfacer la demanda, creándose para ello la Comisión Nacional de la Industria Azucarera (CNIA), organismo gubernamental responsable de la planeación y de la administración de la industria azucarera (Domínguez, 1989).

A partir de 1977 el Estado se dio a la tarea de modernizar la industria y recuperar los niveles operativos requeridos para hacer frente a las necesidades del país, pero la demanda se había venido incrementando de manera acelerada por lo que ya no se pudo cubrir, en forma tal que en los años 1980-1984 la oferta no alcanzó a cubrir la demanda interna y hubo necesidad de recurrir a las importaciones. En 1987, el gobierno federal decidió poner a la venta parte de los ingenios de su propiedad, iniciándose con ello una serie de medidas orientadas a liberalizar el mercado (Crespo, 1988).

La privatización de los ingenios siguió el procedimiento definido por la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP), que designó como banco agente a Financiera Nacional Azucarera, S.N.C.(FINA), para que realizara la valoración de todos los ingenios. La privatización azucarera se realizó mediante cuatro licitaciones públicas en 1988 y en Mayo de 1990 (Cárdenas, 1990).

La venta de los ingenios al sector privado provocó desequilibrios en el mercado nacional del producto, ya que algunos compradores incursionaron en nuevas formas de comercialización y diferentes condiciones de financiamiento, la problemática se agravó a finales de 1990, cuando se eliminaron los permisos

previos de importación de azúcares y se exentó de pago de arancel a la empresa paraestatal Azúcar, S.A. Estas medidas provocaron la importación de azúcares de diferentes calidades, introducidas a precios por abajo de los concertados, así como la acumulación de inventarios por parte de los productores, generándose a partir de ello, una importante sobreoferta de azúcar, consecuencia de la importación indiscriminada y el mantenimiento prolongado de inventarios nacionales, que provocó un alto costo en su almacenamiento y financiamiento para los industriales (CEFP *et al.*, 2001).

A partir de la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en enero de 1994, México acordó la exportación a Estados Unidos de 25 mil toneladas de azúcar durante los primeros 6 años de operación del Tratado, para posteriormente y comprobando una producción excedentaria de 2 años, exportar sin límite la sobre producción de azúcar a ese país, sin embargo en el año 2000 Estados Unidos anunció que la cuota máxima de exportación de azúcar originaria de México sería de 116 mil toneladas (CEFP *et al.*, 2001).

Hasta mediados de los años noventa, el azúcar fue el principal edulcorante usado por la industria; sin embargo, con la puesta en marcha del TLCAN, se detonó el consumo de jarabes de maíz de alta fructosa y de los edulcorantes no calóricos de tipo artificial. Ante esta situación, la agroindustria de la caña de azúcar se ha adaptado, atendiendo los bajos índices de competitividad y reduciendo los costos asociados a la producción de azúcar (SAGARPA y CONADESUCA, 2017a).

1.4.2. Producción nacional

En México la agroindustria azucarera es una de las más importantes debido a su relevancia económica y social en el campo mexicano. De acuerdo a información del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, esta agroindustria proporciona alrededor de 930 mil empleos directos, aproximadamente 2.2 millones de empleos indirectos. Sus actividades productivas se desarrollan en 227 municipios de 15 entidades federativas, donde habitan más de 12 millones de personas (CONADESUCA, 2014). Según el Instituto Nacional

de Estadística y Geografía (INEGI), representa el 0.4% del PIB nacional, el 11.6% del PIB primario, y 2.5% del PIB manufacturero.

Los 51 ingenios en la zafra 2017-18 reportaron una producción de 6,009,520 toneladas de azúcar (CONADESUCA, 2018). En la figura 1.4 se puede observar la producción en México desde el ciclo 2006-07 al estimado del ciclo 2017-18, la cual mantiene una tendencia constante desde hace cinco años (CONADESUCA, 2018).

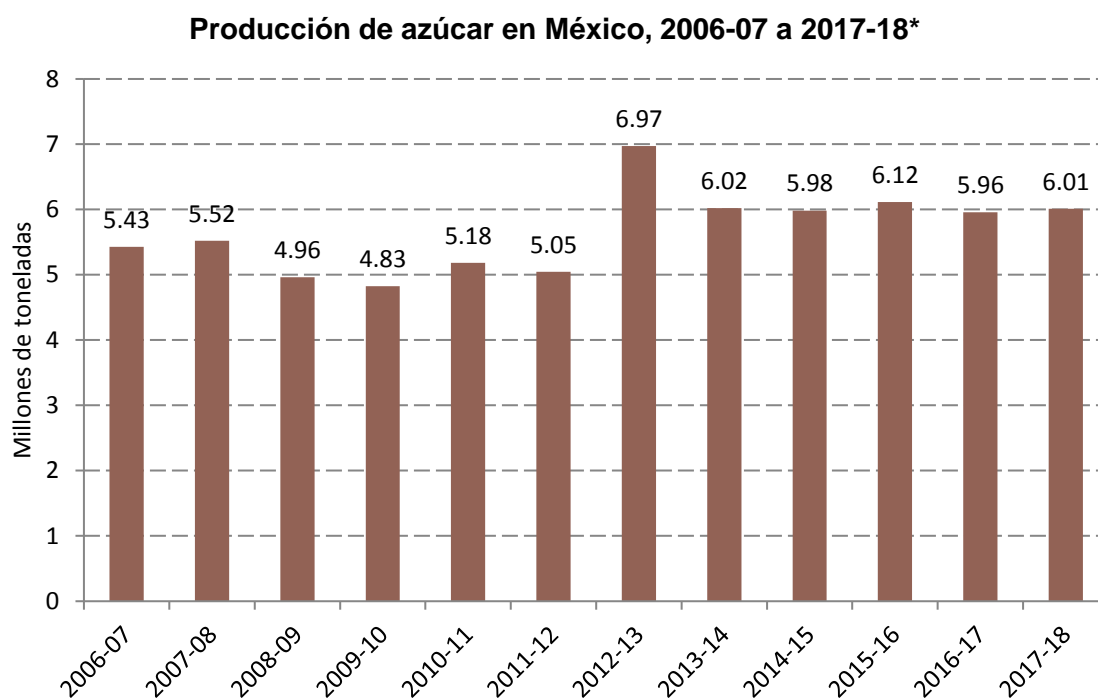


Figura 1.4 Producción de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18* Estimado. Fuente: CONADESUCA, 2016a y 2018.

Como se mencionó anteriormente en México se producen diferentes tipos de azúcar estándar, refinada, blanco especial y mascabado. La mayor parte de la producción nacional es de azúcar estándar (64.03% del volumen total) como se ve en la figura 1.5, seguida por el azúcar refinada (27.22%), mascabado (4.41%) y blanco especial (4.34%) (CONADESUCA y SAGARPA, 2016a).

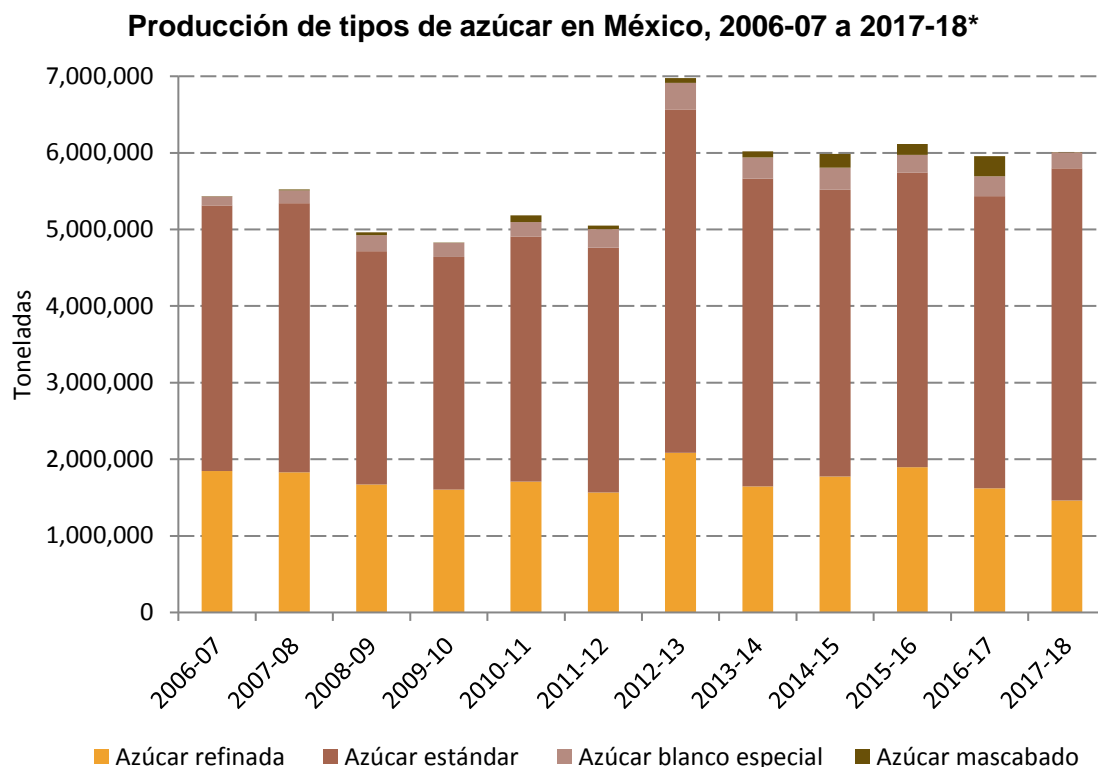


Figura 1.5 Producción de tipos de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18* estimado.
Fuente: CONADESUCA, 2016a y 2018.

1.4.3. Consumo nacional

El patrón de consumo de edulcorantes a nivel nacional se concentra principalmente en el azúcar y en el jarabe de maíz rico en fructosa. En la figura 1.6 se presenta el consumo de fructosa (Jarabe de maíz de alta fructosa) y azúcar en México. Durante 2016-17 el consumo nacional de edulcorantes en México se ubicó en 4.52 mdt, lo que representó el 72.68% de la producción de ese ciclo. Durante el periodo 2017-18 el consumo estimado de azúcar en el país se registró de 4.23 mdt (CONADESUCA y SAGARPA, 2017b).

El azúcar de caña, ha sido desde la época de la conquista, el endulzante por excelencia en México, el consumo de azúcar per cápita ha aumentado en 45.6% desde 1970, esto quiere decir que cada año cada persona en México consume entre 42 y 52 kilos de azúcar (SIAP, 2016). Con un consumo per cápita promedio al año de 36.7 kg de azúcar (SAGARPA, 2016b).

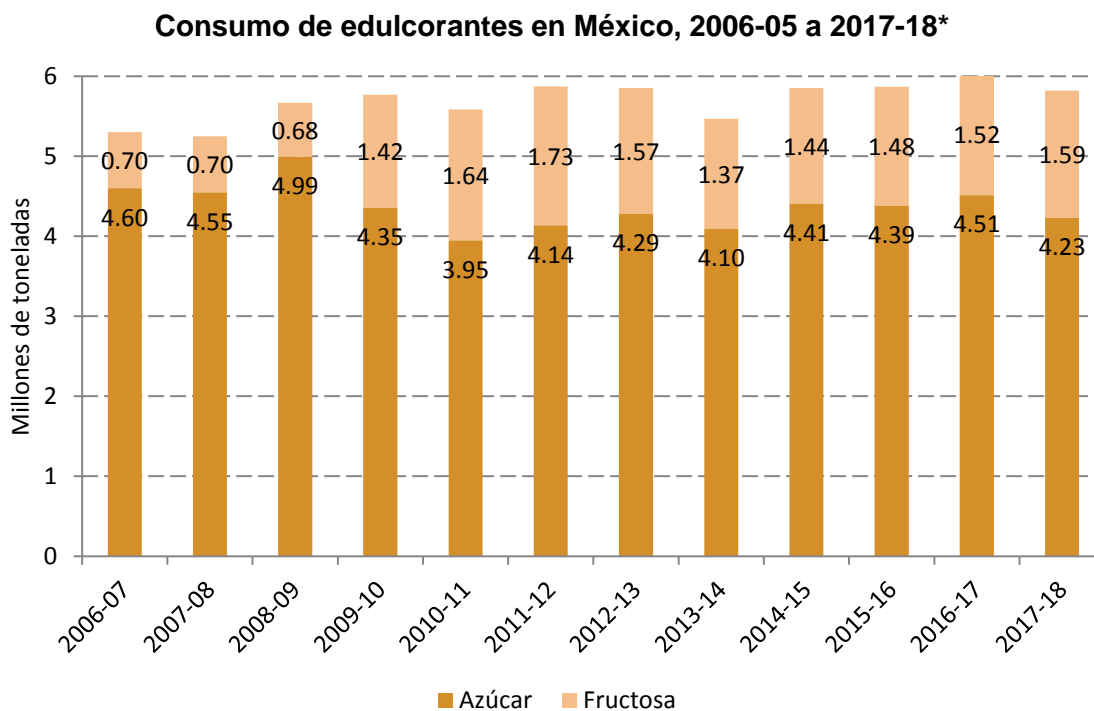


Figura 1.6 Consumo de azúcar en México, 2006-07 a 2017-18* estimado. Fuente: CONADESUCA, 2017b.

1.5. Problemática y justificación

La agroindustria azucarera es una de las actividades productivas más importantes en México, proporciona alrededor de 930 mil empleos directos (CONADESUCA, 2014). Actualmente existen 51 ingenios, los cuales reportaron una producción de azúcar de 6,009,520 toneladas de azúcar (CONADESUCA, 2018). Este producto es básico en la dieta de los mexicanos y tiene un consumo elevado debido a que se adiciona en la mayoría de los alimentos que consumimos diariamente.

Dada la importancia de la agroindustria azucarera a nivel nacional, se identificó que las actividades productivas y de comercialización que lleva a cabo generan altos efectos contaminantes sobre el medio ambiente y los recursos naturales.

El impacto ambiental es derivado de la actividad industrial misma y de los residuos que produce. Presenta efectos contaminantes sobre el agua derivados de su elevado consumo energético, sus descargas de alta temperatura y gran contenido de materia orgánica (bagazo y cachaza). Además, contribuye a la contaminación

del aire por la utilización de combustóleo y bagazo para la generación de energía térmica.

La problemática actual respecto a la calidad del medio ambiente hace fundamental la reducción del consumo energético y generación de residuos en la agroindustria azucarera en el país.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica más adecuadas para identificar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales generados a lo largo de la vida de un producto (Romero, 2003). Permite mejorar la eficiencia general de las industrias, reducir las emisiones en el medio ambiente y la utilizar los desechos (Rajan, 2001).

Esta tesis hace uso de la metodología general de (ACV) de la producción y comercialización del azúcar estándar de un ingenio azucarero en México, el cual es un método novedoso utilizado para evaluar los impactos ambientales y que no ha sido estudiado antes a este nivel de detalle en el país. Se cuantifican los impactos ambientales asociados al azúcar estándar y posteriormente se plantean las propuestas más relevantes de minimización y control de la contaminación de acuerdo al tipo de daño que se genera en el ecosistema, a la salud humana y a los recursos.

CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

2.1. Antecedentes del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) tuvo sus inicios en la década de 1960. Las preocupaciones sobre las limitaciones de las materias primas y los recursos energéticos despertaron el interés en encontrar cómo explicar de manera acumulativa el uso de energía, proyectar el suministro y uso futuro de recursos. Una de las primeras publicaciones de este tipo la hizo Harold Smith, en la Conferencia Mundial de la Energía en 1963, en la cual informó su cálculo de requisitos acumulativos de energía para la producción de intermedios químicos y productos (Vigon, 1993).

El desarrollo del ACV se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa. Si bien el primer ACV fue realizado en 1969 por *el Midwest Research Institute* (MRI) para la compañía Coca-Cola (Romero, 2003). El análisis se aplicó a envases de cristal y plástico con el objetivo de disminuir la cantidad de recursos utilizados, reducción de costos y de forma indirecta, a la reducción de emisiones contaminantes al ambiente (Chacón, 2008).

A partir de entonces, el MRI comenzó a referirse a este tipo de estudios como el Análisis del Perfil Ambiental y Recursos (REPA, por sus siglas en inglés), que posteriormente evolucionó a un análisis de cadena de producción desde la extracción de la materia prima, hasta su disposición final. Entre 1970 y 1990, se aplicaron diversos tipos de ACV, sin embargo, las diferencias en el tipo de enfoques y la carencia de un marco común propiciaron que el análisis perdiera interés como una herramienta analítica aplicada y aceptada (Guinée *et al.*, 2012).

Sin embargo, a lo largo de este tiempo, se continuaron realizando análisis del inventario del ciclo de vida y la metodología mejoró a través de un flujo lento de aproximadamente dos estudios por año, la mayoría de los cuales se centraron en los requerimientos de energía. Durante este tiempo, el interés europeo creció con

el establecimiento de *Environment Directorate (DG X1)* por parte de la Comisión Europea (Vigon, 1993).

En 1993, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) y la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, por sus siglas en inglés) comenzaron la elaboración de una metodología (Gazulla et al, 2012), por lo que se formuló el primer código internacional: Código de prácticas para el ACV (*Code of Practice for Life Cycle Assessment*), con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados para que siguieran un mismo procedimiento. Esto impulsó el inicio de desarrollos masivos de ACV en diversas áreas de interés mundial, pues se realizaron conferencias, talleres y políticas sobre ACV (Bravo, 2014).

Posteriormente, la ISO apoyó este desarrollo para establecer una estructura de trabajo, uniformizar métodos, procedimientos, y terminologías, debido a que cada vez se agregaban nuevas etapas, se creaban metodologías, índices y programas computacionales dedicados a realizar ACV en plantas industriales, etc. (Bravo, 2014).

Después de 30 años desde los primeros estudios el ACV ha tenido un avance impresionante, sin embargo, se reconoce que la técnica está en una etapa temprana de su desarrollo. Muchos ACV realizados han sido parciales (sólo se ha practicado la fase de inventario) y aplicados mayoritariamente al sector de envases (aproximadamente un 50%), seguidos de los de la industria química y del plástico, los materiales de construcción y sistemas energéticos, y otros menores como los de pañales, residuos, etc. (Zaéñz y Zufía, 1996). Sólo en los últimos años se ha podido introducir la fase de evaluación de impacto en los estudios realizados (Romero, 2003).

Para el año 2002, el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) y la SETAC formaron la Asociación Internacional conocida como Iniciativa Ciclo de Vida, cuyo objetivo principal es poner en práctica el concepto de “Ciclo de Vida” (Guinée *et al.*, 2011).

El período 2000-2010 puede caracterizarse como la década de la elaboración. Si bien la demanda de ACV aumenta, el período actual se caracteriza nuevamente por una divergencia en los métodos con respecto a los límites de los sistemas y los métodos de asignación, ACV dinámico, ACV espacialmente diferenciado, etc. Además de esto, se han propuesto y/o desarrollado enfoques de Costo del Ciclo de Vida (CCV) y Evaluación de Ciclo de Vida Social (ECVS) (Guinée *et al.*, 2012).

En la actualidad existen diferentes plataformas e instituciones que promueven la disponibilidad, intercambio, uso de información, métodos y estudios para tener un apoyo fiable en la toma de decisiones en las políticas públicas y para diferentes sectores, con base en la metodología de ACV (Zenón y Yhajaira, 2016).

En México, el desarrollo de estudios y bases de datos de ACV no ha sido tan difundido comparado con otros países como Francia, en el que para ciertos productos este tipo de estudios son un requerimiento legal. A la fecha son escasas las empresas y organizaciones mexicanas que han decidido incursionar en este ramo de las ciencias ambientales (Gómez, 2012).

Se han realizado algunos trabajos de investigación como los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietileno tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo por el INECC en 2012, ACV de la vivienda de autoconstrucción por Bravo en 2014, ACV de la bioenergía en México por el Red Mexicana de Bioenergía en 2016, ACV de los billetes mexicanos por el Banco de México en 2013, selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales por Adalberto Noyola, Juan Manuel Morgan-Sagastume y Leonor Patricia Güereca en 2013, entre otros.

2.2. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una herramienta metodológica que identifica, cuantifica y evalúa los impactos ambientales potenciales generados a lo largo de la vida de un producto, material o servicio (Romero, 2003). Ayuda a identificar dónde se pueden hacer mejoras ambientales en el ciclo de vida del producto y diseño de nuevos productos (Jolliet y Soucy, 2016).

La SETAC define el Análisis de Ciclo de Vida como un "proceso objetivo para evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar su impacto en el medio ambiente, evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental".

La metodología del ACV se utiliza actualmente para evaluar la carga medioambiental de un producto, proceso o actividad en todo su ciclo de vida. Pretende evaluar los potenciales impactos ambientales causados durante todas las etapas, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final de los residuos (Capuz y Gómez, 2004). Este enfoque se conoce como "de la cuna a la tumba".

El ACV es una técnica que se evalúa mediante:

- ◇ La recopilación de un inventario de las entradas y las salidas relevantes de un sistema.
- ◇ La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con esas entradas y salidas.
- ◇ La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio (Sellers, 2015).

2.3. Formas de presentar el ACV

El ACV conceptual, es la forma más simple de realizar un análisis de ciclo de vida, requiere de un nivel básico de información e inventario para conocer los aspectos ambientales. Los resultados son de ayuda a los tomadores de decisiones para identificar los productos con un potencial menor de impacto ambiental. Los resultados se presentan usando gráficas simples o diagramas de flujo de fácil interpretación. Mientras que el ACV simplificado, se enfoca en los aspectos ambientales más importantes, se usan bases de datos genéricas y datos sobre la producción de energía. Por su parte, el ACV detallado, incluye el proceso completo de análisis y requiere unas bases de datos profundas, enfocadas

exclusivamente en el objetivo del ACV (*Departament of Environmental Affairs and Tourism, 2004*).

El tipo de forma a presentar dependerá del objetivo y alcance, así como la disponibilidad que se tenga respecto a los datos para el inventario.

2.4. Etapas del ciclo de vida

El término "ciclo de vida" es de uso común. Cuando se analizan las características ambientales de los productos industriales y cuando se trata del ciclo de vida de ese producto, hay que entender que se refiere al ciclo de vida físico, y éste incluye las siguientes etapas (Aranda y Zabalza, 2010):

Adquisición de materias primas: Esta etapa del ciclo de vida de un producto incluye la extracción de materias primas y fuentes de energía de la tierra, como la extracción de recursos forestales, minerales, combustibles, entre otros. Se considera parte de esta etapa el transporte de las materias primas desde el punto de adquisición hasta su transformación.

Producción: En esta etapa se produce el producto y el embalaje a partir de las materias primas y lo entrega a los consumidores. Tres pasos están involucrados en esta transformación: producción de materiales, fabricación de productos, embalaje y distribución.

Uso/ reuso/ mantenimiento: Esta es la etapa con la que los consumidores están más familiarizados con el uso real, la reutilización y el mantenimiento del producto. El consumo de energía y los impactos ambientales asociados con el almacenamiento y el consumo del producto se consideran es esta etapa.

Reciclaje/ Gestión de residuos: Los gastos de energía y los impactos ambientales asociados con la disposición del producto se incluyen en esta etapa, así como las opciones de gestión de residuos post-consumo como el reciclaje, aprovechamiento energético, el compostaje, la incineración, deposición en vertedero etc.

En la figura 2.1, se muestran las fases del ciclo de vida para un producto genérico.

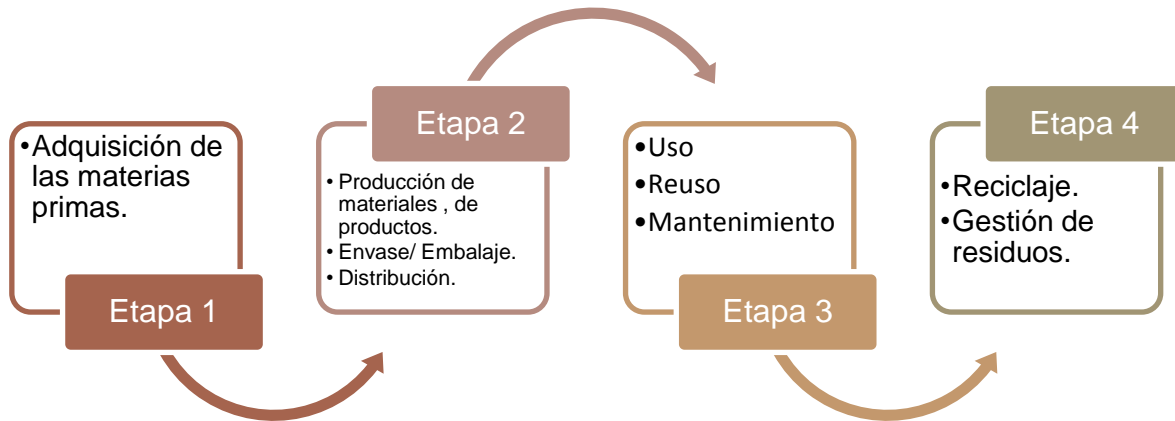


Figura 2.1 Etapas del ciclo de vida. Fuente: B.W. Vigon et al., 1993.

Según la información anterior el ciclo de vida se puede definir como una serie de etapas consecutivas desde la adquisición de las materias primas o generación de recursos naturales hasta su eliminación final (Capuz y Gómez, 2004).

2.5. Marco normativo

Entre los años 1980 y 1990, ISO publicó más de 350 normas relacionadas con cuestiones ambientales. La serie ISO 14040 a 14049 está dedicada al ACV. (Jolliet et al., 2016).

El objetivo, en el momento de publicar la normativa, fue marcar las pautas de la metodología y dar unas directrices generales de los principios y requerimientos para realizar estudios y trabajos del ACV. Más adelante, y mediante sucesivas publicaciones, se fue desarrollando la metodología y avanzando en diversas etapas del Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (AICV), la evaluación de impactos, etc. (Capuz y Gómez, 2004).

En la tabla 2.1 se muestran las normas clave en gestión ambiental y aquellas específicas para el Análisis del Ciclo de Vida. Las correspondientes normas mexicanas (NMX) se incluyen en la tabla 2.2. Las normas mexicanas son de ámbito voluntario, solo son referencia para determinar la calidad de productos o servicios.

*Tabla 2.1 Normativa internacional de gestión ambiental y del Análisis de Ciclo de Vida.
Fuente: Jolliet. et al., 2016.*

Normas clave en gestión ambiental	
Código	Título
ISO 14001	Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación de uso (2004).
ISO 14004	Sistemas de gestión ambiental. Directrices generales sobre principios, sistemas y técnicas de apoyo (2004).
ISO 14020-25	Clasificación y declaraciones medioambientales (1999-2006).
ISO 14031	Gestión ambiental. Evaluación del desempeño ambiental. Directrices (1999).
ISO 14040	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y estructura (2006).
ISO 14041	Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Definición del objetivo y alcance y el análisis de inventario (2006).
ISO 14042	Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Evaluación de impactos (2006).
ISO 14043	Gestión medioambiental. Análisis de ciclo de vida. Introducción (2006).
ISO 14044	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices (2006).
ISO 14046	Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices (2014).
ISO 14047	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Ejemplos de aplicación de la ISO 14042 (Informe técnico).
ISO 14048	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Formato para la documentación de datos del análisis de ciclo de vida.
ISO 14050	Gestión ambiental. Vocabulario (2009).

*Tabla 2.2 Normativa mexicana de gestión ambiental y del Análisis de Ciclo de Vida.
Fuente: DOF, 2009.*

Normas clave en gestión ambiental	
Código	Título
NMX-SAA-14025-IMNC-2008	Gestión Ambiental. Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III-Principios y procedimientos. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de febrero de 2009).
NMX-SAA-14031-IMNC-2002	Gestión ambiental. Evaluación del desempeño ambiental. Directrices. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de febrero de 2003).
NMX-SAA-14040-IMNC-2008	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de febrero de 2009).
NMX-SAA-14044-IMNC-2008	Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de febrero de 2009).
NMX-SAA-14065-IMNC-2008	Gases de efecto invernadero. Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para uso en la acreditación u otras formas de reconocimiento. (Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de febrero de 2009).

El marco legal y normativo en materia ambiental aplicable a la agroindustria azucarera se describe en la tabla 1 y 2 del anexo A.

2.6. Aplicaciones de los ACV

En términos de las aplicaciones del ACV (Cooper y Fava, 2006), se puede usar industrialmente para una variedad de propósitos, incluido el apoyo de una estrategia corporativa, investigación y desarrollo y el diseño de productos o procesos. El ACV también se usa en educación, así como en etiquetas y descripciones de productos. La importancia de los estudios de ACV aumenta a medida que las empresas los aplican cada vez más a sus productos y requieren datos de ACV de sus proveedores (Jolliet, 2016).

Como se indica en la normativa (Ruiz, 2007), el ACV se puede aplicar para:

- ◇ La identificación de oportunidades de mejora de los aspectos ambientales de los productos en varios puntos de su ciclo de vida.
- ◇ La toma de decisiones en la industria, instituciones gubernamentales y organizaciones no gubernamentales. Decisiones relacionadas con la planificación estratégica, estableciendo de prioridades, diseño o rediseño de productos o procesos.
- ◇ La selección de indicadores de comportamiento medioambiental relevantes, incluyendo técnicas de medición.
- ◇ Marketing.

El ACV se usa mayoritariamente en la empresa privada, en el ámbito interno como herramienta de auditoría y ecodiseño, esto es, para la mejora de productos, el desarrollo de procesos; y en otras ocasiones, para uso externo: marketing, relaciones con la administración, grupos ambientales, etc. (Capuz y Gómez, 2004).

Cada vez más las empresas han aplicado y aprovechado otros usos del ACV; a continuación se mencionan en una lista de usos posibles (Capuz y Gómez, 2004):

- ◇ Elaboración de políticas medioambientales (normas, disposiciones legales, evaluaciones de impacto ambiental, auditorías ambientales, impuestos, educación ambiental).
- ◇ Elección de proveedores y de materia prima.
- ◇ Herramienta para legislación ambiental.
- ◇ Ecoetiquetas.
- ◇ Subvenciones e impuestos.
- ◇ Desarrollo de nuevos productos (Ecoproductos).
- ◇ Desarrollo de procesos (diseño o mejoras tecnológicas).
- ◇ Marketing.
- ◇ Gestión/ Minimización de residuos.
- ◇ Sistemas de gestión medioambiental.

2.7. Ventajas y desventajas del ACV

Dentro de las ventajas encontramos que permite disponer de información importante para modificar o mejorar los procesos y la selección de fuentes de energía o materias primas (Contreras, Cloquell y Owen, 2007).

El simple hecho de aplicar un ACV a los productos y servicios, proporciona ventajas competitivas y comparativas a las empresas y organizaciones, en el caso que requieran certificar sus productos bajo etiquetas ecológicas o sellos ambientales (*Scientific Applications International Corporation*, 2006).

Es un mecanismo de gestión ambiental que puede apoyar la toma de decisiones sobre algún producto o servicio. El ACV es una metodología que puede ser de ayuda para disminuir costos, en la medida que el nuevo diseño o proceso de producción, transporte y distribución, promuevan una mayor eficiencia en el empleo de materias primas, energía e insumos (Romero, 2003).

Dentro de las desventajas están que una parte considerable de información y base de datos se encuentran limitadas, algunas incluso son de calidad dudosa y su relevancia varía según la región (*Department of Environmental Affairs and Tourism*, 2004). Para poder realizar el Inventario de Ciclo de Vida, se puede escoger una base de datos existente, según el estudio que se está realizando (Ecoinvent, IVAM, ELCD, entre otras); sin embargo, puede variar con la región en la que se está llevando a cabo el análisis, por lo que no es exacta. Esta desventaja se puede reducir si se emplean bases de datos relacionadas con el área geográfica estudiada y que cuenten con referencias de su origen. En algunas ocasiones el uso de software requiere de dos o más bases de datos, que no necesariamente son de acceso libre. (Chargoy, García y Suppen, 2013). Existen limitaciones de información para una cantidad de categoría de impactos, por ejemplo, para las relacionadas con ecotoxicidad o toxicidad en humanos, erosión de suelos y cambios en la biodiversidad (*Department of Environmental Affairs and Tourism*, 2004).

Muchos análisis requieren de información que no está disponible, es muy costosa o simplemente no existe para la región en dónde se realiza el estudio. Algunos análisis solamente han llegado a la fase del inventario (Romero, 2003). De igual forma, muchas herramientas informáticas necesitan de licencia para poder utilizarse. Pocos son los softwares que estén disponibles de forma gratuita (Contreras, Cloquell y Owen, 2007).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La metodología del ACV es la mejor forma de analizar los productos y/o servicios desde el punto de vista ambiental, sin límites geográficos, funcionales o temporales, ya que examinan todos los procesos seguidos por la materia prima, desde su extracción, transformación y uso hasta el retorno a la naturaleza en forma de residuos. De este modo, se pueden evaluar y comparar tecnologías alternativas, considerando todas las etapas del ciclo de vida de estas tecnologías (Gazulla *et al.*, 2012).

Tal y como se refleja en la norma ISO 14040:2006, la metodología general del ACV consta de cuatro fases fundamentales, si bien es posible realizar estudios simplificados en los que se elimine alguna de ellas:

- ◇ **Definición del objetivo y el alcance:** Incluye los límites del sistema y el nivel de detalle; depende del tema y del uso previsto del estudio.
- ◇ **Análisis de inventario:** Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema a estudiar. Implica la recopilación de los datos relacionados con las entradas y salidas de materia, así como de energía necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido.
- ◇ **Evaluación de impacto ambiental:** Proporciona información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. De este modo, relaciona los resultados del inventario de ciclo de vida con efectos ambientales observables por medio de categorías de impactos (acidificación del terreno, reducción de la capa de ozono, toxicidad, agotamiento de los recursos, etc.).
- ◇ **Interpretación:** Es la fase final del procedimiento del ACV, en la cual se resumen y examinan los resultados de los estudios anteriores como base para conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

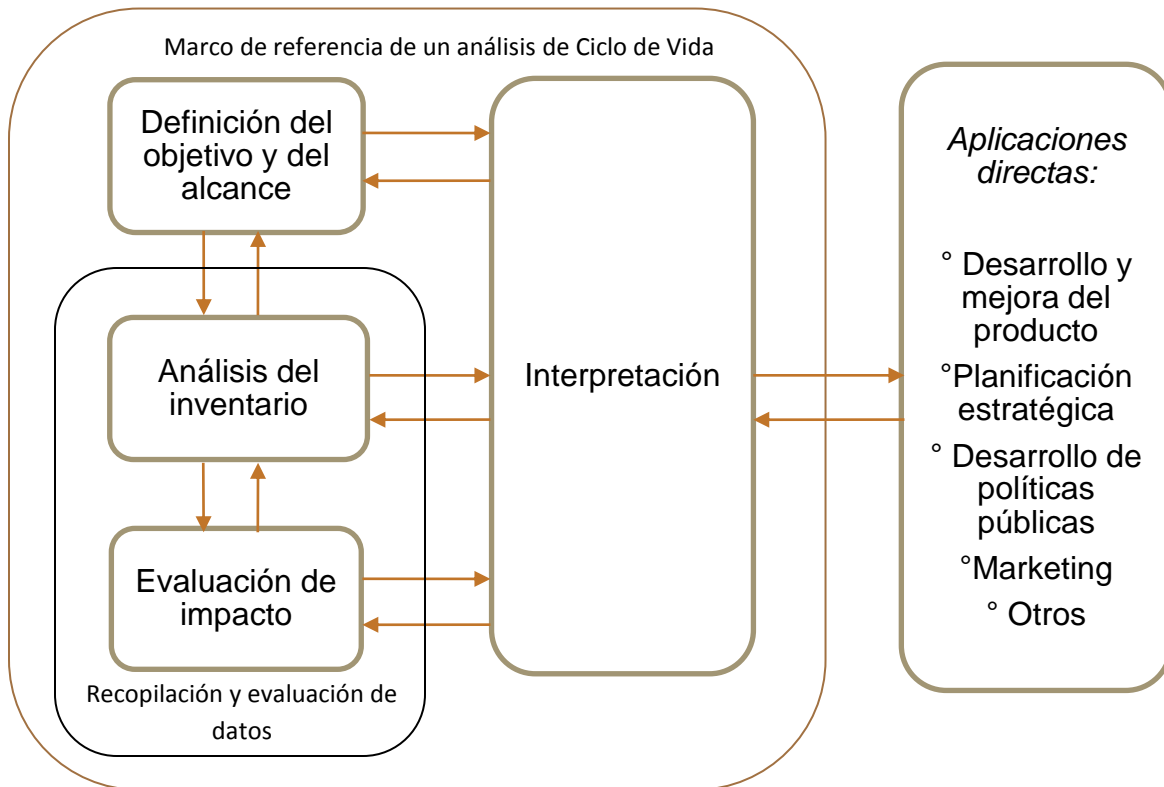


Figura 3.1 Fases principales de un estudio de ACV. Fuente: Modificado de ISO14044, 2006.

Como se puede observar en la figura 3.1, la metodología del ACV es de carácter dinámico, de manera que las cuatro fases de las que consta están interrelacionadas, por lo que se puede considerar un proceso iterativo a medida que se refinan los datos (Aranda *et al.*, 2010).

Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos, son la segunda y la tercera. Las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido (Romero, 2003).

Por otra parte, dentro de los estudios de ACV existen diferentes metodologías de evaluación de impacto (Ecoindicador 99, CML 1992, CML 2 baseline 2000, Ecopuntos 97, EPS 2000, entre otras) que incluyen varios de los indicadores medioambientales y la selección de unas u otras dependerá del objetivo del

estudio, público objetivo y nivel de exactitud de los resultados requeridos (Ihope, 2009).

3.1. Definición de objetivos y alcance

De acuerdo con la norma ISO 14044, el objetivo y el alcance de un estudio de ACV deben definirse claramente y ser consistentes con la aplicación que se persigue. En esta fase se concreta el motivo por el que se lleva a cabo y se describe el sistema objeto del estudio, así como la utilización prevista de los resultados (Gazulla *et al.*, 2012). Se abordarán asuntos tales como el alcance geográfico, la delimitación en el tiempo del estudio, así como el nivel de calidad que se precisa para los datos. Debido a la naturaleza iterativa del ACV, el alcance puede tener que ajustarse durante el estudio (Aranda *et al.*, 2010).

3.1.1. Definición de objetivos de estudio

Establece la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, las personas a quienes se comunicarán los resultados del estudio y si se prevé utilizarlos en aseveraciones comparativas que se divulgarán al público (Aranda *et al.*, 2010).

3.1.2. Alcance del estudio

El alcance deberá estar bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.

El alcance incluye los siguientes puntos (Hava, 2016):

- ◇ El sistema de producto a estudiar: es el conjunto de procesos unitarios o subsistemas necesarios que conectados material y energéticamente permiten la presencia del producto estudiado. Se suele representar por medio de un diagrama de procesos interconectados entre sí.
- ◇ Las funciones del sistema del producto o en caso de comparación, los sistemas: define las características de operación del sistema. Un sistema puede tener varias funciones posibles, si se pretende comparar dos sistemas diferentes, es preciso que desarrollen la misma función. Por ejemplo, no es posible comparar un estudio de ciclo de vida de un teléfono

móvil de última generación con un teléfono móvil convencional, ya que se trata de dos sistemas que cumplen funciones diferentes.

- ◇ La unidad funcional: es una unidad de referencia a partir de la cual sean matemáticamente normalizados todos los datos de entrada y salida. Por ejemplo, un palé de cajas de botellas de agua sería una unidad de tipo físico, mientras que distribuir agua potable a una población de 1000 habitantes serían una unidad de tipo funcional.
- ◇ Los límites del sistema: define los procesos unitarios que serán incluidos en el sistema estudiado.
- ◇ Los procedimientos de asignación: es seleccionar las categorías de impacto a evaluar y asignar los resultados del Inventario de ciclo de vida a las categorías seleccionadas.
- ◇ Las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto, y la subsecuente interpretación a utilizar: en este punto hay que decidir las categorías de impacto a evaluar y cuál de los métodos de evaluación de impacto existentes se va a aplicar en el estudio. Cada método difiere en las categorías de impacto consideradas y en el peso asignado a cada una de ellas. La mayor parte considera la contribución al efecto invernadero, la acidificación de los suelos, la emisión de sustancias tóxicas, la disminución de la capa de ozono, etc. si bien su importancia relativa cambia de un método a otro.
- ◇ Requisitos relativos a los datos: en términos generales especifican las características de los datos necesarios para el estudio.
- ◇ Las suposiciones y las limitaciones.
- ◇ Los requisitos iniciales de la calidad de los datos.
- ◇ El tipo de revisión crítica: permite asegurar que los métodos utilizados para realizar el ACV son coherentes con la norma internacional y son válidos científicamente y técnicamente. La puede realizar un experto interno o externo o según las partes interesadas.
- ◇ El tipo y formato del informe requerido para el estudio.

3.2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)

El análisis de inventario comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes de cada uno de los procesos unitarios que conformen el sistema analizado. Esas entradas y salidas normalmente incluirán el uso de recursos (materias primas, agua, energía, etc.), y las emisiones al aire, agua y suelo que se produzcan asociadas con el sistema. Para realizar el inventario hay que definir el ciclo de vida del producto, esto es, producción, transporte de materias primas, producción del producto, su distribución, transporte, uso y retiro (Capuz *et al.*, 2004).

Dichos datos se pueden recopilar de los sitios de producción asociados con los procesos unitarios dentro del límite del sistema, o se pueden obtener o calcular a partir de otras fuentes. En la práctica, todos los datos pueden incluir una mezcla de datos medidos, calculados o estimados (ISO 14044, 2006).

Se trata de realizar un balance de los flujos energéticos y de materiales que entran y salen del sistema a lo largo de toda su vida útil (Aranda *et al.*, 2010).

En esta etapa se realizan cálculos a partir de la información recopilada y generalmente el resultado del análisis se muestra en un diagrama de flujo. Así, en cada proceso, se estiman emisiones a la atmósfera, cuerpos de agua, al suelo, así como la energía requerida y los flujos de materiales (*Department of Environmental Affairs and Tourism*, 2004 y Gallego, 2008).

A la hora de realizar el inventario es importante definir y considerar cuáles son los límites del sistema, es decir, qué componentes, materiales, obtención de energía entre otros. se estudian y cuáles no, qué procesos productivos se incluyen y cuáles no, etc (Capuz *et al.*, 2004).

En todos los flujos materiales y energéticos entrantes y salientes identificados debe indicarse su origen o destino, las entradas y salidas indican lo siguiente (Aranda *et al.*, 2010):

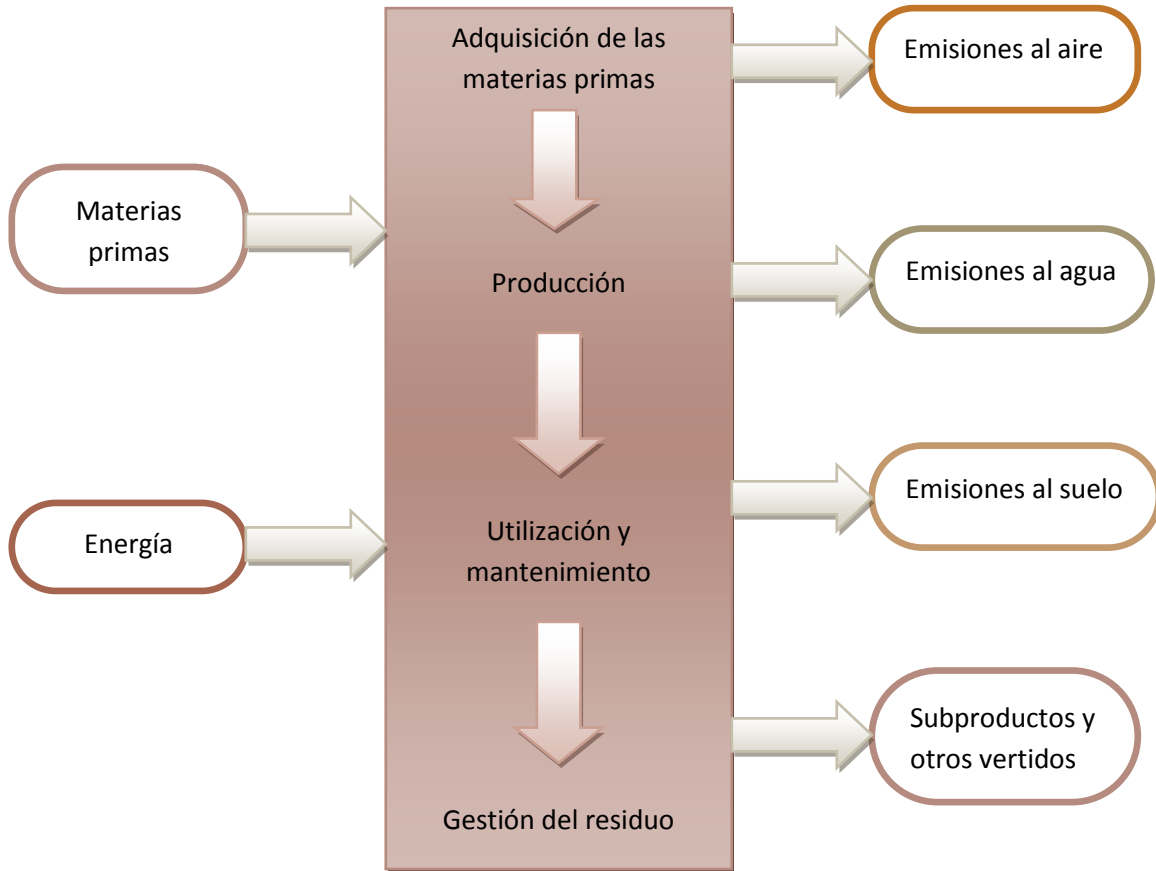


Figura 3.2 Inventario del ciclo de vida aplicado a un proceso unitario del sistema. Fuente: Aranda et al., 2010.

Las entradas cuantificadas para cada subsistema incluirán el uso de energía y las materias primas desde la naturaleza: materias primas (agua, arena, etc.) y combustibles crudos (carbón, gas natural, etc.); y desde la tecnosfera: materiales (vidrio, cartón, etc.) y electricidad.

Por su parte, las salidas cuantificadas para cada subsistema incluirán las emisiones al aire, agua y suelo, subproductos y otros vertidos. Como se muestra en la figura 3.2. para un proceso unitario.

La recopilación de datos puede ser un proceso intensivo en materia de recursos; por lo tanto, las limitaciones en la recopilación de datos deben tenerse en cuenta en el alcance y documentarse en el estudio (Aranda et al., 2010).

Además, en el caso de que se disponga de datos mezclados correspondientes a varios productos, se deben definir los procedimientos de asignación y los

procedimientos de cálculo para separar y asignar cada dato a cada producto. Finalmente, es importante tener en cuenta que el análisis de inventario es un proceso iterativo en continua revisión (Capuz *et al.*, 2004).

3.3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

Va dirigida a evaluar la importancia de los impactos potenciales ambientales utilizando los resultados del Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (Romero, 2003). En la EICV se seleccionan un conjunto de variables ambientales, denominadas categorías de impacto (efecto invernadero, acidificación del terreno, etc.) y se utilizan indicadores de categoría para agrupar y explicar los resultados del ICV. Estos indicadores de categoría (kg de CO₂, kg SO₂, etc.) reflejan las emisiones agregadas o los recursos utilizados para cada categoría de impacto (Capuz *et al.*, 2004).

Por lo tanto, las categorías de impacto se pueden definir como los impactos sobre el medio ambiente causados por los flujos energéticos y materiales del ICV (Ihope, 2009).

Los potenciales impactos ambientales más habituales son (Capuz *et al.*, 2004):

- ◇ **El efecto invernadero**, efecto que puede provocar serios cambios climáticos.
- ◇ **La destrucción de la capa de ozono**, causado por la emisión de gases que favorecen la desaparición del ozono que se encuentra en la estratósfera.
- ◇ **El smog fotoquímico**, que en ocasiones produce ozono, al nivel de la tropósfera, causando problemas respiratorios.
- ◇ **La acidificación**, que puede afectar a la fauna en ríos y lagos.
- ◇ **La eutrofización**, que perjudica a los cultivos, y en ríos y lagos produce el crecimiento descontrolado de las algas.
- ◇ **Los metales pesados**, son compuestos nada deseados por su capacidad de acumulación en la cadena alimenticia, y por sus propiedades.

La siguiente tabla 3.1 muestra las principales categorías de impacto establecidas por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, por sus siglas en inglés).

Tabla 3.1 Principales categorías de impacto. Fuente: Aranda et al., 2010.

Categorías de impacto relativas a las entradas del ICV		
Categoría	Indicador	Carácter
Uso de recursos abióticos	Varios	Global
Uso de recursos bióticos		Global
Uso del suelo		Global
Categorías de impacto relativas a las salidas del ICV		
Categoría	Indicador	Carácter
Calentamiento global	kg CO ₂	Global
Disminución capa ozono	kg CFC 11	Global
Toxicidad humana	Varios	Varios
Acidificación	kg SO ₂	Continental, regional o local
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻³	Continental, regional o local
Ruido	Varios	Local

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 para evaluar y las metodologías a utilizar dependen del objetivo y alcance de estudio (Niembro y González, 2008).

Dentro de la fase de evaluación se pueden identificar tres etapas: clasificación, caracterización y valoración (Aranda et al., 2010).

La **clasificación** consiste en asignar los datos del inventario a cada una de las categorías de impactos que se vayan a considerar. Se ha de indicar el área afectada por el impacto ambiental. Básicamente se seleccionan las categorías de impacto a evaluar y asignar los resultados del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) a las categorías seleccionadas.

La **caracterización** debe cuantificar los impactos ambientales. Para ello se suelen referir a un modelo, de esta forma los valores pueden compararse entre sí más adelante.

La **valorización** intenta agregar los resultados medioambientales para cada producto objeto del estudio, de forma que se obtiene un juicio o valoración sobre la calidad medioambiental global del producto. Para ello se suma de forma ponderada los valores obtenidos en la etapa anterior para cada categoría de impacto ambiental. Este valor global ayudará a comparar la calidad medioambiental de diferentes alternativas de sistemas del producto.

Es en definitiva la fase del ACV que caracteriza el resultado final del mismo y una de las que mayor causa controversia, ya que no existe acuerdo común en la comunidad internacional para el establecimiento de un modelo único de evaluación de impactos ambientales (Ihope, 2009).

3.4. Interpretación de resultados

Los objetivos de la interpretación son analizar los resultados, establecer las conclusiones, explicar las limitaciones y emitir recomendaciones basadas en los resultados de las fases anteriores acerca de los resultados de forma transparente.

Dentro de esta fase se incluyen 3 elementos fundamentales, descritos en la ISO 14044:2006:

- ◇ **Identificación de las variables significativas:** Basadas en los resultados de las fases del ICV y la EICV del Análisis del Ciclo de vida. Consiste en determinar qué procesos conllevan un mayor impacto y cuales se podrían obviar.
- ◇ **Verificación de los resultados:** Se consideran las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia.
- ◇ **Conclusiones y recomendaciones:** El establecimiento de conclusiones debe hacerse de forma interactiva, considerando todas las fases del ACV. Las recomendaciones deberán basarse en las conclusiones finales del

estudio y deben reflejar un resultado lógico y razonable de las consecuencias de las conclusiones.

En esta última fase, se identifican las diferentes cargas ambientales e impactos, los puntos críticos; medidas de mejora, así como el análisis de sensibilidad de los datos, para conocer la fiabilidad del estudio, la variabilidad e incertidumbres que se pueden presentar y sus efectos (Gallego, 2008).

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL ACV AL AZÚCAR ESTÁNDAR DE UN INGENIO AZUCARERO EN MÉXICO.

En el presente capítulo se aplica la metodología del ACV al proceso de producción y comercialización de azúcar estándar de un ingenio azucarero en México, la selección del caso de estudio se detalla posteriormente en el apartado 4.4. La metodología del ACV se describió en el capítulo 3.

4.1. Metodología

4.1.1. *Objetivos del estudio*

Objetivo general

Identificar los procesos que conllevan a un mayor impacto y proponer mejoras para disminuir la carga ambiental global asociada al proceso de producción y comercialización de azúcar estándar de un ingenio azucarero en México, todo esto por medio del Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo con la metodología general y la evaluación de impactos ambientales (Ecoindicador 99), para cuantificar el impacto ambiental asociado al producto.

Objetivos particulares

- ◇ Recopilar la información necesaria del proceso de fabricación de azúcar estándar para realizar el Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, mediante información precisa de bibliografía o balances de materia y energía.
- ◇ Realizar los balances de materia y energía en las diferentes etapas de producción del azúcar estándar.
- ◇ Seleccionar categorías de impacto y evaluar los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.
- ◇ Analizar los resultados obtenidos de los impactos ambientales.

- ◇ Identificar los procesos que conllevan a un mayor impacto ambiental de la producción de azúcar estándar en México, proponer las mejoras para obtener menores impactos y establecer las conclusiones.

4.1.2. Alcance del estudio

En este estudio se considera a dos subsistemas a saber: ingenio azucarero y producto final, se toma en cuenta desde que la caña de azúcar llega al ingenio azucarero e insumos principales para fabricar el producto analizado, así como el uso del producto, que es la comercialización y los residuos de los empaques por su consumo. El producto analizado es el azúcar estándar.

La etapa agrícola que comprende el cultivo, fertilización, cosecha y transporte de la caña al ingenio no se tomó en cuenta, debido a que no es posible generar los datos de inventario al nivel de detalle deseado para realizar las conclusiones. Por lo que el estudio se limita a analizar los subsistemas anteriormente mencionados, esperando hallar los impactos más significativos en estos.

En el subsistema de *Ingenio azucarero*, se consideran los procesos asociados a la obtención del azúcar como producto, y del bagazo, cachaza y melaza como subproductos. La cachaza se aplica directamente al suelo del campo y el bagazo se reutiliza en el mismo ingenio para la obtención de energía no constituyendo una salida neta.

En el subsistema de *producto final*, se consideran la producción del envase (costales de polipropileno), la comercialización del azúcar y los residuos del consumo. Se considera que toda la producción es envasada en presentaciones de 50 kg y en costales de polipropileno, la cual es distribuida a consumidores mayoristas. Las exportaciones de azúcar estándar no se toman en cuenta, ya que las reportadas dentro de instituciones como lo son CONADESUCA y CNIAA son datos globales y no puntuales del caso específico de estudio.

Los límites del sistema se representan esquemáticamente en el apartado 4.2 y determina los procesos unitarios que se incluyen dentro del estudio de ACV, y qué cargas ambientales se estudian y qué nivel de detalle.

En cuanto al alcance geográfico, el ACV se limita a la producción de azúcar estándar, de un ingenio que está ubicado en la región centro de México, lo cual no significa que todas las etapas se limiten a este ámbito geográfico, como la etapa de comercialización.

Para hallar los flujos en las operaciones que se realizan para la elaboración del producto, se ha procurado usar datos reales, que han estado disponibles, para otros procesos se han realizado diferentes cálculos para obtenerlos.

Se seleccionaron aquellos procesos cuya contribución a los flujos de masa y energía son importantes y cuyas emisiones produzcan efectos relevantes en el medio. El horizonte temporal que se toma como referencia es el año 2016, y cuando otras fuentes disponibles contaban con datos más recientes se consideraron los años 2017 y 2018.

4.1.3. Unidad funcional

La unidad funcional que será utilizada es 1 kg de azúcar estándar, ya que es común cuantificarla así en cuanto a su venta, al igual que esta nos permite comparar el producto respecto a las entradas y salidas del Análisis de inventario de ciclo de Vida (ICV) de una manera clara y objetiva.

4.1.4. Procedimientos de asignación

El procedimiento de asignación se realizó con base en la masa entrante a todos los procesos, así como en las entradas significativas de energía correspondientes a los sistemas productivos, sistemas de transporte y combustibles.

4.2. Descripción de los límites del sistema

Se adjunta un diagrama en la figura 4.1 para la descripción del sistema. Se determinan los límites del sistema indicando los procesos unitarios que se incluyen dentro del estudio.

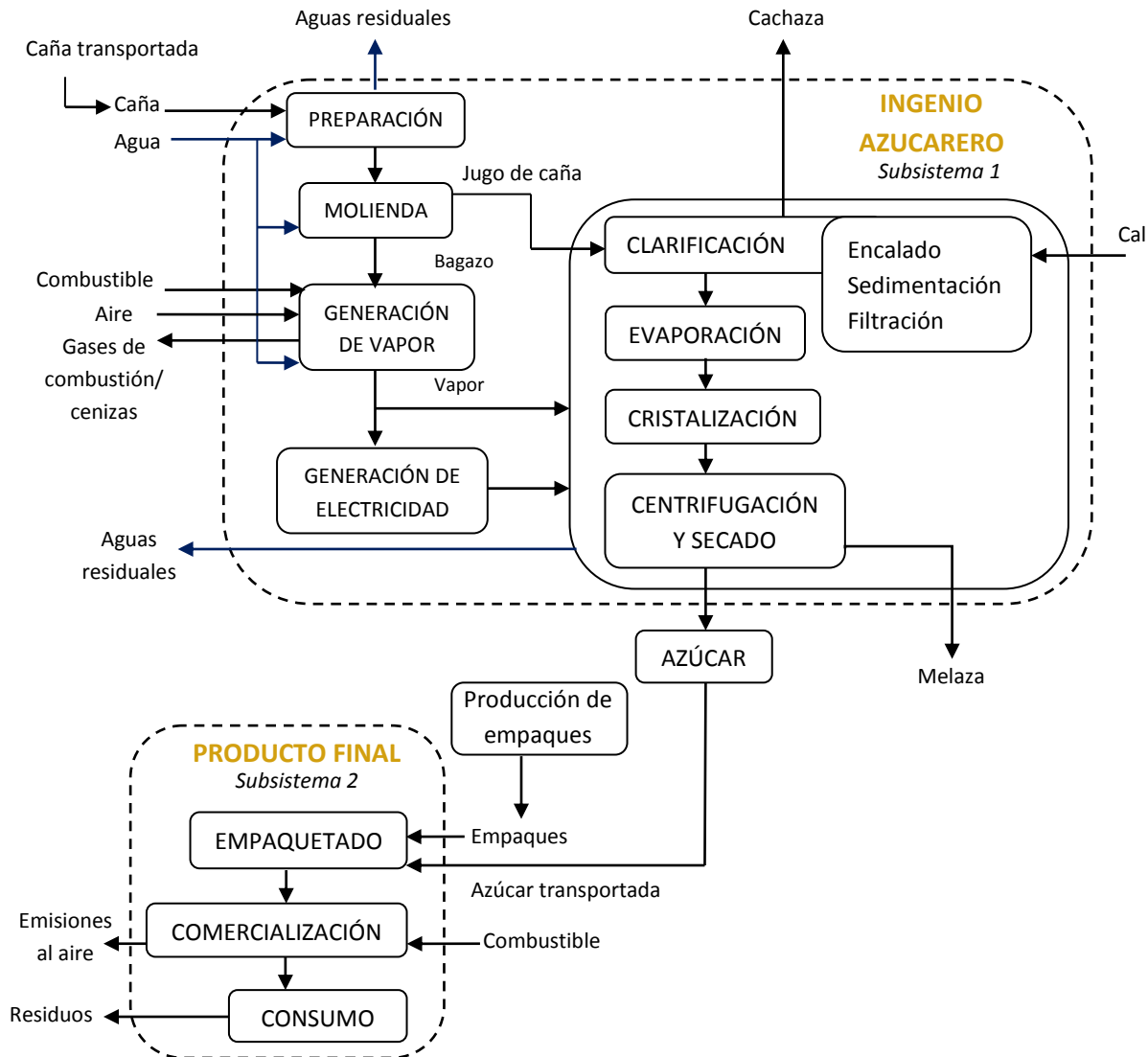


Figura 4.1 Límites del sistema de estudio. Fuente: Adaptado de Ferreri et al., 2010.

4.3. Descripción del proceso

Existen diferentes procesos de producción del azúcar, estos se diferencian entre sí según el tipo de azúcar que se desee obtener, como ya se mencionó en el capítulo

1, se distinguen cuatro tipos de azúcar producidos en México: el crudo o mascabado, estándar, refinada y blanco especial. La diferencia entre estos se caracteriza por la pureza o contenido de sacarosa y el color. La mayor parte de los ingenios azucareros producen azúcar estándar, por lo que el proceso a analizar para llevar a cabo las fases del ACV será el de este tipo de azúcar. El proceso consta de las siguientes etapas para convertir el jugo de caña en cristales y depurarlos de manera natural de impurezas que pudieran resultar dañinas para el organismo:

- ◇ Recibo de la caña
- ◇ Extracción del jugo (molienda)
- ◇ Clarificación
- ◇ Evaporación
- ◇ Cristalización y centrifugación
- ◇ Secado, enfriado y envase

A pesar de que las actividades en los ingenios son similares, pueden variar debido a las modificaciones tecnológicas y operativas presentes en cada etapa. No es objetivo del estudio hacer énfasis a estas modificaciones, sino describir el procesos de manera convencional e identificar los impactos ambientales potenciales más relevantes generados en este proceso.

A continuación se describe cada etapa del proceso, la figura 4.2 se representa el diagrama de producción típico de un ingenio azucarero.

4.3.1. Recibo de la caña

Para el transporte de la caña al ingenio se comienza con la recolección de la caña, esta se quema con la finalidad de facilitar y agilizar el corte manual, eliminar la maleza o ahuyentar animales. El corte manual de caña quemada se realiza al ras del suelo, se limpian las hojas y puntas de la caña verde. La cañas se recolectan por medio de alzadoras en camiones (Domínguez, Bravo y Sosa, 2013).

La necesidad de eliminar hojas y puntas se debe a que las hojas tienen un alto contenido de sílice, que contribuye al desgaste de los rodillos de los molinos, y a que las puntas absorben sacarosa durante la molienda, reduciendo el rendimiento en fábrica (Chen, 1991).

El abastecimiento de caña se realiza con una frecuencia diaria conforme el plan de producción programado y se acarrea al ingenio en camiones que esperan su turno en el área de preparación de caña del ingenio, de esta manera la caña se muele guardando una frescura rigurosa no mayor de 24 horas desde el momento en que se corta. La frescura de la caña es uno de los aspectos más cuidados en la operación unitaria de molienda, ya que al ser cortada se torna más susceptible a la proliferación de microorganismos (*Leuconostoc mesenteroides*) que promueven la inversión de la sacarosa (separación de molécula de sacarosa en glucosa y fructuosa). La caña cosechada debe ser lavada puede requerir 3-10 m³ de agua por tonelada (Cheesman, 2004). La caña se descarga en las mesas alimentadoras y se conduce hacia cuchillas rotatorias que se encargan de cortar los tallos en pedazos pequeños y desfibradoras que desmenuzan la caña. El conductor de banda, recibe la caña picada y la transportada hacia el primer molino (Domínguez *et al.*, 2013).

4.3.2. Extracción del jugo (molienda)

La primera etapa del procesamiento de la caña para la producción del azúcar es la extracción del jugo, el cual es rico en sacarosa mediante una serie de molinos (tándem de molinos). Cada molino consta de unidades múltiples que utilizan combinaciones de rodillos, a través de los cuales pasan sucesivamente la caña (Chen, 1991).

Para ayudar a la extracción del jugo (guarapo) se aplica un lavado en la serie de molinos, este lavado se hace con el jugo extraído en el molino siguiente y el lavado en el último molino se hace con agua caliente de 70°C a 80 °C que facilita la desinfección y extracción de la sacarosa en el bagazo (Robledo, 2006). Este proceso conocido en los ingenios azucareros como imbibición, saturación o maceración, puede presentar muchas modificaciones. En las prácticas de

molienda más eficientes, más del 95% del azúcar contenido en la caña pasa al guarapo, este porcentaje se conoce como Pol de la extracción (Chen, 1991).

Del tándem de molinos se obtienen dos productos: el bagazo y el jugo. El bagazo final que sale del último molino contiene el azúcar no extraído, fibra leñosa y de un 45% a un 55% de humedad. Generalmente este material es utilizado como combustible en las calderas para generar vapor o como materia prima en la elaboración de papel u otros productos (Cortés y Hernández, 2007). El jugo obtenido pasa a las siguientes etapas.

4.3.3. Clarificación

El jugo procedente de la molienda es ácido y turbio de color verde oscuro, el proceso de clarificación o purificación busca remover las impurezas solubles e insolubles del mismo, empleando en forma universal cal y calor. Se utiliza alrededor de medio kilogramo de cal por tonelada de caña para neutralizar la acidez del guarapo, formando sales insolubles de calcio en su mayor parte fosfato de calcio. Se calienta el jugo hasta la ebullición o ligeramente arriba para coagular las grasas, ceras y gomas, que se precipitarán atrapando los sólidos en suspensión y las partículas más finas (Chen, 1991).

Los lodos se separan del jugo clarificado por sedimentación y se filtran en tambores rotativos, el jugo obtenido del filtro se regresa al proceso de clarificación o se va directamente al jugo clarificado y la torta de la prensa, o cachaza, se desecha o se utiliza como fertilizante en los campos. El jugo clarificado ahora es transparente y de un color parduzco y pasa a los evaporadores sin tratamiento adicional (Salgado *et al.*, 2013).

4.3.4. Evaporación

El jugo clarificado, que tiene más o menos la misma composición que el jugo crudo extraído, excepto las impurezas precipitadas por el tratamiento con cal, contiene aproximadamente el 85% de agua, dos terceras partes de esta agua se evaporan mediante evaporadores de múltiple efecto (Salgado *et al.*, 2013).

En la evaporación, por medio de intercambio de calor con vapor de baja presión (20 psi) y trabajando a temperaturas de ebullición de 130°C a 90°C, el jugo se concentra en un jarabe llamado meladura, es común el uso de cinco cuerpos de evaporación dispuestos en serie en los cuales el jugo fluye por diferencia de presión en los cuerpos. El vapor se introduce en el primer cuerpo y se calienta hasta el punto de ebullición y la presión en los efectos sucesivos va decreciendo. Al comenzar a ebullición se generan vapores los cuales sirven para calentar el jugo en el siguiente efecto, es por esto que se llama de múltiple efecto. Con esto se logra el menor punto de ebullición en cada evaporador y a un menor costo (Robledo, 2006).

El vapor producido se condensa y las aguas condensadas son evacuadas a medida que se producen. El jarabe o meladura sale en forma continua del último cuerpo con aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua (Chen, 1991).

4.3.5. *Cristalización y centrifugación*

Los equipos utilizados para la solidificación son conocidos como tachos, que son evaporadores al vacío de simple efecto, donde el jarabe se concentra hasta saturarse de azúcar (Domínguez *et al.*, 2013).

La etapa de cristalización puede realizarse por medio de la espera de la cristalización espontánea a partir de una concentración del melado de 80 °Brix, o por la inclusión de granos de azúcar en la masa cocida (semillado), esta operación se realiza a través de una válvula de semillado, que posee un diámetro reducido para evitar la aspiración de aire y polvo hacia el interior del tacho (Golato, 2014).

A medida que se evapora el agua, se agrega más meladura hasta que la mezcla de cristales y miel queda concentrada formando una masa densa, conocida como masa cocida o templa. Una vez saturado el tacho, se descarga el contenido a un tanque mezclador o cristalizador, cuyo propósito es disminuir la temperatura de la masa cocida. El trabajo de cristalización se lleva a cabo empleando el sistema de tres cocimientos A, B y C, respectivamente, para lograr la mayor concentración de sacarosa (Domínguez *et al.*, 2013).

La última miel que se obtiene de la operación de cocimiento, se denomina melaza y posee una baja pureza, que económicamente resulta inviable recuperar el azúcar contenido (Golato, 2014). Como parámetro aceptable se considera que la pureza de la miel final no debe ser mayor a 35% de sacarosa en su contenido (Robledo, 2006). Sirve como base en la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, la producción de levaduras, etanol y otros (Salgado, 2013).

Las masas cocidas resultantes de la cristalización se centrifugan para conseguir la separación de las masas en cristales y miel o solución residual agotada. Ésta contendrá aún entre 12% al 18% del azúcar del jarabe. La separación se da a partir de la fuerza centrífuga que se genera en la máquina por el giro de la canasta a gran velocidad (Robledo, 2006).

4.3.6. *Secado, enfriado y envasado*

Un secador típico en un ingenio azucarero está compuesto por uno o más tambores rotativos en paralelo, recibe vapor o aire caliente junto con los cristales de azúcar, removiendo la humedad. Después de pasar por el secador el producto se envía a los enfriadores, que son básicamente los mismos tambores que los secadores, pero sin los elementos de calentamiento. El azúcar se transporta a silos o directamente a su envase, ya sea a granel o en paquetes (Domínguez et al., 2013). El producto sale con un 0.1% de humedad (Robledo, 2006).

4.4. Análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) del caso de estudio

La segunda fase del análisis de ciclo de vida es el análisis de inventario por lo que se procederá a la selección del caso de estudio (ingenio azucarero), posteriormente la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema analizado, y cuando estas no estén disponibles hallarlos en la bibliografía disponible.

En la recopilación del inventario se emplearon datos nacionales de acceso público proporcionadas por el CONADESUCA, CNIAA, SAGARPA, PEMEX, SEMARNAT,

CONUEE entre otras, para el caso del ingenio azucarero y algunos flujos en la comercialización. Estos nos permitieron conocer la información primaria

En el caso de la información para el inventario de la producción del envase y algunos otros flujos de la comercialización se obtuvieron a través de consultas a las bases de datos internacionales ELCD 3.2 (base de datos de referencia del ACV en Europa). Las cuales sirvieron como material de apoyo para completar la EICV.

4.4.1. Ingenio azucarero

La productividad de un ingenio azucarero depende de la cantidad y calidad de caña industrializada, el rendimiento en fábrica y la capacidad instalada. De acuerdo a la tabla 4.1 el porcentaje de rendimiento de fábrica promedio (toneladas de azúcar/ toneladas de caña) en el ingenio estudiado fue de 12.76 % durante el periodo 2013-2018.

Cuenta con una capacidad instalada de 1300 t/d (SUCROMER, 2009). De los 51 ingenios azucareros que existen en el país, el caso de estudio, es el séptimo ingenio con mayor volumen de caña molida, y el primero ubicado en la región centro, además aportó el 3.46% de la producción de azúcar total (CONADESUCA-SAGARPA, 2018a).

Tabla 4.1 Indicadores de rendimiento del caso de estudio de las zafras 2013-14 a 2017-18
Fuente: Elaboración propia con datos de SAGARPA y CONADESUCA.

Indicadores de rendimiento del caso de estudio				
Zafra	Caña molida bruta (t)	Número de días de zafra	Rendimiento de fábrica (%)	Azúcar estándar producida (t)
2013- 2014	1,864,958	196	12.90	240,736
2014-2015	1,720,750	178	12.75	219,434
2015-2016	1,810,879	191	12.64	228,797
2016-2017	1,657,919	190	12.94	214,530
2017-2018	1,583,196	186	12.56	198,777
Promedio	1,727,540	188	12.76	220,455

Por lo anterior se considera el ingenio caso de estudio como uno de los más competitivos del país, ya que su rendimiento en el último año fue de 12.56%, arriba de la media nacional del 11.27% (CONADESUCA-SAGARPA, 2018b).

4.4.2. *Balances de masa*

La metodología utilizada para obtener los flujos de materiales hacia y desde el sistema caso de estudio necesarios en el análisis de inventario, fue llevar a cabo los balances de masa y posteriormente calcular los requerimientos energéticos. Se tomaron los datos proporcionados por distintas bibliografías y cuando los datos debían ser precisos como los de consumo y generación de energía, parámetros de eficiencia, pérdidas del proceso, entre otros. se tomaron las cantidades de los informes de las diferentes entidades públicas como se mencionó antes (CONADESUCA, SAGARPA, INEGI, CNIAA, CONUEE, etc.).

Debido a que el azúcar es un producto sólido que se obtiene a partir de la cristalización de la sacarosa y el resto son componentes como fibra, otros azúcares disueltos, inertes, gomas, entre otros., los valores de las composiciones se describen en sacarosa, no sacarosa y agua. Algunos están determinados para que el proceso productivo tenga un rendimiento elevado de 12.64% según nuestro caso de estudio (valor puntual del año 2016). Composiciones bajas de sacarosa en el producto y pérdidas altas de esta en los residuos supone rendimientos más bajos.

A continuación, se describe el balance de masa de las operaciones unitarias de la producción de azúcar estándar mencionadas en el apartado 4.3 las cuales son: extracción del jugo, clarificación, evaporación, cristalización, centrifugado y secado.

Dónde:

- ◇ A, B, C, E, F, G, J, etc. son los flujos máxicos de las entradas y salidas de las diferentes operaciones unitarias en unidades de t/h (toneladas por hora).
- ◇ "s" composición de sacarosa en las corrientes, en porcentaje masa.
- ◇ "ns" composición de aquellos componentes que no son sacarosa, por ejemplo, fibra, otros azúcares disueltos, inertes, sólidos insolubles y gomas en las corrientes, en porcentaje masa.
- ◇ "a" composición de agua en las corrientes, en porcentaje masa.

Extracción del jugo (Molienda)

El caso de estudio seleccionado trabajó con un flujo másico de 439 t/h de caña de azúcar, esta caña ingresó a los molinos para la extracción del jugo con un contenido de sacarosa del 14.92% y 12.89% de componentes no-sacarosa. De esta operación se obtiene bagazo con humedad de 50.88 % y polarización (sacarosa) de 3.28% (CONADESUCA-SAGARPA, 2016a). Ver anexo B para más detalles.

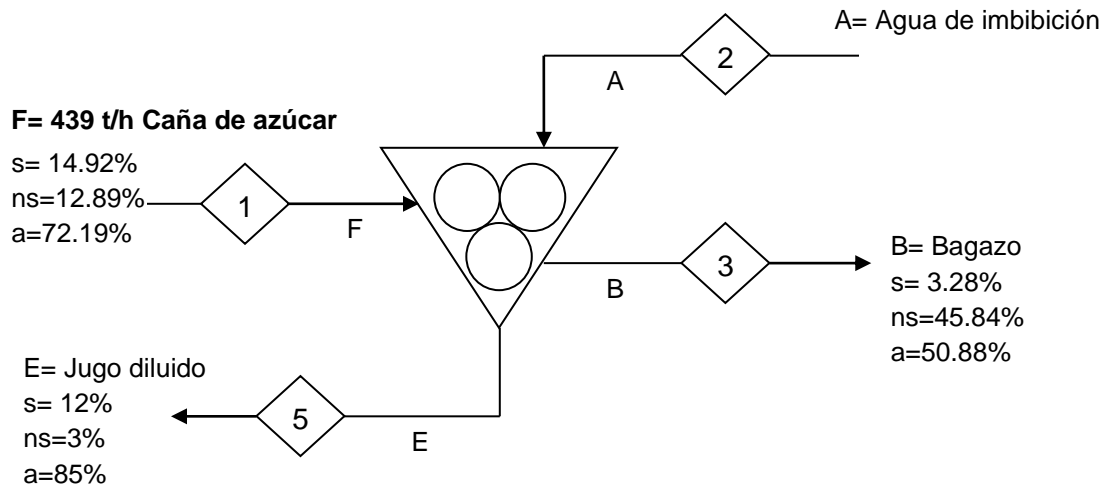


Figura 4.3 Diagrama de extracción de jugo de caña de azúcar. Fuente: Elaboración propia.

El jugo que sale de la extracción es turbio y de color verde oscuro, tiene un pH de 6.2 y en promedio un peso seco de 15%, del cual, alrededor del 12% al 13% es sacarosa (Robledo, 2006). En la figura 4.3 observamos la operación de extracción.

Las ecuaciones que describen el sistema son las siguientes: balance global ec. (1), balance de sacarosa ec. (2), no-sacarosa ec. (3) y agua ec. (4).

$$F + A = E + B \dots\dots\dots (1)$$

$$F(X_s)_F = E(X_s)_E + B(X_s)_B \dots\dots\dots (2)$$

$$F(X_{ns})_F = E(X_{ns})_E + B(X_{ns})_B \dots\dots\dots (3)$$

$$F(X_a)_F + A(X_a)_A = E(X_a)_E + B(X_a)_B \dots\dots\dots (4)$$

Las ecuaciones que describen la operación de encalado son: balance global ec. (5), balance de sacarosa ec. (6), no-sacarosa ec. (7) y agua (8).

$$E + J = G \dots\dots\dots (5)$$

$$E(X_s)_E = G(X_s)_G \dots\dots\dots (6)$$

$$E(X_{ns})_E + J(X_{ns})_J = G(X_{ns})_G \dots\dots\dots (7)$$

$$E(X_a)_E + J(X_a)_J = G(X_a)_G \dots\dots\dots (8)$$

El consumo de Oxido de calcio (CaO) es alrededor de 3 toneladas por cada 100 toneladas de caña (Robledo, 2006) y el agua requerida es aproximadamente 4.6 veces el peso del CaO (León, 2013). La caña alimentada es de 439 t/h y la cantidad de CaO por cada tonelada de caña es de 0.03 t, así que la cantidad total que se requiere es de 13.17 t/h para el proceso, por lo tanto, el agua a utilizar para la lechada de cal es de 60.58 t/h. Con los cálculos anteriores J es igual a 73.75 t/h, con esta se haya G correspondiente al jugo encalado al despejar la ec. (5).

De la ec. (6) despejamos $(X_s)_G$ y obtenemos la composición de sacarosa de la corriente G, la cual es de 10.51%, la composición de no-sacarosa se obtiene de la ec. (7) al despejar $(X_{ns})_G$, la cual es de 4.84% y la composición de agua resulta de $(X_a)_G$ es de 84.64% usando la ec. (8).

Las ecuaciones para la operación de clarificación son: balance global (9), balance de sacarosa (10), no-sacarosa (11) y agua (12).

$$G = P + C \dots\dots\dots (9)$$

$$G(X_s)_G = P(X_s)_P + C(X_s)_C \dots\dots\dots (10)$$

$$G(X_{ns})_G = P(X_{ns})_P + C(X_{ns})_C \dots\dots\dots (11)$$

$$G(X_a)_G = P(X_a)_P + C(X_a)_C \dots\dots\dots (12)$$

La cantidad de espumas P depende de la cal empleada, así como de la cantidad de materias no azucaradas, precipitadas y arrastradas. Las 3 toneladas CaO por

cada 100 t de caña, producen una cantidad de espumas 4 veces mayor (Robledo, 2006). Con esta información se calcula la corriente P de la siguiente manera:

$$P = 439 \text{ t caña} \left(\frac{3 \text{ t CaO}}{100 \text{ t Caña}} \right) \left(\frac{4 \text{ t Espumas}}{1 \text{ t CaO}} \right)$$

Con lo que se obtiene el valor de P que es igual a 52.68 t de espumas. De la ec. (9) se despeja C y se obtiene como resultado 542.49 t/h. Las composiciones de sacarosa, no-sacarosa y agua de la corriente P se determinan de las ecs. (10), (11) y (12), debido a que ya se conocen todos los datos y se obtienen $(X_s)_P = 9.62\%$, $(X_{ns})_P = 31\%$ y $(X_a)_P = 59.38\%$ respectivamente.

Las ecuaciones para la operación de filtración son: balance global ec. (13), balance de sacarosa ec. (14), no-sacarosa ec. (15) y agua (16).

$$P = JP + L \dots\dots\dots (13)$$

$$P(X_s)_P = JP(X_s)_{JP} + L(X_s)_L \dots\dots\dots (14)$$

$$P(X_{ns})_P = JP(X_{ns})_{JP} + L(X_{ns})_L \dots\dots\dots (15)$$

$$P(X_a)_P = JP(X_a)_{JP} + L(X_a)_L \dots\dots\dots (16)$$

Se proponen $(X_s)_L$ y $(X_{ns})_L$ de 6.1% y 38% considerando que en la cachaza hay perdidas de sacarosa entre 1.34% a 3.75% (CONADESUCA-SAGARPA, 2016a) del total de sacarosa con la que cuenta la caña al entrar a proceso de molienda, y se supone que más del 90% de los sólidos presentes en las espumas quedan retenidos en la filtración. El resto, entre el 5% y 10% pasa al jugo filtrado, y en las operaciones restantes deben eliminarse al mínimo.

De la ec. (15) se obtiene el valor de L, pero como no se conoce el valor de JP lo despejamos de la ec. (13) y se obtiene $JP = P - L$ y el resultado de sustituye en (15) después agrupamos términos comunes. En esta sección es posible suponer $(X_{ns})_{JP}$ del 2% muy similares a las características del jugo claro. Finalmente despejamos L, que al resolver se obtiene un valor de 42.45 t/h.

Las composiciones de sacarosa y agua en la corriente JP se obtienen de las ecs. (14) y (16) respectivamente, $(X_s)_{JP}$ es igual 24.22% y $(X_a)_{JP}$ es de 73.76%.

Por último, para obtener el flujo másico en t/h de N, el jugo clarificado que se obtendrá se suman C y JP, que al realizar los balances de sacarosa, no-sacarosa y agua se obtienen las composiciones 10.9%, 2.3% y 86.9% respectivamente.

La tabla 4.3 muestra los flujos másicos obtenidos en cada operación para llevar a cabo la clarificación del jugo turbio extraído de los molinos, hasta que se obtiene el jugo clarificado.

Tabla 4.3 Flujos másicos en t/h en operación de clarificación. Fuente: Elaboración propia.

Entradas en operación de clarificación				Salidas en operación de clarificación			
Encalado							
6	Jugo diluido	521.42	t/h	8	Jugo encalado	595.17	t/h
7	Lechada de cal	73.75	t/h				t/h
	Total	595.17	t/h		Total	595.17	t/h
Clarificación							
9	Jugo encalado	595.17	t/h	10	Espumas	52.68	t/h
				13	Jugo claro	542.49	t/h
	Total	595.17	t/h		Total	595.17	t/h
Filtración							
10	Espumas	52.58	t/h	12	Cachaza	42.45	t/h
				11	Jugo filtrado	10.23	t/h
	Total	52.58	t/h		Total	52.68	t/h
Mezclado							
13	Jugo claro	542.49	t/h	14	Jugo clarificado	552.72	t/h
11	Jugo filtrado	10.23	t/h				
	Total	552.72	t/h		Total	552.72	t/h

Evaporación

Para la concentración de la dilución de sacarosa proveniente de la clarificación se empleará un múltiple efecto, en el cual se conectan varios evaporadores de tal manera que la evaporación producida en el primero sirva de vapor de calefacción al segundo evaporador y así sucesivamente, es necesario disminuir la presión de

operación en cada uno de estos para que se produzca el gradiente de temperatura que produce la evaporación. Es común el uso de 5 cuerpos de evaporación dispuestos en serie como en la siguiente figura 4.5, y en el cual por diferencias de presión el jugo se concentra en un jarabe de uso llamado meladura (Robledo, 2006).

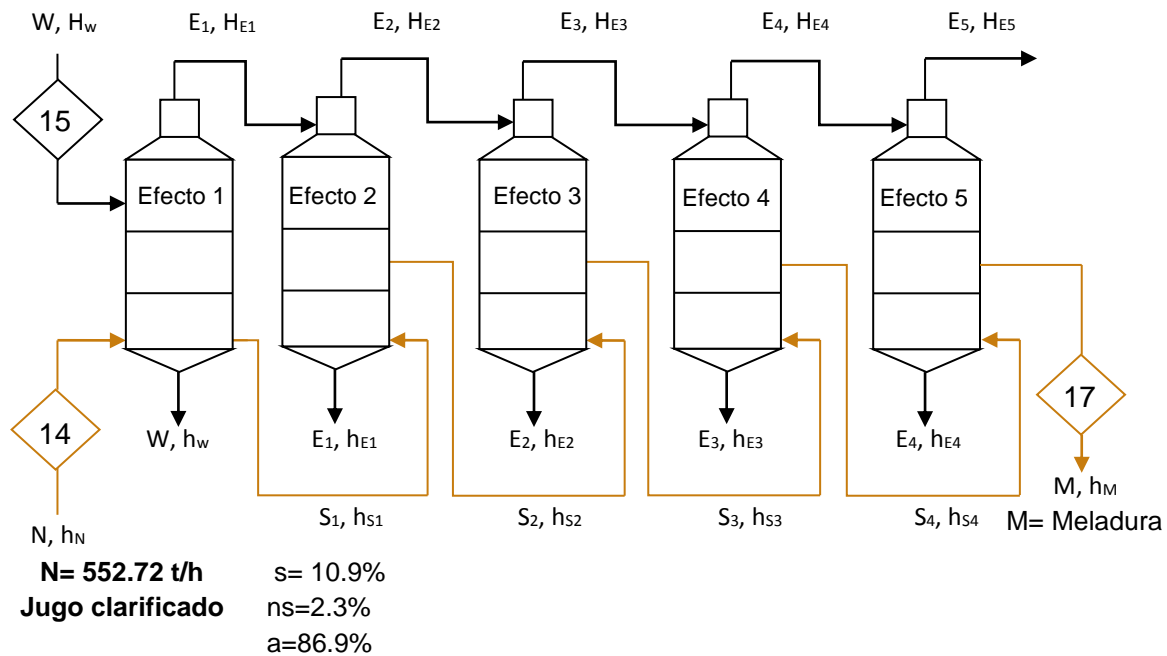


Figura 4.5 Diagrama de evaporación de quintuple efecto. Fuente: Adaptado de Robledo, 2006.

Dónde:

- ◇ N es el flujo másico de jugo clarificado, en toneladas por hora (t/h).
- ◇ S_1, S_2, S_3 y S_4 es el jugo clarificado que se concentra a través de los efectos de evaporación, en t/h.
- ◇ $h_N, h_{s1}, h_{s2}, h_{s3}, h_{s4}$ y h_M son las entalpías de líquido que se va concentrado a través de los efectos de evaporación (desde jugo clarificado a melaza), en unidades de kcal/ kg.
- ◇ M es el flujo másico de meladura, en t/h.
- ◇ W es vapor de agua saturado proveniente de los generadores de vapor, en t/h.
- ◇ H_w entalpía del vapor saturado W , en kcal/kg.

- ◇ h_w entalpía del agua saturada W , en kcal/kg.
- ◇ E_1, E_2, E_3, E_4 y E_5 es el vapor saturado de los efectos de evaporación, en t/h.
- ◇ $h_{E1}, h_{E2}, h_{E3}, h_{E4}$ y h_{E5} entalpías de agua saturada en los efectos de evaporación, en kcal/kg.
- ◇ $H_{E1}, H_{E2}, H_{E3}, H_{E4}$ y H_{E5} entalpías de vapor saturado en los efectos de evaporación, en kcal/kg.
- ◇ λ_w o λ_{Ei} ($H_w - h_w$) calor latente de vapor en cada uno de los efectos, en kcal/kg.

El balance global en el proceso de evaporación es la ec. (17):

$$N = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + M \dots\dots\dots (17)$$

Para cada uno de los efectos de evaporación se deben plantear los siguientes balances: balance global ec. (18), balance de sacarosa ec. (19), no-sacarosa ec. (20) y energía ec. (21), como se detalla a continuación para el primer efecto.

$$N = E_1 + S_1 \dots\dots\dots (18)$$

$$N(X_s)_N = E_1(X_s)_{E1} + S_1(X_s)_{S1} \dots\dots\dots (19)$$

$$N(X_{ns})_N = E_1(X_{ns})_{E1} + S_1(X_{ns})_{S1} \dots\dots\dots (20)$$

$$W\lambda_w + Nh_N = E_1H_{E1} + S_1h_{s1} \dots\dots\dots (21)$$

Las condiciones de operación de cada evaporador se describen en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Condiciones de operación en los evaporadores. Fuente: Robledo, 2010.

	P abs (kg/cm ²)	T (°C)	λ_w o λ_{Ei} (kcal/kg)	H_{Ei} (kcal/kg)
Jugo clarificado		95		
Vapor al efecto I	2.2	122.65	523.9	
Efecto I	1.8	116.43	528.16	644.7
Efecto II	1.4	109.09	533.15	642.0
Efecto III	1.0	99.89	539.38	638.5
Efecto IV	0.7	90.1	545.47	634.9
Efecto V	0.4	77.22		629.5

Los valores utilizados pertenecen a las propiedades termodinámicas del vapor de agua saturado de acuerdo a su presión de operación.

Para el primer efecto de la ec. (18) se despeja a S_1 ec. (22) y se sustituye en la ec. (21) de energía, posteriormente se despeja a E_1 para obtener la ecuación (23).

$$S_1 = N - E_1 \dots\dots\dots (22)$$

$$E_1 = \frac{W\lambda_W + N(h_N - h_{S1})}{(H_{E1} - h_{S1})} \dots\dots\dots (23)$$

Se conocen λ_W , H_{E1} y la corriente N de jugo clarificado. Y se puede calcular h_N y h_{S1} de las ecs. (24) y (25).

$$h_N = Cp_N(T_N - T_{ref}) \dots\dots\dots (24)$$

$$h_{S1} = Cp_{S1}(T_{S1} - T_{ref}) \dots\dots\dots (25)$$

Para los cálculos de entalpias se toma como $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$.

El valor del Cp_N se obtiene de la tabla 4.5. la cual relaciona los °Brix con el calor específico. Se tienen 13.15 °Brix, lo cual es aproximado a 0.91 kcal/kg °C. Y el valor del Cp_{S1} se aproxima al valor del Cp del agua ya que es una disolución azucarada de baja concentración. Se puede ver de manera gráfica en el anexo C.

Tabla 4.5 Relación de °Brix con el calor específico de una solución azucarada. Fuente: Porta, 1955.

°Brix	0	15	40	65
Calor específico	1	0.91	0.77	0.62

Con esto ya se tienen todos los datos para los cálculos de E_1 inicial, excepto el valor de W el flujo de vapor necesario para concentrar la disolución de jugo N , por lo que debe hacerse una primera aproximación que al final del procedimiento de cálculo de los cinco efectos, deberá ser rectificada. Se debe alcanzar una composición de sacarosa final en la meladura de alrededor de 58-62%.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- ◇ Fijar el valor de W .

- ◇ Calcular las entalpias h_N y h_{S1} con los valores de temperatura la tabla 4.4 y Cps establecidos con las ecuaciones (24) y (25), del cual C_{pN} es 0.91 de la tabla 4.5 y C_{pS1} es supuesto como 1 kcal/kg °C.
- ◇ Sustituir todos los valores en la ecuación (23) para calcular E_1 inicial.
- ◇ Calcular el valor de S_1 (22) y las composiciones de sacarosa y no-sacarosa de las ecuaciones (20) y (21), el valor de estas composiciones nos da como resultado un valor de °Brix y con esto un nuevo C_{pS1} de la tabla 4.5. Realizamos este procedimiento hasta que el Cp nuevo calculado sea igual anterior. Y se realizan estos cálculos para el efecto II, III, IV y V.
- ◇ Al final de los cálculos de todos los efectos se debe alcanzar 58-62 °Brix en la miel final.

Se usará un caudal de vapor de 96.2 t/h con el cual obtenemos 60.5 °Brix en la miel final.

Con estos valores de balance global la ec. (17) se obtiene M que es la Meladura obtenida al final de la evaporación.

$$M = N - (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5)$$

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$M = 552.72 \text{ t/h} - (73.37 + 78.73 + 84.05 + 84.73 + 111.68) \text{ t/h}$$

$$M = 120.16 \text{ t/h}$$

El total de agua condensada para los cinco efectos es la ec. (26):

$$V = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \dots\dots\dots (26)$$

$$V = 432.56 \text{ t/h}$$

En la tabla 4.6 se tiene los flujos máxicos en t/h obtenidos en la evaporación.

Tabla 4.6 Flujos másicos en t/h en operación de evaporación. Fuente: Elaboración propia.

Entradas en operación de evaporación				Salidas en operación de evaporación			
14	Jugo clarificado	552.72	t/h	17	Meladura	120.16	t/h
15	Vapor (P= 2 kg/cm ² , T= 125°C)	96.20	t/h	16	Agua evaporada	528.76	t/h
Total		648.92	t/h	Total		648.92	t/h

Cristalización, centrifugación y secado

El proceso de cocimiento de azúcar, es una de las etapas más importantes de la fabricación comercial de azúcar de caña, tanto cruda como refinada. En esta etapa se comienzan a formar los cristales de azúcar y básicamente se compone de dos operaciones (Golato, 2014):

- ◇ La cristalización en caliente se realiza en cuerpos llamados tachos de cocimientos, donde se cuece el producto (Meladura) proveniente de la etapa de evaporación del jugo de caña, mezclados con otros productos intermedios, a los que se denominan masa cocida.
- ◇ La masa cocida obtenida se descarga en unos equipos llamados cristalizadores donde se finaliza el crecimiento de los cristales por enfriamiento de los mismos.

Los cristales de la masa cocida, tienen un revestimiento de miel que se elimina mediante el uso de centrífugas. En esta etapa se da la separación del azúcar y las mieles. El azúcar, se seca para obtener un producto con características de humedad adecuadas y que son necesarias para su conservación, ya sea en sacos o silos. El azúcar al salir de las centrífugas tiene aproximadamente 1% de humedad y al pasar por la secadora ésta baja a 0.1% (Robledo, 2006). La figura 4.6 muestra el diagrama de cristalización para tres masas cocidas.

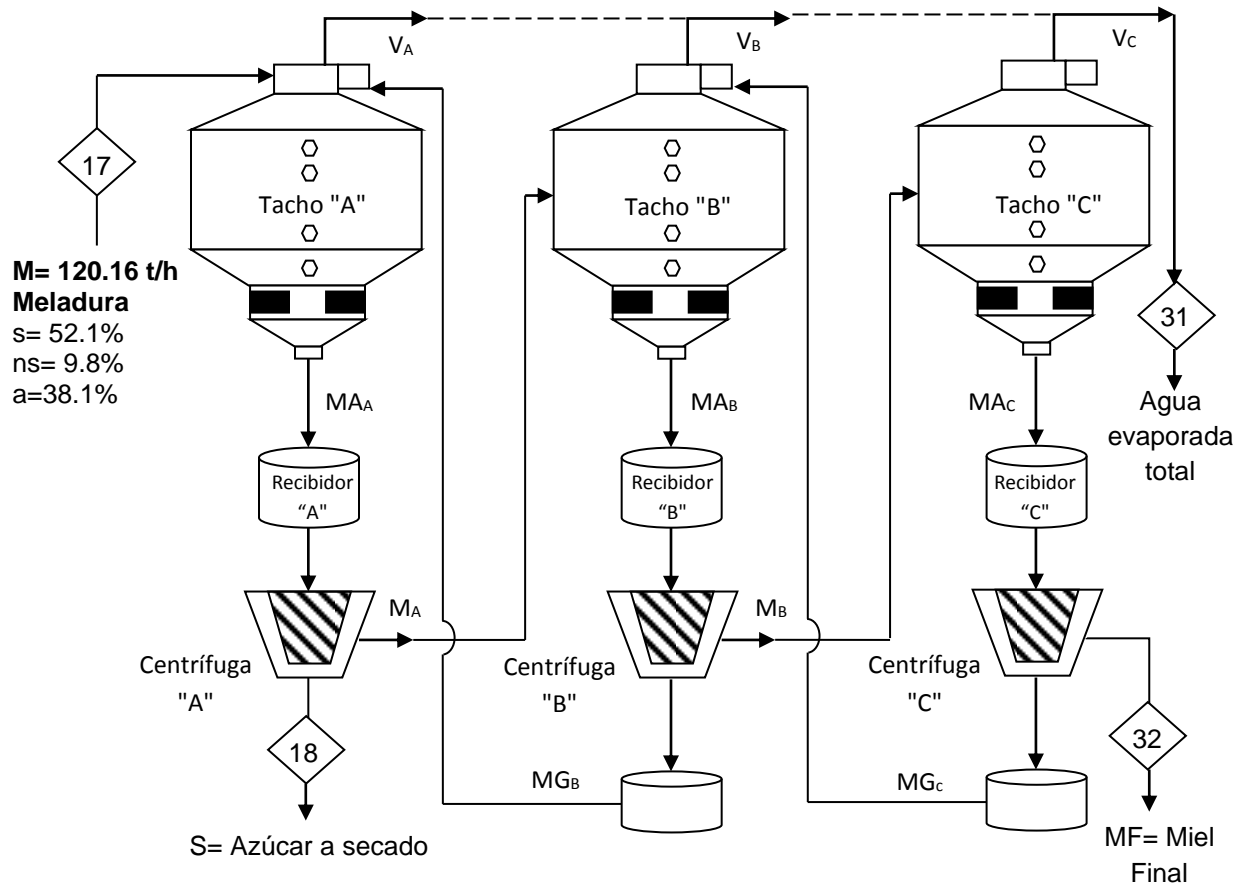


Figura 4.6 Diagrama de cristalización básica para tres masas cocidas. Fuente: Adaptado de Golato, 2014.

Dónde:

- ◇ V_A, V_B y V_C es el agua evaporada en cada los tachos, en t/h.
- ◇ M_{A_A}, M_{A_B} y M_{A_C} es la mezcla de miel más cristales de azúcar que se cocen en los tachos, en t/h.
- ◇ M_A, M_B y M_F conocida como miel pobre, que es obtenida del cocimiento al ser centrifugada el azúcar (tiene un contenido en azúcar menor al de la meladura), en t/h.
- ◇ M_{G_B} y M_{G_C} es el producto azucarado que se obtiene de las centrifugas "B" y "C", en t/h.

El balance global en el proceso de cristalización se describe con la ec. (27):

$$M = S + V_A + V_B + V_C + MF \dots\dots\dots (27)$$

Para cada uno de los cocimientos se deben plantear diferentes ecuaciones: balance global ec. (28), balance de sacarosa ec. (29), no-sacarosa (30) y agua (31). Para las centrifugaciones es el mismo procedimiento. A continuación, se indican las ecuaciones para el primer cocimiento.

Para el tacho "A":

$$M + MG_B = MA_A + V_A \dots\dots\dots (28)$$

$$M(X_s)_M + MG_B(X_s)_{MG_B} = MA_A(X_s)_{MA_A} \dots\dots\dots (29)$$

$$M(X_{ns})_M + MG_B(X_{ns})_{MG_B} = MA_A(X_{ns})_{MA_A} \dots\dots\dots (30)$$

$$M(X_a)_M + MG_B(X_a)_{MG_B} = MA_A(X_a)_{MA_A} + V_A \dots\dots\dots (31)$$

Para la centrifuga "A":

$$MA_A = M_A + S \dots\dots\dots (32)$$

$$MA_A(X_s)_{MA_A} = M_A(X_s)_{M_A} + S(X_s)_S \dots\dots\dots (33)$$

$$MA_A(X_{ns})_{MA_A} = M_A(X_{ns})_{M_A} + S(X_{ns})_S \dots\dots\dots (34)$$

$$MA_A(X_a)_{MA_A} = M_A(X_a)_{M_A} + S(X_a)_S \dots\dots\dots (35)$$

Para determinar la corriente de recirculación M_{GB} que es el azúcar (semillado) o también llamada magma, proveniente del tacho B, se plantea la siguiente ecuación (36). Los valores de la alimentación nos son conocidos y la composición de sacarosa se obtiene considerando que los cristales tienen un 99% de pureza.

$$MG_B = \frac{M(X_s)_M * 0.106}{(X_s)_{MG_B}} \dots\dots\dots (36)$$

Por lo que el valor de M_{GB} nos da un valor de 6.9 t/h.

La cantidad de agua a evaporar en los tachos depende de los datos de solubilidad en función de la temperatura (Ver anexo D). Existe un coeficiente de sobresaturación (S) el cual nos indica si existe la formación de cristales en el

tacho. En la práctica se ha determinado que la sobresaturación a la cuál comienza a cristalizar el azúcar, varía entre 1,10 y 1,50, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura en el tacho y del ingreso de la meladura. El coeficiente se puede calcular con la siguiente ecuación (37):

$$S = \frac{\frac{\text{Cantidad de azúcar}}{100 \text{ partes de agua}}(T,P)}{\frac{\text{Cantidad de azúcar en la saturación}}{100 \text{ partes de agua}}(T,P)} \dots\dots\dots (37)$$

Para mantener la sobresaturación en el valor deseado y el correspondiente nivel de la masa cocida, se regula la alimentación de “Meladura” y “Magma C”. También es importante mantener la presión de vacío estable entre 60 a 65 [cmHg], con el objeto de conservar la ebullición de la masa cocida, y por lo tanto lograr una evaporación constante. La temperatura de la masa cocida no debe superar los 65°C para evitar perder sacarosa (Golato, 2014).

La cantidad de sacarosa en la masa A está dada por la ecuación (29) al sustituir todos los datos conocidos se obtienen 66.88 t/h.

Según la tabla encontrada en el anexo D de solubilidad de la sacarosa la cantidad que debe contener de agua el tacho "A" es la siguiente ec. (38), considerando un coeficiente de saturación S de 1.4 y a una temperatura de 65 °C.

$$MA_A(X_a)_{MA_A} = \frac{66.88 \text{ t/h } (1 \text{ t/h } H_2O)}{322 \text{ t/h } (1.4)} \dots\dots\dots (38)$$

$$MA_A(X_a)_{MA_A} = 14.83 \text{ t/h}$$

De la ecuación (31) se despeja V_A y sustituyendo datos se obtiene 32.76 t/h y MA_A igual a 94.86 t/h despejando la ec. (28). Finalmente, las composiciones de sacarosa, no-sacarosa y agua de esa corriente las obtenemos despejándolas de las ecuaciones (29), (30) y (31).

En la centrifuga "A" para S el azúcar final se considera una pureza e igualmente los °Brix del 99% como parámetro. Por lo que se obtiene que: $(X_s)_S = 98\%$, $(X_{ns})_S = 1\%$ y $(X_a)_S = 1\%$, esta última es la humedad al salir de la centrifuga. La

solución residual resultante de la centrifugación contiene entre el 12% y el 18% del azúcar del jarabe (Robledo, 2006).

Por lo que:

$$M_A(X_S)_{M_A} = M_{A_A}(X_S)_{M_{A_A}} * 0.18 \dots\dots\dots (39)$$

De la ecuación 38 obtenemos la cantidad de sacarosa en la miel "A" que pasará a la siguiente etapa de cocimiento la cual da como resultado 11.94 t/h.

De la ec. (33) se despeja S y se obtienen 56.08 t/h de azúcar estándar con humedad del 1%. Al pasar por el proceso de secado esta azúcar tendrá menor humedad, pero no menos contenido de sacarosa. La cantidad total de miel que pasará al tacho "B" se obtiene de despejar M_A de la ec. (32) dando como valor 38.79 t/h.

Para la recirculación del tacho "B" el factor que se considera es de 0.013. Con esto se puede seguir el mismo procedimiento que el tacho "A", primero para el tacho "B" y después "C".

El proceso para retirar humedad del azúcar proveniente de las centrifugas se da en un secador rotativo, donde se inyecta aire seco a una temperatura entre 80°C y 90°C y no superior, ya que esto produciría la descomposición de la sacarosa. Se desea llegar a una humedad de 0.1% (Robledo, 2010).

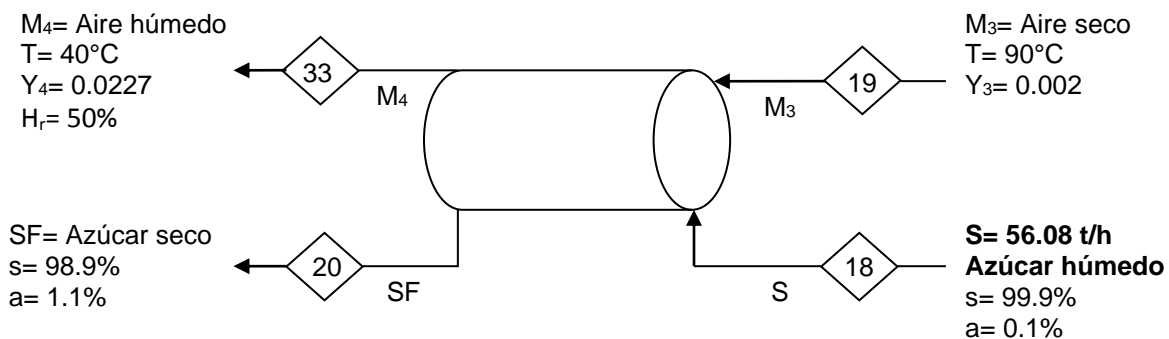


Figura 4.7 Diagrama de secado de azúcar. Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones para la operación de secado son: balance global ec. (40), balance de sólidos ec. (41) esta incluye la composición de sacarosa y no-sacarosa, agua ec. (42) y balances de las corrientes de aire ecs. (43) y (44).

$$S + M_3 = SF + M_4 \dots\dots\dots (40)$$

$$S(X_s)_S = SF(X_s)_{SF} \dots\dots\dots (41)$$

$$S(X_a)_S + M_3Y_3 = SF(X_a)_{SF} + M_4Y_4 \dots\dots\dots (42)$$

Los balances de las corrientes de aire incluyen a M_a que es la masa de aire seco y Y_i significa la humedad en el aire en kg de vapor de agua / kg aire seco que son obtenidos de la carta psicométrica con los valores de temperatura.

$$M_3 = M_a + M_aY_3 \dots\dots\dots (43)$$

$$M_4 = M_a + M_aY_4 \dots\dots\dots (44)$$

De la ec. (42) se puede obtener la M_a que es la masa de aire seco, considerando que M_4 y M_3 son iguales a M_a , con lo cual se obtiene la ec. (45).

$$M_a = \frac{S(X_a)_S - SF(X_a)_{SF}}{Y_4 - Y_3} \dots\dots\dots (45)$$

Al sustituir en la ecuación anterior se obtiene el valor de M_a de 26.61 t/h. Finalmente de las ecs. (43) y (44) se obtienen M_3 de 26.66 t/h y M_4 de 27.21 t/h al sustituir los valores.

En la tabla 4.7 se muestran los flujos máxicos en t/h finales del proceso de producción de azúcar estándar. El valor final obtenido nos da el rendimiento de fábrica deseado de 12.64%.

El procedimiento para obtener los datos de inventario es hallar las entradas y salidas (agua, bagazo, cal, cachaza, miel final, etc.) en el proceso de producción de azúcar estándar en kg/h y dividir las entre el azúcar estándar obtenida en kg/h, como es un cociente las unidades de horas se cancelan, resultando unidades de kg de cierta entrada o salida por cada kg de azúcar estándar procesada.

Tabla 4.7 Flujos másicos en t/h en operación de cristalización y secado. Fuente: Elaboración propia.

Entradas en operaciones de cristalización y secado				Salidas en operaciones de cristalización y secado			
Cristalización							
17	Meladura	120.16	t/h	32	Miel final	18.23	t/h
				31	Agua evaporada	45.66	t/h
				18	Azúcar estándar húmedo	56.08	t/h
Total		120.16	t/h	Total		119.97	t/h
Secado							
18	Azúcar estándar húmedo	56.08	t/h	20	Azúcar estándar	55.53	t/h
19	Aire seco (T=117 °C)	26.66	t/h	33	Aire húmedo	27.21	t/h
Total		82.74	t/h	Total		82.74	t/h

4.4.3. Requerimientos energéticos

El consumo de energía en los ingenios azucareros es variable debido a diversos factores como: el esquema y la tecnología de los servicios energéticos de la planta, tecnología utilizada en los procesos de transformación, la operación que realice el ingenio tanto en el proceso productivo como en cogeneración y la calidad de la materia prima (Rojas, 2014).

Importantes cantidades de vapor son requeridas en el proceso de obtención de azúcar estándar, haciendo los cálculos necesarios se pueden ilustrar valores de consumo para cada etapa del proceso productivo, a partir de los datos que se describen a continuación:

Calentamiento de jugo encalado antes de clarificación

Se tienen 595.17 t/h de jugo encalado y su calor específico es de 0.91 kcal/kg °C, el calentamiento del jugo se realiza desde los 26.6 °C hasta la temperatura de clarificación 104 °C, se tendrá que elevar la temperatura del jugo en 77.4 °C. El vapor de proceso utilizado es de baja presión (2 kg/cm²) el cual es obtenido del escape de las máquinas de vapor o mediante reducción de presión y temperatura

del vapor vivo de las calderas hacia la planta (Caicedo et al., 2012). Por lo que, se requieren 80.02 t/h de vapor.

Calentamiento de jugo claro antes de evaporación

El jugo clarificado llegará a la estación de los evaporadores con una temperatura cercana a los 95 °C y calentar el jugo a la temperatura de ebullición de 116.4 °C, bajo 1.8 kg/cm² de presión en el primer cuerpo para iniciar la evaporación (Robledo, 2006). Este precalentamiento de 21.4 °C requiere 20.41 t/h de vapor para las 552.72 t/h de jugo, puede ser realizado en el evaporador o en un precalentador de jugo.

Concentración de jugos en evaporadores

La concentración del jugo se lleva a cabo en evaporadores con quintuple efecto, el procedimiento para determinar la cantidad de vapor requerida en cada evaporador, así como las condiciones de operación de estos se describen en el apartado 4.4.2 en la sección de evaporación. De acuerdo con lo anterior la cantidad requerida de vapor es de 96.2 t/h para las 552.72 t/h de jugo clarificado.

Cocimiento de masas

Consideramos los requerimientos de vapor para un sistema de tres masas cocidas. Se debe realizar el balance de energía similar al que se realizó en los evaporadores de quintuple efecto, solo que esta vez son evaporadores de efecto simple al vacío y no en serie. El vacío y la ebullición en el tacho de cocimiento deben permanecer constantes para evitar una deficiencia en la cantidad y calidad del azúcar que se quiere obtener. El vacío no debe disminuir, si no la solución hierve a una temperatura mayor a 65 °C, produciéndose una dilución de cristales (Golato, 2014). La cantidad de agua a evaporar para conseguir la sobresaturación es de 49.05 t/h para los tres tachos.

Secado de azúcar estándar

Para retirar el 1.1% de humedad restante del azúcar estándar se considera la entrada de aire seco a una temperatura de 90 °C, humedad absoluta de 0.002 y calor específico de 0.241 kcal/kg °C, ya que condiciones superiores a esta no garantizan el buen estado del producto. Se toma aire húmedo proveniente del ambiente considerando 17 °C y un 50% de humedad relativa (esto no significa que estas condiciones no puedan ser variables, ya que varían de acuerdo a la zona y el día) y se hace pasar a través de un serpentín donde circula el vapor de proceso. La cantidad de vapor de proceso requerida es por mucho inferior a la de otras etapas como el calentamiento del jugo claro o las evaporaciones, sin embargo se calculó para hacer un mejor estimado de este requerimiento. La cantidad de vapor de proceso es de 0.77 t/h para el calentamiento del aire y de 0.91 t/h para el calentamiento de las 56.08 t/h de azúcar estándar obtenidas en la etapa anterior, sin exceder los 60 °C para evitar su degradación.

En la tabla 4.8 se presenta el consumo de energía teórica de las etapas en el ingenio caso de estudio al procesar las 439 t/h de caña y por cada tonelada de caña. Como se puede observar el consumo teórico de energía final de vapor es de 0.56 t por cada t de caña procesada.

Tabla 4.8 Consumo teórico de energía térmica en cada etapa del procesamiento. Fuente: elaboración propia.

Energía térmica teórica requerida	(t/h)	Energía final vapor (t/t caña)
Calentamiento de jugo encalado antes de clarificación	80.0	0.182
Calentamiento de jugo claro antes de evaporación	20.4	0.046
Concentración de jugos en evaporadores	96.2	0.219
Cocimiento de masas cocidas	49.1	0.112
Secado del azúcar estándar	1.68	0.004
Total de consumo de energía térmica	247.36	0.563

Otros valores de referencia son el consumo de vapor promedio nacional el cual es de 0.534 t por cada t de caña (CONADESUCA-SAGARPA, 2018b) y el reportado por el ingenio caso de estudio es de 0.475 t vapor/ t caña (Ver Anexo A). El valor teórico es una buena aproximación a estos valores por lo que será considerado en

el ACV, ligeramente superior debido a que se tomó un valor máximo reportado por el ingenio de flujo másico inicial de caña molida.

Cogeneración de energía

El suministro de energía en los ingenios azucareros se realiza con una planta de cogeneración de energía, en la que se utilizan el bagazo y/o el combustóleo como combustible en las calderas, con el calor generado se produce vapor y a partir de éste se obtiene la energía térmica, mecánica y eléctrica necesaria para el funcionamiento de los equipos de la instalación (Rojas, 2014).

En la figura 4.8 se observa un sistema de cogeneración el cual tiene el objetivo de satisfacer las necesidades energéticas de un ingenio productor de azúcar estándar, también se indican los flujos másicos.

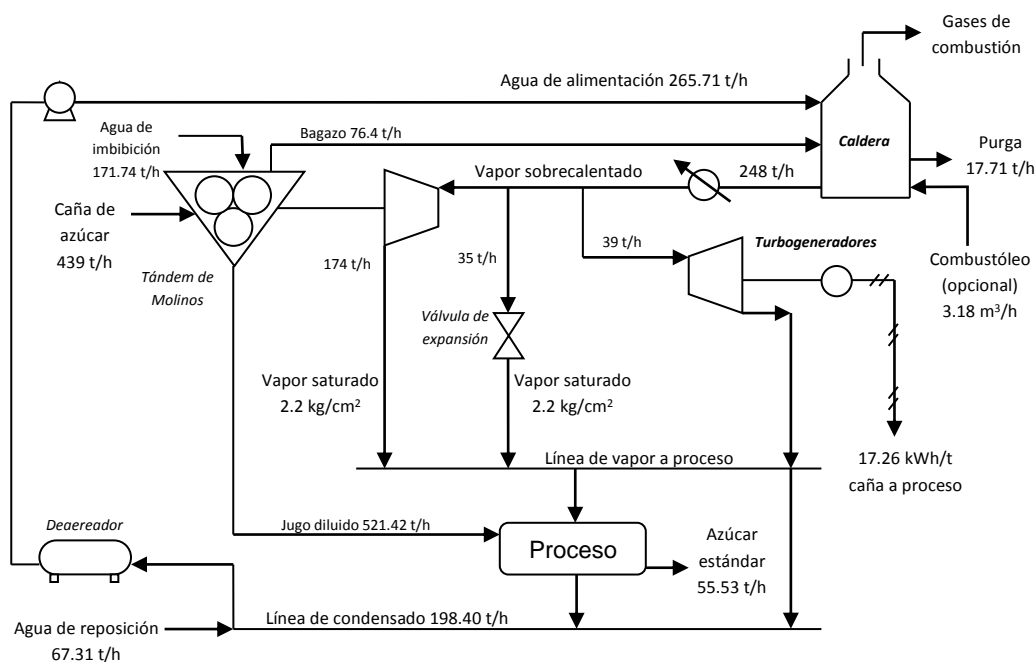


Figura 4.8 Sistema de cogeneración tradicional de un ingenio azucarero. Fuente: Adaptado de Rojas, 2014.

Se empleará un vapor sobrecalentado a 21 kg/cm² de presión abs., 340 °C de temperatura (Rojas, 2014), flujo másico de vapor es de 248 t/h (Tabla 4.8). La eficiencia en la caldera es de 80% (SUCROMER, 2009). Turbogeneradores son

empleados para el accionamiento mecánico de los molinos y la generación de electricidad. La descarga es de 2.2 kg/cm² para usos térmicos del proceso, el retorno de los condensados se considera del 80%. La calidad del agua de reposición será desaerada a una temperatura de 80 °C.

El vapor requerido para accionar motores por ejemplo de los molinos es de 0.44 toneladas de vapor por tonelada de caña molida (CONUEE, CRE y GTZ, 2009) y para los requerimientos de energía térmica es de 0.56 toneladas de vapor por tonelada de caña molida.

La cantidad requerida de bagazo es de 76.4 t/h, considerando un poder calorífico inferior (PCI) de 11,600 KJ/kg con el 30% de humedad, aunque el contenido típico de humedad es alrededor del 50% en el bagazo si se deja en el campo durante 2 o 3 días alcanza el valor de humedad antes mencionado y por tanto un PCI superior (CONADESUCA y SAGARPA, 2016b).

Si el bagazo cuenta con un alto contenido de humedad no resulta suficiente para producir el vapor necesario, por lo que se requiere adicionar combustóleo a la caldera (CONUEE, CRE y GTZ). El consumo de combustóleo es de 8.07 l/ ton caña (CNIAA, 2007).

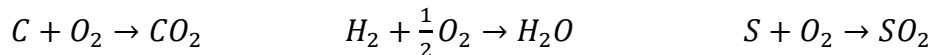
Para realizar los cálculos de los gases de combustión que salen de la caldera por la quema del bagazo, se requiere conocer su composición química la cual es de: 47% Carbono (C), 44% Oxígeno (O), 6.5% Hidrógeno (H), 2.5% Ceniza, siendo porcentajes máxicos (CONADESUCA - SAGARPA, 2016b). Otra bibliografía indica pequeños contenidos de azufre y nitrógeno en el bagazo a considerar entre 0.5% a 0.51% de Azufre (S) y 0.34% a 0.35% de Nitrógeno (N) y la cantidad de cenizas entre 1.5% a 8% (Manso y Manso, 2017).

En la tabla 4.9 se presenta la composición másica y molar de una base de 100 kg de bagazo seco.

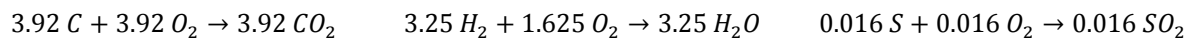
Tabla 4.9 Composición másica y molar de 100 kg de bagazo seco. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Composición (%)	Peso (kg)	PM (kg/mol)	Moles
Carbono (C)	47	47	12	3.92
Oxígeno (O)	44	44	16	2.75
Hidrógeno (H)	6.5	6.5	1	6.50
Azufre (S)	0.5	0.5	32	0.016
Nitrógeno (N)	0.34	0.3	14	0.024
Ceniza	1.66	1.7	-	-

Las reacciones de combustión estequiométrica para determinar la composición final de los gases a la salida de la caldera se describen a continuación:



Si las reacciones anteriores se llevan a cabo con la composición de carbono, hidrógeno y azufre propia del bagazo obtenemos lo siguiente:



El bagazo también contiene oxígeno entre sus componentes, el cual debe de ser restado de los moles requeridos de O_2 para la combustión:

$$O_{2\text{ requerido}} = 3.92 O_2 + 1.625 O_2 + 0.016 O_2 - 1.375 O_2 = 4.186 \text{ Moles}$$

La fuente de O_2 en el aire contiene 21% de Oxígeno (O_2) y 79% de Nitrógeno (N_2) en porcentajes molares. Se considera un 35% de oxígeno en exceso para acercarse a la combustión completa (Yarnal y Puranik, 2010). Por lo que en total se utilizan 5.65 moles de O_2 considerando este exceso. El N_2 que se iría a los gases de combustión de acuerdo con la composición en el aire sería de 21.3 moles, junto con otros componentes como O_2 en exceso, CO_2 , H_2O generado, así como el H_2O de evaporación del agua del bagazo dentro de la caldera.

La tabla final de los gases de combustión se describe en la tabla 4.10 esto solo es para considerar la alimentación de bagazo de 100 kg, al cambiar este valor los valores de los gases de combustión también cambian.

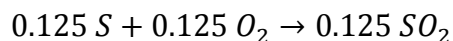
Tabla 4.10 Composición final de los gases de combustión en la caldera por 100 kg bagazo quemado. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Moles	PM (kg/mol)	Peso (kg)
Dióxido de carbono (CO₂)	3.92	44	172.33
Nitrógeno molecular (N₂)	21.25	28	595.06
Oxígeno molecular (O₂)	1.46	32	46.84
Agua (H₂O combustión)	3.25	18	58.50
Agua (H₂O bagazo)	-	18	50.88
Dióxido de azufre (SO₂)	0.016	64	1.00
Ceniza	-	-	1.66

Para los cálculos de los gases de combustión del combustóleo, el combustible auxiliar de la caldera (PCI de 40 MJ/kg) se hizo uso de las tablas 2 y 3 del anexo E para aplicar el factor de emisión que corresponda se transforma el PCI dando un resultado de 11.11 Kwh/kg similar a la del *Fuel* por lo tanto el valor que se emite es de 3.05 kg de CO₂/ kg de combustóleo consumido, como auxiliar se presenta la tabla 4, en el mismo anexo E que presenta un valor de un estudio en México que es muy aproximado al valor ya establecido.

El consumo energético total de combustóleo es de 0.0271 kg por cada kg de azúcar estándar producida multiplicado por el factor de emisión este el valor obtenido es de 0.0826 kg de CO₂ por kg de azúcar estándar producida.

Debido a las variaciones existentes en las composiciones de este combustible las emisiones importantes consideradas fueron las del CO₂ y el SO₂. Se indica que hasta un 4% masa de azufre está presente en este combustóleo (PEMEX, 2014), por lo que se genera en la combustión SO₂ se calculó de manera similar al del bagazo con la siguiente reacción, solo la relación estequiométrica varía debido a que este combustible presenta mayor cantidad de azufre.



Al transformar los 0.125 moles de SO₂ a kg se obtiene que 8 kg SO₂ son generados por cada 100 kg de combustóleo quemado. La cantidad de combustóleo usado anualmente es de 6939 m³ (CONUEE-CRE-GTZ, 2009). El

resultado final obtenido es de 0.00217 kg de SO₂ emitidos por kg de azúcar producida.

4.4.4. *Envase, comercialización y uso del azúcar estándar*

En esta sección se describen los datos de inventario identificados por envase del azúcar estándar, así como su comercialización para llegar a los consumidores, además se incluye el uso que se le da a este producto y los residuos que generan debido a su uso.

Envase del azúcar estándar

En esta etapa el azúcar estándar se envasa en presentaciones de sacos con un contenido de 50 kg. Esta actividad se realiza mediante una báscula calibrada para dosificar el azúcar a los costales.

Una vez ensacada el azúcar, es transportada al área de almacenamiento, donde está acomodada de acuerdo con su fecha de obtención, con el propósito de que se comercialice de manera inmediata y no se rezague el producto.

No existen datos exactos del caso específico de estudio sobre la cantidad de azúcar que se envasa en las diferentes presentaciones para llegar al consumidor final. Por lo tanto, se tendrá que hacer la consideración de que toda la producción en ese año de zafra es envasada en presentaciones de 50 kg y en costales fibras de polipropileno (con peso de 91 ± 4 g por pza.) según lo indica la norma NMX-EE-048-2002 (Industria azucarera. Sacos de Polipropileno), la cual es distribuida a consumidores mayoristas.

Comercialización del azúcar estándar

La comercialización del azúcar está estructurada para abastecer la demanda industrial y doméstica. Los ingenios que pertenecen a consorcios industriales aportan el azúcar para sus representantes industriales y éstos a su vez la transfieren a sus propias empresas comercializadoras (Hernández, 2013).

Los mayoristas están ubicados principalmente en las centrales de abasto, manejan grandes volúmenes y abastecen a minoristas (tiendas de abarrotes que compran de 5-10 bultos de azúcar) y éstos a su vez venden directamente al consumidor. Por esta vía se abastece el 95% del consumo doméstico nacional (Hernández, 2013).

Como se indicó en los alcances las exportaciones de azúcar estándar no se tomarán en cuenta, ya que las reportadas dentro de instituciones como lo son CONADESUCA y CNIAA son datos globales y no puntuales del caso específico de estudio. Las consideraciones importantes en esta sección para poder calcular sus impactos ambientales son: el total de la producción de azúcar estándar se destina al consumo doméstico por consumidores mayoristas, la cantidad máxima de mercancía transportada por viaje es de 40 t (Camión diésel, articulado) y la distancia máxima recorrida es de 180 km por viaje, que es la distancia promedio a la cual se encuentra el ingenio azucarero de la central de abastos en el centro de la Ciudad de México.

Las emisiones se realizaron en función de la distancia recorrida por lo que estas varían en función de múltiples factores, como por ejemplo las características del vehículo y la velocidad de la vía. La tabla 3 del anexo E nos permite conocer la cantidad de CO₂ emitida seleccionando el vehículo camión diésel de tipo articulado de recorrido interurbano a vías donde el límite de velocidad es alrededor de los 100 – 120 km/h (autopistas / autovías) que según se indica es de 791.44 g CO₂/ km.

Con la cantidad de azúcar total producida (254, 549 t) nos permitirá saber cuántos viajes son requeridos para distribuirla, con una carga para cada viaje de 40 t y 180 km de distancia. Por lo tanto, los viajes totales son 6,364 y los kilómetros recorridos totales 1,145, 520 km en un sentido sobreestimado, pero necesario para llegar a una buena aproximación. Con todo lo anterior se puede estimar que 0.00356 kg de CO₂ son emitidos (camión diésel) por cada kg de azúcar producida que es transportada, referido a nuestra unidad funcional. Comparados con las emisiones de la generación de vapor y electricidad este es un valor pequeño.

El consumo medio de diésel para un vehículo articulado de carga general (hasta 40 t máximo) es de 35 l/ 100 km (CNTC et al., 2018). El resultado del diésel consumido es de 0.00131 kg por cada kg de azúcar que es transportada.

Uso del azúcar estándar

El azúcar es algo más que simplemente un dulce. Realiza muchas funciones en los productos alimenticios los cuales son difíciles de reproducir con un solo ingrediente. Las propiedades funcionales que el azúcar proporciona en diferentes productos alimenticios son edulcorante, conservador, hidratante, fibra, base para la fermentación, realzador de sabor, modificador de textura, color y sabor (Cooper, 2012).

A pesar de llevar a cabo todas estas funciones con bajo costo y facilidad, su elevado consumo genera residuos plásticos por el empaquetado de este producto, los cuales son de alrededor de 463 t (Polipropileno en fibras) para el caso específico de estudio para la zafra del año 2016.

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta México en materia ambiental es el consumo del plástico, considerando que los residuos plásticos al año son alrededor de 1,121,000 t, recolectándose únicamente 12% del plástico desechado (Cristán, Ize y Gavilán, 2003).

Por sus características de peligrosidad la mayoría de los plásticos sintéticos no representan un riesgo para el ambiente, pero sí son un problema mayor porque no pueden ser degradados por el entorno. Un método práctico para solucionar este problema es el reciclaje (Cristán et al., 2003).

4.4.5. Resumen de entradas y salidas del sistema

El sistema global se divide en dos subsistemas: ingenio azucarero y producto final (Envase y comercialización).

La tabla 4.11 que se presenta a continuación correspondiente al ingenio azucarero, describe las entradas y las salidas del análisis de inventario tomando como referencia la salida de 1 kg de azúcar estándar. Es decir, para el caso de las

entradas de materiales indicadas en kg y de energía en kWh, éstas fueron las requeridas para producir 1 kg de azúcar estándar, mientras que las salidas de materiales indicadas en kg son las emisiones o residuos generados por cada kilogramo de azúcar estándar producido.

Tabla 4.11 Entradas y Salidas del subsistema ingenio azucarero para la producción de 1kg de azúcar estándar. Fuente: Elaboración propia con datos del ICV.

Ingenio azucarero			
	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas de materiales			
Caña de azúcar	7.91	kg	Calculado del balance de masa, apartado 4.4.2 (Molienda).
Agua (lavado, imbibición, generación de vapor)	7.92	kg	Calculado del recibo de la caña, apartado 4.3.1, balance de masa 4.4.2 (Molienda), y balance de energía 4.4.3 (Cogeneración).
Oxido de Calcio (cal)	0.043	kg	Calculado del balance de masa, apartado 4.4.2 (Clarificación).
Combustible para caldera (bagazo, PCI= 11.6 MJ/kg)	1.38	kg	Calculado del balance de energía caldera 4.4.3 (Cogeneración).
Combustóleo, PCI = 40 MJ/kg	0.0271	kg	Calculado del balance de energía caldera, apartado 4.4.3 (Cogeneración).
Productos químicos adicionales (aceites lubricantes)	6.548x10 ⁻⁹	m ³	Calculado del uso de aceites lubricantes, apartado 4.5.2 (Grasas y aceites empleados para lubricar).
Consumo de vapor	4.4545	kg	Calculado del balance de energía, apartado 4.4.3 (Requerimientos energéticos).
Energía eléctrica	0.1364	kWh	Consultado del informe CONADESUCA, 2016. ANEXO A.
Salidas de materiales			
Azúcar estándar producida	1	kg	Unidad funcional
Cachaza	0.76	kg	Calculado del balance de masa, apartado 4.4.2 (Clarificación).
Miel final	0.33	kg	Calculado del balance de masa,

Continuación de la tabla 4.11

			apartado 4.4.2 (Cristalización).
Bagazo	1.61	kg	Calculado del balance de masa, apartado 4.4.2 (Molienda).
Aguas residuales	8.61	kg	Calculado del agua evaporada balance de masa, apartado 4.4.2 (Evaporación y cristalización).
Emisiones al aire			
Dióxido de Carbono (CO ₂)	2.371	kg	Calculado de combustión bagazo, apartado 4.4.3 (Cogeneración).
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0.0201	kg	Calculado de la descomposición de cachaza, apartado 4.5.2 (Lodos de proceso).
Dióxido de azufre (SO ₂)	0.0138	kg	Calculado de combustión bagazo, apartado 4.4.3 (Cogeneración) .
Partículas <10 µm (Cenizas)	0.0228	kg	Calculado de combustión del bagazo apartado 4.4.3 (Cogeneración).
Emisiones al Agua			
Plomo	1.277x10 ⁻⁷	kg	Consultado del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC, 2017). ANEXO D.
Cadmio (Cd)	1.101x10 ⁻⁷	kg	RETC, 2017. ANEXO D.
Níquel (Ni)	1.955x10 ⁻⁷	kg	RETC, 2015. ANEXO D.
Cromo (Cr)	1.955x10 ⁻⁷	kg	RETC, 2015. ANEXO D.
Emisiones al suelo			
Plomo (Pb)	1.696x10 ⁻⁸	kg	RETC, 2017. ANEXO D.
Cadmio (Cd)	3.942x10 ⁻⁹	kg	RETC, 2015. ANEXO D.
Níquel (Ni)	3.821x10 ⁻⁸	kg	RETC, 2015. ANEXO D.
Cromo (Cr)	3.821x10 ⁻⁸	kg	RETC, 2015. ANEXO D.

La tabla 4.12 corresponde al producto final, donde se incluyen las entradas y salidas de materiales del envase y la comercialización del azúcar estándar. De igual forma que la tabla anterior las entradas se refieren a los kg o t/km que se necesitan para que se envase y transporte 1 kg de azúcar estándar y las salidas

de materiales son las emisiones y residuos generados. Los valores de las emisiones al agua y el suelo pueden ser consultados en el anexo F.

Tabla 4.12 Entradas y salidas del subsistema producto final de la comercialización de 1 Kg de azúcar estándar. Fuente: Elaboración propia con datos del ICV.

Producto final			
	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas de materiales			
Empaques distribución mayorista (Saco de polipropileno, 91 g/pza.)	1.82x10 ⁻³	kg	Consultado de NMX-EE-048-2002. Industria azucarera. Sacos de Polipropileno, apartado 4.4.4 (Envase).
Transporte (Vehículo de carga)	0.222	t/km	Calculado de la carga del camión por viaje, apartado 4.4.4 (Comercialización).
Combustible diésel, PCI= 42 MJ/kg	1.31x10 ⁻³	kg	Calculado del combustible necesario, apartado 4.4.4 (Comercialización).
Salidas de materiales			
Azúcar estándar consumida	1	kg	Unidad funcional
Residuos de empaques (Plástico)	1.82x10 ⁻³	kg	Se considera la misma cantidad que en la entrada, apartado 4.4.4 (Envase).
Emisiones al aire			
Dióxido de Carbono (CO ₂)	3.56x10 ⁻³	kg	Calculado de emisiones del diésel de acuerdo a km recorridos, apartado 4.4.4 (Comercialización).

Los valores que figuran en las tablas de inventario son valores promedio y a veces puntuales. Por lo que en este estudio de ACV se documenta la fuente y alcance de cada valor que se utiliza para que los resultados sean transparentes y reproducibles.

4.5. Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV)

La metodología de evaluación de impactos (EICV) seleccionada para este estudio es la de Eco-Indicador 99, ya que es uno de los modelos de impacto final orientado a evaluar el daño real producido como consecuencia de los problemas ambientales (ej.: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, etc.).

En la metodología de impactos ambientales Eco-indicador 99, los resultados del ICV se agrupan en 11 categorías de impacto, donde se aplican los correspondientes factores de caracterización de impactos. Estas categorías a su vez se agrupan en tres categorías de daño que son los daños a la salud humana, a la calidad del ecosistema y recursos, aplicando los correspondientes factores de caracterización de daños.

El propósito de esta agrupación es combinar las categorías de impacto que tienen la misma unidad del indicador en categorías de daño, y así simplificar la interpretación posterior al reducir el número de categorías de impacto (Aranda et al., 2010).

4.5.1. Clasificación

La selección de las categorías de impacto se realizó considerando aquellas que son relevantes en la problemática ambiental al sector de la industria azucarera en México y, de acuerdo con los objetivos y alcances definidos, de manera que resultan dentro de las categorías de impacto más relevantes: daños a la salud humana por el cambio climático, efectos respiratorios por sustancias inorgánicas, efectos respiratorios por sustancias cancerígenas, daños a los recursos por extracción de combustibles fósiles y daños a la calidad del ecosistema por la ecotoxicidad en el agua, acidificación y eutrofización. Las categorías de impacto se describen brevemente a continuación.

Daños a la salud

Expresado como el número de años de vida perdidos por mortalidad y años de vida productiva perdidos por enfermedad. Se combinan bajo el nombre de "años

de vida sometidos a una discapacidad" (DALYs, por sus siglas en Inglés), término también utilizado por el banco mundial y la OMS (Goedkoop, Effting, Collignon, 1999).

◇ Cambio climático

Es el impacto de las emisiones de gases en la absorción de la radiación térmica por la atmosfera terrestre, causando un incremento en la temperatura de la superficie de la corteza terrestre. El alcance de esta categoría es global (Aranda *et al.*, 2010).

El cálculo de este daño se realizó en una escala de tiempo de 200 años. Después de varios estudios previos sobre los daños de los gases de efecto invernadero desarrollados por Tol R. (1999). Se llegó a la conclusión de que el modelo de daño no es lineal y depende de la vida útil atmosférica, por lo que posteriormente se realizó un cálculo de daño por separado para CH₄, CO₂ y NO₂.

La vida útil de los gases no solo es responsable de la magnitud del forzamiento radiactivo, sino también de la cuestión de si se producen daños o beneficios para la salud. Las sustancias con una vida útil corta parecen tener mayores beneficios que las sustancias con una vida útil más larga.

Se supone que los gases con una vida atmosférica inferior a 20 años se comportan como el metano (CH₄). Los gases con una vida útil atmosférica entre 20 y 100 años se comportan como el dióxido de Carbono (CO₂). Y se supone que los gases con una vida útil atmosférica de más de 100 años se comportan como N₂O.

Esto significa que la tabla de factores de equivalencia se divide en tres grupos. Todos los factores de daño se expresan por kg de sustancia. La unidad de daño es DALYs (Goedkoop y Spriensma, 2001).

◇ Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas

Estudios epidemiológicos han demostrado que varias sustancias no orgánicas están relacionadas con los efectos respiratorios en los seres humanos. Las

principales emisiones que causan efectos respiratorios por la exposición son sustancias como el Amoniaco (NH_3), Partículas, $< 10 \mu\text{m}$, Partículas, $< 2.5 \mu\text{m}$, Ozono (O_3), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), y Óxidos de azufre (SO_x). Estas sustancias son consideradas como contaminantes primarios (Pilkington, Hurley y Donnan, 1997).

El alcance es global, regional y local. El análisis del destino (si las sustancias se degradan o se transfieren a áreas que pueden considerarse sumideros) se basa en datos empíricos. Hofstetter (1998) calculó los factores de destino para las partículas con un modelo simple utilizando supuestos sobre el tiempo de residencia y la altura de dilución. Todos los factores de daño se expresan por kg de sustancia. La unidad de daño es DALYs (Goedkoop et al., 2001).

◇ Efectos respiratorios por sustancias cancerígenas

Para el análisis del destino de las sustancias cancerígenas que causan daños a la salud humana, se utiliza el Sistema Europeo Uniforme para la Evaluación de Sustancias (EUSES por sus siglas en inglés, 1996). Este modelo está diseñado para la evaluación cuantitativa de los riesgos que plantean las sustancias nuevas y existentes para el hombre y el medio ambiente y aunque este fue desarrollado principalmente en la Unión Europea, también está disponible para otras partes del mundo (Goedkoop, 2001).

La incidencia de cáncer se estima utilizando el concepto de riesgo unitario, el cual es un factor de la inhalación, es una estimación de la probabilidad de que una persona promedio desarrolle cáncer cuando se expone a una contaminación a una concentración ambiental de un microgramo por metro cúbico para la vida del individuo (70 años) (Goedkoop et al., 2001).

Daños a los recursos

Se incluye la necesidad extra de energía requerida en el futuro para extraer mineral de baja calidad y recursos fósiles. La humanidad siempre extraerá los mejores recursos primero, dejando los recursos de más baja calidad para futuras

extracciones. Este daño será experimentado por las generaciones futuras, que tendrán que usar mayores esfuerzos para extraer los recursos que quedan. Este esfuerzo extra es expresado como energía excedente (MJ excedentes) (Goedkoop *et al.*, 2001).

◇ *Extracción de recursos fósiles*

Indica cómo la disponibilidad de combustible fósil de fácil extracción como el petróleo, va disminuyendo, por lo que deberán utilizarse otros combustibles de menor calidad. También se puede interpretar esta menor calidad como excedente de energía, ya que la extracción de estos combustibles requerirá un consumo mayor de energía (Aranda *et al.*, 2010).

En 1956, Hubbert propuso una técnica de predicción que se basa en la observación de que en cualquier región, la extracción sin restricciones de un recurso finito aumenta a lo largo de una curva en forma de campana, que alcanza su punto máximo cuando aproximadamente la mitad del recurso se ha ido (Campbell y Alherrére, 1998) y (Kessler, 1994). Con este modelo, Campbell ha modelado de manera sorprendentemente precisa el aumento y la disminución de la producción de petróleo de los EE. UU. Y, en cierta medida, también de la producción mundial de petróleo (Goedkoop *et al.*, 2001).

Daños a la calidad del ecosistema

Se expresa como la pérdida de especies en cierta área durante cierto tiempo ($\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{año}$). Se incluye el efecto sobre la diversidad de especies, especialmente en las plantas vasculares y en los organismos sencillos (Aranda *et al.*, 2010).

◇ *Ecotoxicidad*

Es el resultado de las emisiones de sustancias tóxicas al aire, agua y suelo. Las principales son metales pesados como el mercurio, níquel, cobre, plomo etc. La sustancia de referencia es el cromo. El alcance es global, regional y local (Aranda *et al.*, 2010).

Al igual que las sustancias cancerígenas se utiliza el Sistema Europeo Uniforme para la Evaluación de Sustancias, la distribución de una sustancia sobre los diferentes compartimentos está determinada por las propiedades físicas / químicas de la sustancia y las características de los compartimentos ambientales que inducen procesos de transferencia y la degradación de la sustancia (EUSES, 1996).

El rango de sustancias incluidas en la categoría de impacto de la ecotoxicidad está limitado por la disponibilidad de información sobre daños, se seleccionaron 43 sustancias prioritarias. Se supone que estas sustancias son los contribuyentes más importantes al daño a los ecosistemas en los Países Bajos (Goedkoop *et al.*, 2001).

◇ Acidificación/ Eutrofización

La acidificación es causada por la emisión de protones en los ecosistemas terrestres y acuáticos. En los ecosistemas terrestres los efectos se manifiestan como una disminución del crecimiento del bosque y como consecuencia final su desaparición. En los sistemas acuáticos las consecuencias son cuerpos de agua ácidos sin ningún tipo de vida silvestre (Aranda *et al.*, 2010).

La eutrofización o exceso de nutrientes en los sistemas acuáticos y terrestres puede ser causada por exceso de nitrógeno, fósforo y sustancias orgánicas degradables. El enriquecimiento con nutrientes de los ecosistemas acuáticos incrementa la producción de algas y plantas de gran tamaño que deterioran la calidad del agua y disminuyen la utilidad del ecosistema (Aranda *et al.*, 2010).

Los cambios en los niveles de nutrientes y acidez no son tan simples. Para casi todas las especies de plantas existe una combinación óptima claramente definida de nivel de nutrientes y acidez. El problema de analizar este impacto es averiguar en qué medida se puede considerar que un cambio es un daño, ya que a veces resulta beneficioso para las especies (Goedkoop *et al.*, 2001).

Debido a los problemas planteados en el párrafo anterior, no se han calculado factores de daño para las emisiones al agua y al suelo. Por lo que se sugiere utilizar los factores de daño del aire como una solución temporal (Goedkoop *et al.*, 2001).

4.5.2. Caracterización

A partir de los modelos de análisis de impactos Ecoindicador 99, se presenta la tabla 4.13 un resumen de los valores correspondientes a las categorías de impacto (las tablas completas aparecen en el anexo G, se consideraron las sustancias que más inciden en las categorías de impacto).

Tabla 4.13 Valores de la contribución de categorías de impacto para la producción y comercialización de 1 kg de azúcar estándar. Fuente: Elaboración propia.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Ingenio azucarero	Envase (Polipropileno)	Comercialización de azúcar
Daños a la calidad del ecosistema				
Ocupación de la tierra	PDF·m ² ·año	0.000	0.000	0.000
Acidificación/ Eutrofización	PDF·m ² ·año	0.016625	5.054x10 ⁻⁵	4.96x10 ⁻⁴
Ecotoxicidad	PDF·m ² ·año	5.29x10 ⁻⁴	2.091x10 ⁻¹⁰	3.78x10 ⁻¹⁰
Ecosistema total	PDF·m²·año	1.72x10⁻²	5.054x10⁻⁵	4.96x10⁻⁴
Daños a la salud humana				
Sustancias cancerígenas	DALY	8.43x10 ⁻⁸	6.30x10 ⁻¹²	3.14x10 ⁻¹³
Cambio climático	DALY	0.013482	8.73x10 ⁻¹⁰	1.94x10 ⁻⁵
Radiación	DALY	0.000	7.28x10 ⁻¹²	1.00x10 ⁻¹¹
Agotamiento de la capa de ozono	DALY	0.000	2.98x10 ⁻¹³	2.20x10 ⁻¹⁴
Efectos respiratorios por sustancias orgánicas	DALY	3.07x10 ⁻¹⁵	4.37x10 ⁻¹²	4.37x10 ⁻¹²
Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas	DALY	9.44x10 ⁻⁶	1.40x10 ⁻⁹	9.03x10 ⁻⁹
Salud humana total	DALY	1.35x10⁻²	2.29x10⁻⁹	1.94x10⁻⁵
Daños a los recursos				
Combustibles fósiles	MJ excedentes	0.15989	1.11x10 ⁺¹	7.93x10 ⁻³
Minerales	MJ excedentes	0.000	1.18x10 ⁻⁶	7.51x10 ⁻⁷
Recursos total	MJ excedentes	1.60x10⁻¹	1.11x10⁺¹	7.93x10⁻³

A continuación se describen las principales sustancias presentes en la actividad del ingenio azucarero y producto final (envase y comercialización), consideradas

en la caracterización, que son los resultados del análisis de inventario asociado a los factores de las sustancias emitidas que se muestran las tablas en el anexo H.

Gases de combustión

◇ Generación de vapor y electricidad

Desde hace décadas el bagazo es utilizado como combustible en sistemas de cogeneración que atienden también, con elevada eficiencia, las necesidades de potencia mecánica y de calor de proceso (CONADESUCA y SAGARPA, 2016b).

Durante la combustión del bagazo se emiten a la atmósfera sustancias como:

El dióxido de carbono (CO_2) que es el producto mayoritario, de acuerdo a la tabla 4.11 de inventario 2.371 kg de CO_2 es emitido por cada kg de caña producida.

El CO_2 es uno de los más importantes gases de efecto invernadero (GEI) asociado a actividades humanas y el segundo gas más importante en el calentamiento global después del vapor de agua (Benavides y León, 2007).

El nitrógeno presente en pequeña proporción en el bagazo da lugar a la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x y N_2O), ambos son dañinos al ambiente y la salud humana y animal. El óxido de dinitrógeno (N_2O) contribuye con cerca del 6% del forzamiento del efecto invernadero. La contribución por la combustión de combustibles a las emisiones globales de N_2O es mínima (Benavides *et al.*, 2007). Tanto el CO_2 como el N_2O son considerados como emisiones que contribuyen directamente a la categoría de impacto del cambio climático.

El vapor de agua sigue siendo el GEI más abundante en la atmósfera, las actividades humanas no están afectando directamente la concentración media global del vapor del agua (Benavides *et al.*, 2007), por esto a pesar de producirse en la combustión y procedente de la humedad del bagazo no es considerado en el impacto de cambio climático.

Otras emisiones producidas en la combustión del bagazo son generadas por las pequeñas trazas de azufre presentes en su composición, los óxidos de azufre no

son gases de efecto invernadero, sin embargo deben tomarse en cuenta en otra categoría de impactos, ya que se generan 0.0138 kg de SO₂ por kg de azúcar producida según lo calculado en el inventario en la tabla 4.11.

Finalmente, otras emisiones son las generadas por las partículas sólidas de ceniza, más o menos esféricas con superficie áspera y densidad variable entre 1200-1500 kg/m³ y diámetro desde micrones hasta 2 mm o más y las partículas de hollín que son un polvo fino de baja densidad y frágil, producidas por el abuso mecánico o por las perturbaciones del flujo de gas (Manso *et al.*, 2017). Por lo anterior estas partículas se consideran dentro de las sustancias <10 µm y se emiten 0.0228 kg por cada kg de azúcar producida de acuerdo a la tabla 4.11.

Tanto las partículas sólidas de ceniza como el SO₂, están relacionados con los efectos respiratorios en los seres humanos, por lo que se consideran en la categoría de impactos de efectos respiratorios por sustancias inorgánicas.

La práctica de quemar bagazo como un combustible en las operaciones de procesamiento de la caña puede dar lugar a emisiones por debajo de otros combustibles (Cheesman, 2004), aunque por su alto contenido de humedad no es suficiente para producir el vapor requerido, es por esto que se suele adicionar combustóleo (PCI de 40 MJ/kg) a la caldera (CONUEE *et al.*, 2009). Los valores de su contribución al cambio climático por CO₂ y SO₂ son integrados con las emisiones del bagazo.

◇ Comercialización

La comercialización genera gases como el CO₂ y metano (CH₄), que contribuyen a la categoría de cambio climático, y en mucha menor proporción SO₂ ya que el diesel utilizado como combustible cuenta con 15 mg/ kg de azufre presente (PEMEX, 2019), por lo que se emite una proporción considerablemente pequeña de este contaminante.

Consumo de agua en el ingenio azucarero

Se pueden consumir cantidades relativamente grandes de agua en la fábrica de azúcar de caña, en la limpieza (lavado) de la caña, la extracción del jugo y el

procesamiento posterior y en la producción de vapor para el procesamiento y la generación de electricidad (cogeneración) (Cheesman, 2004).

De la producción del azúcar resultan diferentes efluentes que pueden causar contaminación cuando se descargan. Los efectos contaminantes se ven agravados por la alta demanda de oxígeno de los efluentes y el uso de agentes como la cal en la operación de clarificación (Cheesman, 2004).

El agua residual generada por la limpieza de la caña presenta un problema ambiental, ya que el efluente es fangoso y tiene una alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Se estima una DBO de 200-900 mg O₂/l, dependiendo del sistema de desperdicio utilizado (UNEP, 1982). Las posibles fuentes de contaminantes también incluyen reactivos químicos utilizados en el procesamiento y análisis de los productos de azúcar, que de acuerdo con los reportados en RETC indicados en el anexo F son plomo, cadmio, níquel y cromo, principalmente metales pesados que fueron asociados a la categoría de ecotoxicidad en la EICV.

Agua de enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento de los condensadores barométricos representan una de las principales fuentes de desechos potencialmente dañinos para el medio ambiente en un molino de caña (Cheesman, 2004). Los molinos pueden producir desechos ácidos y cáusticos, a partir de la limpieza del equipo, aunque esto tiende a ser en cantidades relativamente pequeñas y generalmente es insuficiente para afectar el pH del flujo combinado de desechos (UNEP, 1982).

Lodos de proceso (Cachaza)

Durante la etapa de clarificación del jugo de caña en el decantador se generan lodos, que posteriormente, para recuperar jugo pasan a un proceso de filtración al vacío, la torta resultante de esta operación es la cachaza.

La descomposición de la cachaza también contribuye con la emisión de gases nocivos como el CO₂ y CH₄, aparte puede ocasionar problemas de olor significativos (Cheesman, 2004). De acuerdo con un estudio realizado se generan

5.73 microgramos CO₂ /g cachaza seca /h (García, 2014). Es fuente de criadero de moscas y otras alimañas y combustiona espontáneamente en estado seco al estar expuesta al sol. Si no se trata antes de adicionarla como nutriente para el suelo ocasiona retraso en el crecimiento de los cultivos cuando es incorporada en el momento de la siembra.

Sin embargo, también hay mucha evidencia de que los desechos de procesamiento pueden usarse como enmiendas beneficiosas del suelo, si se aplican de manera apropiada (Cheesman, 2004).

La cachaza se considera una de las materias primas que reúne los requisitos adecuados para el compostaje y, por lo tanto, son materiales susceptibles de ser utilizados como substratos para plantas (Basanta, García, Cervantes, Mata y Bustos, 2007).

Residuos celulósicos (Bagazo)

Desde el siglo XIX, el bagazo se convirtió en el combustible tradicional de la industria azucarera. Sus características y propiedades le permiten tener otras aplicaciones como producción industrial de pulpa, papel, cartones especiales, tableros moldeados, furfural furfurílico (alcohol), xilitol (polialcohol), celulosa microcristalina, compuestos de lignina y compuestos furánicos, entre otros. Como uso directo, molido y mezclado con melaza es un alimento de animal de ganado con alto contenido energético (Cortés *et al.*, 2007). Por todas las aplicaciones anteriores el bagazo es un residuo que es altamente aprovechable, en este estudio se analizó como materia prima para la *producción* de energía.

Efluentes (Melaza)

La melaza o miel final es el residuo de cristalización del azúcar, del que no se puede obtener más azúcar por métodos físicos. Se elabora mediante la cocción del jugo de la caña de azúcar hasta la evaporación parcial del agua que éste contiene, formándose un producto meloso semi-cristalizado. Su aspecto es similar al de la miel de abeja aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce, agradable, según los expertos, cuanto más oscura sea, más

sabor y nutrientes tendrá (CONADESUCA, SAGARPA y Universidad Autónoma de Chapingo, 2016).

Los usos a los que se destina la melaza son múltiples. Entre los dos principales tenemos la obtención de alcohol y su utilización como suplemento en la alimentación de ganado rumiante a base de pastoreo o forrajes con poco contenido proteico y alimenticio. La melaza, tiene un alto contenido de azúcares y es un insumo de bajo costo, por lo que es una alternativa para productores pecuarios (CONADESUCA *et al.*, 2016).

Es recomendable usar este subproducto como fuente energética para las especies animales, sin embargo es probable que una cantidad significativa de contaminación en las aguas residuales surja por los derrames accidentales de azúcar y melaza (Cheesman, 2004).

Grasas y aceites empleados para lubricar

Un aceite lubricante es un derivado del petróleo y un elemento esencial en el desarrollo del proceso, que una vez que se usa se convierte en un residuo altamente contaminante sino se le da el manejo adecuado. De acuerdo con la información disponible se encontró que el problema de los lubricantes usados aún no ha sido resuelto en ningún país del mundo en forma definitiva (López, ANIQ y ELF Lubricantes de México, 2004).

La generación de aceites lubricantes en los procesos de generación de energía eléctrica en centrales de potencia, está relacionada fundamentalmente con el empleo de estos en equipos electromagnéticos. El manejo de estos aceites representa un problema en zonas alejadas de ciudades, ya que no hay compañías locales que se dediquen a su reutilización o disposición final (Paredes y CFE, 2004).

Aceites de diferentes grados API se emplean como medio lubricante de trabajo y de enfriamiento en las centrales de generación. Los principales sistemas que los requieren son sistemas de control del grupo turbogenerador y sistemas

electrohidráulicos de la turbina, entre algunos equipos como bombas, compresores de aire y ventiladores (Paredes *et al.*, 2004).

Durante la operación normal de las centrales, los aceites lubricantes que utilizan los diferentes equipos electromagnéticos tienen periodos de vida útil considerables y tan sólo se requiere reponer el aceite que se pierde. En general, los aceites empleados en las turbinas en función de las condiciones de operación varían de 10- 25 m³ cada 15 años (Paredes *et al.*, 2004).

Otro tipo de material que se utiliza ampliamente en equipos eléctricos, como transformadores y capacitores, es el aceite mineral dieléctrico, dadas sus características deben ser resistentes a la ignición, estables a la oxidación, buenos aislantes y refrigerantes (Paredes *et al.*, 2004).

Debido a las características que debe tener un buen lubricante se le suelen adicionar diversos aditivos para mejorar sus características, es debido a esto que se tendría poca precisión de la estimación de las emisiones contaminantes, por lo que no se consideraron en el AICV.

Es importante mencionar que si éste se derrama al agua o suelo es un medio de contaminación provocando serios efectos negativos al ecosistema. En el agua los aceites tienden a flotar debido a la diferencia de densidad que presentan con respecto al agua, bloqueando de esta manera la penetración de la luz y el intercambio de gases. Dicho bloqueo favorece la solubilización de materiales que afectan a las distintas poblaciones como el plancton o los microinvertebrados que viven en el fondo de ríos y pantanos (Adams, Zavala y Morales, 2008). Derrames en el suelo generan minerales tóxicos disponibles para ser absorbidos, además, conducen a un deterioro en su estructura, pérdida del contenido de materia orgánica y pérdida de nutrientes minerales, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato; de igual forma, el suelo se expone a la lixiviación y erosión (Serrano, Torrado y Pérez, 2013).

Residuos plásticos (fibras de polipropileno de costales)

La mayoría de los plásticos utilizados hoy en día se fabrican a partir del procesamiento de combustibles fósiles, como el petróleo o el gas natural, que son considerados como recursos naturales no renovables. Los combustibles fósiles liberan gases de efecto invernadero que causan el cambio climático.

Para obtener los diferentes tipos de plásticos, se agregan diferentes aditivos químicos durante su fabricación, como retardantes de flama, estabilizadores, antioxidantes y otros químicos como antimicrobiales.

A nivel mundial el principal impacto ambiental de los residuos plásticos es la contaminación de los océanos y mares. Es un impacto acumulativo que se presenta a largo plazo y cubre gran cantidad de espacios de todo el planeta (Téllez, 2012).

La presencia de los residuos plásticos representa una amenaza para la biodiversidad marina. Los animales se enredan con éstos, y pueden resultar heridos, inmovilizados o muertos. Además, hay una alta posibilidad que los plásticos pueden transportar y liberar contaminantes al ambiente y la vida animal. Se sospecha que al ingerir los residuos se podrían transferir químicos tóxicos a los organismos (Téllez, 2012).

4.6. Interpretación del ACV

4.6.1. Análisis de resultados

Los valores de mayor incidencia en la producción y comercialización (envase y transporte) de azúcar estándar que se tienen sobre cada categoría de impacto se pueden observar en las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 que a continuación se presentan, las cuales fueron elaboradas con datos obtenidos del trabajo de EICV.

Los daños a la calidad del ecosistema están relacionados con los impactos ambientales de las categorías de acidificación/ eutrofización y ecotoxicidad de acuerdo a la figura 4.9. La categoría ocupación de la tierra no presentó

contribución en este estudio. El ingenio azucarero se graficó en el eje del lado izquierdo y en el eje derecho el envase y el transporte de azúcar. El que contribuye más en la categoría de acidificación/eutrofización es el ingenio azucarero, por las emisiones de SO_2 al aire con $0.0166 \text{ PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{año}$. También la ecotoxicidad en el agua y el suelo es notable para el ingenio con $5.29 \times 10^{-4} \text{ PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{año}$ debido a los metales pesados. La ecotoxicidad por el envase y el transporte son valores muy pequeños.

Por lo tanto, el ingenio azucarero afecta a la calidad del ecosistema en mayor proporción en el análisis de ciclo de vida realizado, con $0.0172 \text{ PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{año}$ por cada kg de azúcar estándar.

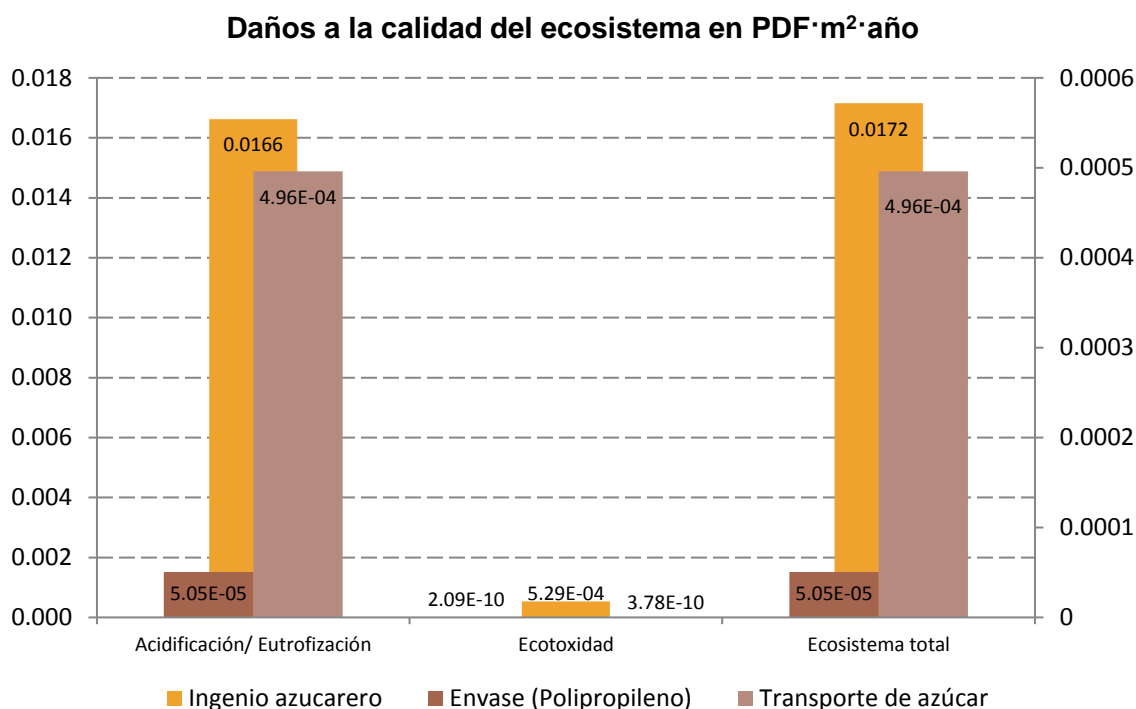


Figura 4.9 Daños a la calidad del ecosistema para 1kg de azúcar estándar. Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 4.13.

En la figura 4.10 se representan los daños a la salud humana en DALYs, en el eje izquierdo se grafican los valores del ingenio azucarero y en el eje derecho se grafican los valores del envase y el transporte del azúcar.

Los daños a la salud humana están relacionados principalmente por las categorías de cambio climático y efectos respiratorios por sustancias inorgánicas, las demás categorías que son radiación, agotamiento de la capa de ozono, efectos respiratorios por sustancias orgánicas y sustancias cancerígenas tienen valores inferiores que no son notables gráficamente.

La categoría que cuenta con una mayor contribución para los daños a la salud humana es la de cambio climático, que es causada en la etapa de producción en el ingenio azucarero. Las sustancias para el cambio climático que se contemplaron como emisiones al aire fueron CO_2 , N_2O y CH_4 dando un resultado de 0.0135 DALYs. Principalmente la sustancia generada es el CO_2 por la producción de vapor en las calderas.

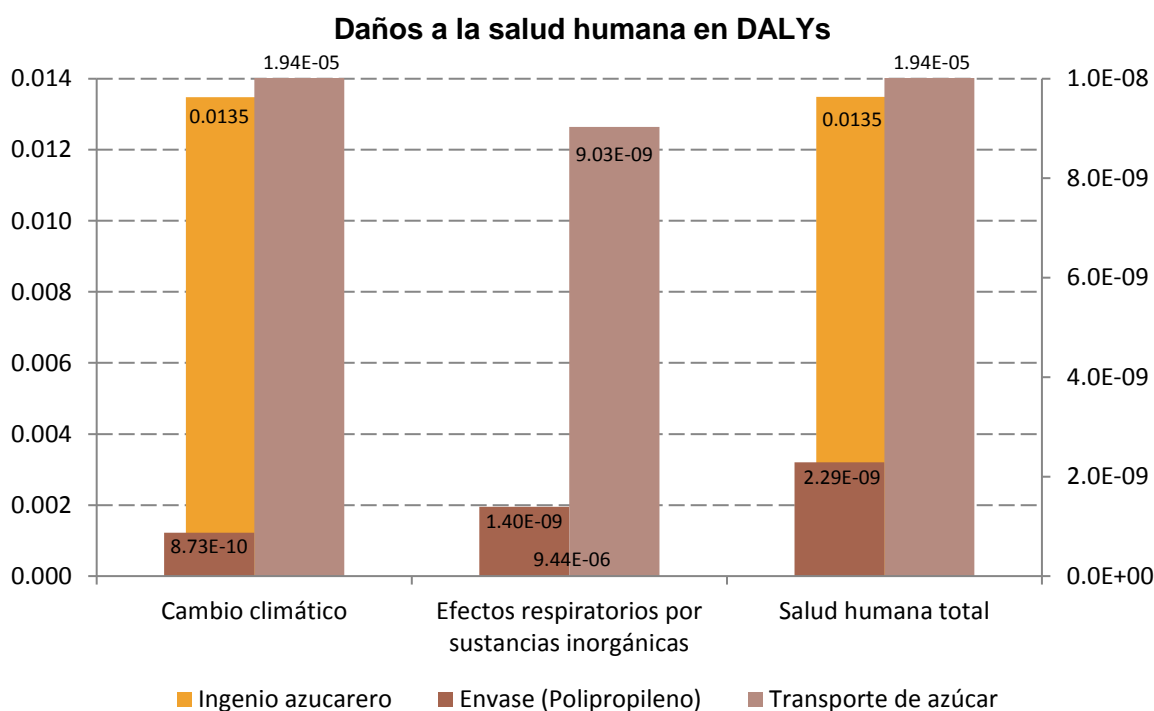


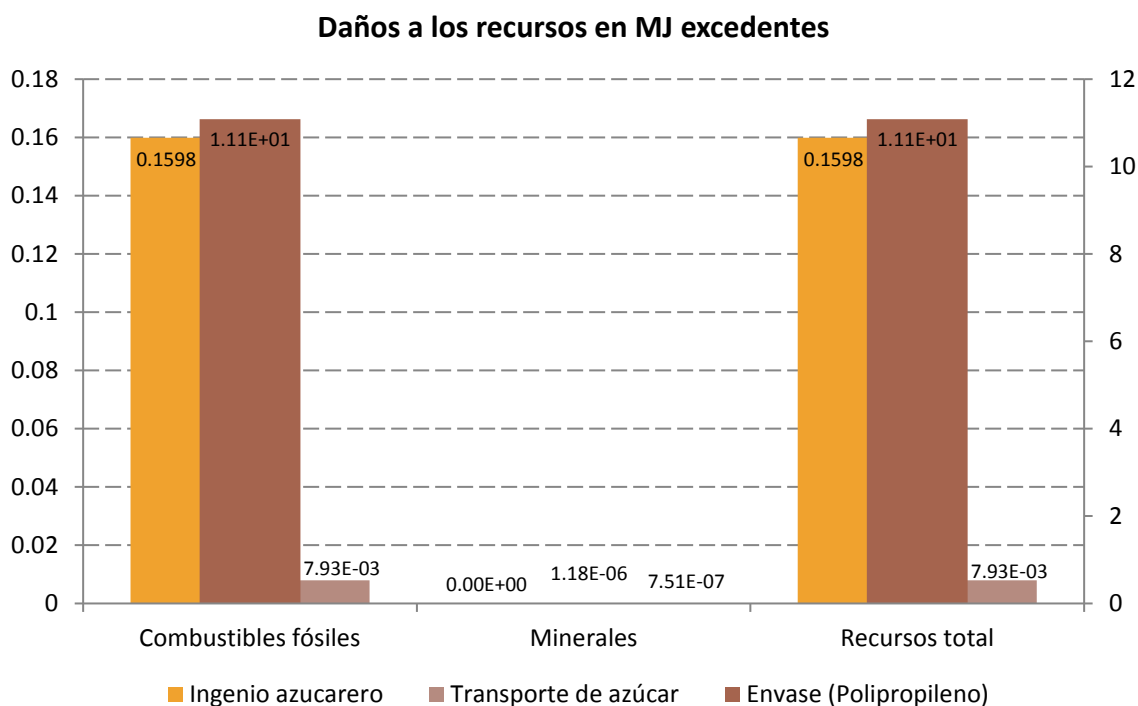
Figura 4.10 Daños a la salud humana en DALY para 1 kg de azúcar estándar. Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 4.13.

Debido a esto el ingenio azucarero es el que cuenta con el mayor valor de 0.0135 DALYs, seguido de 1.94×10^{-5} DALYs debido al transporte de azúcar y que dañan a la salud humana.

Los daños a la calidad de los recursos se observan en la figura 4.11. Es causada principalmente por los requerimientos de combustibles fósiles; la extracción de minerales es mínima, por lo que no se distingue en el gráfico.

En el eje izquierdo se graficó los valores correspondientes al ingenio azucarero y comercialización, mientras que en el eje derecho están los valores del envase.

La categoría de daño que cuenta con una mayor contribución para los daños a los recursos es la de extracción de combustibles fósiles, que es causada debido a la producción del envase de azúcar con 11.1 MJ excedentes.



*Figura 4.11 Daños a los recursos en MJ excedentes para 1 kg de azúcar estándar.
Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 4.13.*

En la figura 4.12 se representa cada una de las categorías de impacto consideradas en este estudio, ya sea por la etapa de producción, envase o transporte, así como las categorías de daño las cuales son las barras representadas como ecosistema total, salud humana total y recursos total.

Categorías de impacto ambiental y categorías de daño

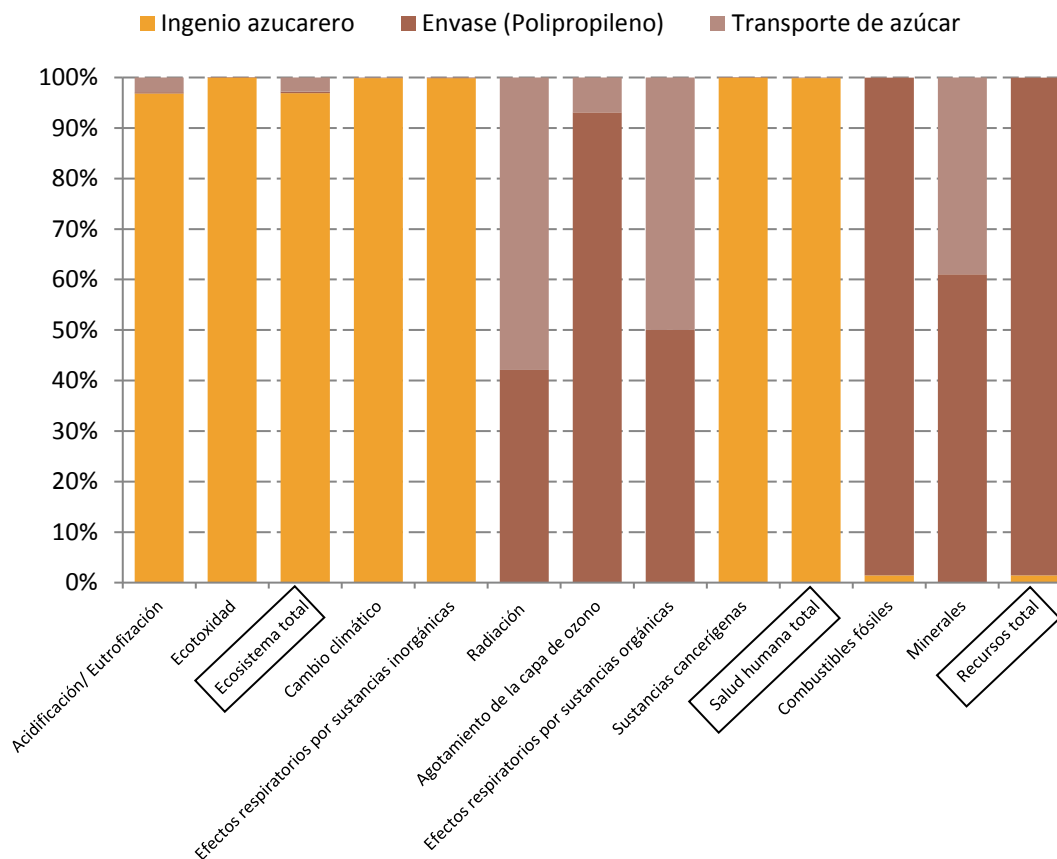


Figura 4.12 Categorías de impacto y categorías de daño en porcentaje causadas por la etapa de producción, envase o transporte del azúcar. Fuente: Elaboración propia con datos de la tabla 4.13.

Los daños al ecosistema son originados principalmente por el ingenio azucarero por la acidificación/ eutrofización y la ecotoxicidad. Igualmente los daños a la salud humana representan mayor contribución debido a las actividades en el ingenio azucarero con las categorías de cambio climático y sustancias inorgánicas, provocadas principalmente por la generación de energía eléctrica, mecánica y térmica para el proceso. Y finalmente los daños a los recursos son causados por la extracción de combustibles fósiles, petróleo y gas natural, para la producción del envase del azúcar, impacto considerablemente mayor por la extracción de combustóleo requerido en el ingenio.

Las etapas de normalización y ponderación en el AICV son etapas opcionales, donde se valoran los resultados en función de una serie de criterios en cierto modo subjetivos. Al llevar a cabo la modelación de los elementos hasta la etapa de caracterización se ha logrado llegar a una conclusión general, que nos permite cumplir con los objetivos establecidos para esta investigación.

CAPÍTULO 5. PROPUESTAS PARA LA MINIMIZACIÓN DE LOS DAÑOS IDENTIFICADOS

A continuación se plantean las propuestas más relevantes de minimización y control de la contaminación de las cuales se obtuvieron un mayor impacto en el AICV de acuerdo al tipo de daño que se genera.

5.1. Daños a la calidad del ecosistema

Los impactos ambientales que causan daños al ecosistema son los de acidificación/eutrofización y ecotoxicidad, que perjudican al desarrollo de las especies en su entorno acuático o terrestre. En la etapa de producción, el alto consumo de agua representa un problema si ésta es contaminada, así como sustancias químicas generadas sin la adecuada disposición. Para mitigar estos daños se propone (Domínguez *et al.*, 2013):

- ◇ Sustitución del lavado de la caña antes de llegar a los molinos por la limpieza en seco.
- ◇ Implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de grasas y aceites (lubricación de equipos), neutralización de pH, sólidos sedimentables y disminución de la temperatura.
- ◇ Recuperar la miel o jugo derramados por fuga o mal manejo del equipo y reprocesarlos para recuperar la sacarosa que contienen, con el objetivo de no generar un exceso de materia orgánica.
- ◇ Contar con un almacén de residuos peligrosos, identificar y disponer éstos de forma adecuada; como los aceites y grasas gastados empleados para lubricar, las estopas o bagazo con grasas y aceites y residuos peligrosos del laboratorio químico.
- ◇ Recuperar los materiales metálicos, disponerlos o almacenarlos en lugares protegidos de la lluvia o humedad para evitar su corrosión y daños que imposibiliten su reuso.

- ◇ Realizar un buen manejo de los lubricantes o productos químicos para evitar la contaminación del suelo (almacenar adecuadamente en bodegas, control de derrames en transporte interno y aplicación).
- ◇ Diseñar e implementar un plan de gestión de residuos generados en la etapa productiva.

5.2. Daños a la salud humana

Las sustancias generadas en la combustión (principalmente CO₂) para la generación de vapor son aquellas que contribuyen al cambio climático y en menor medida gases de SO₂ y partículas de cenizas menores a las 10 µm, ocasionan efectos respiratorios negativos para los humanos por la inhalación.

El SO₂ generado en la combustión no es considerado un gas de efecto invernadero, más que afectar a la salud humana, daña en mayor medida a la calidad del ecosistema al encontrarse entre las sustancias involucradas en la categoría de acidificación/eutrofización. La minimización y control de los gases de combustión es primordial para mitigar estos efectos, por lo que se propone a continuación (Domínguez *et al.*, 2013):

- ◇ Instalar sistemas de control de emisiones a la atmósfera eficientes como separadores de partículas multiciclónicos (serie de ciclones de pequeño diámetro que unidos forman una unidad compacta).
- ◇ Implementar un programa de ahorro y eficiencia energética.
- ◇ Realizar un programa de vigilancia de eficiencia de las calderas que incluya la verificación periódica de la eficiencia de la combustión, monitoreo de los gases de combustión para comprobar la eficiencia de la combustión, observar la acumulación de cenizas u hollín en el área donde pasan los humos negros para saber si requiere de limpieza (ya que impiden el intercambio eficiente de calor al convertirse en aislante).

Otra alternativa para la disminución de emisiones de gases de combustión es el secado del bagazo previo a la combustión (Rojas, 2014).

Al salir de los molinos el bagazo contiene alrededor de un 50% de humedad en peso, este alto porcentaje implica que una buena parte de la energía de la combustión sea consumida en la eliminación del agua del bagazo al interior de las calderas. La capacidad calorífica del bagazo aumenta conforme disminuye el contenido de agua en el mismo, por lo tanto al implementar una operación de secado previo al ingreso a las calderas se incrementaría el vapor generado por tonelada de bagazo quemado, y como resultado se podría sustituir el combustóleo que aún se utiliza, aumentar la generación eléctrica e inclusive tener excedentes de bagazo para tiempos fuera de zafra (Rojas, 2014).

En la industria azucarera se han utilizado tres diferentes sistemas de secado para el bagazo: en túnel, neumático y rotatorio, siendo el más ampliamente utilizado el de tipo rotatorio debido a su facilidad de operación, mantenimiento y menor costo de inversión (Rojas, 2004).

La instalación de nueva tecnología dependerá de un análisis previo de planeación de espacios, compatibilidad con el flujo del proceso y velocidades de producción, análisis de riesgo para los empleados, requerimientos de energía y servicios necesarios para su implementación (Domínguez *et al.*, 2013).

5.3. Daños a los recursos

La extracción de combustibles fósiles ocasiona un daño a los recursos, ya que éstos son no renovables. El combustóleo es usado en la caldera, mientras que el gas natural y el petróleo se usan como materias primas para hacer el envase (sacos de polipropileno), existe una Norma Mexicana que establece las especificaciones mínimas de calidad que deben cumplir los sacos que se usan para envasar azúcar, lo cual no permite cambiarlos por otro tipo de material menos contaminante. Se proponen las siguientes ideas para mitigar los daños a los recursos (Domínguez *et al.*, 2013):

- ◇ Utilizar combustibles fósiles más limpios para la generación de energía, se pueden llegar a instalar calderas 100% bagaceras.

- ◇ Buscar alternativas para la reutilización de sacos dañados y residuos de costura.
- ◇ Reciclaje de los residuos plásticos que ya no pueden ser usados para el envase.

Solo cabe destacar, las propuestas anteriores no son realmente relevantes si no se cuenta con la capacitación y concientización ambiental del personal en todos los niveles jerárquicos en el ingenio azucarero.

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la producción y comercialización de azúcar estándar en México empleando datos de acceso público de un ingenio azucarero del centro del país, realizando las cuatro etapas de la metodología general.

Las etapas del ACV que se realizaron en este estudio fueron los objetivos y alcances, se calcularon los balances de masa y energía y se consultaron diferentes datos para el análisis inventario (ICV). Se llevó a cabo la evaluación de impactos a través del método Ecoindicador 99 (EICV), y finalmente se interpretaron los resultados y se establecieron las conclusiones.

Se identificó que los impactos ambientales asociados de mayor contribución son los causados al ecosistema por la acidificación/ eutrofización, a la salud humana por emisión de sustancias al aire que generan el cambio climático, y a los recursos por la extracción de combustibles fósiles que son utilizados principalmente en la elaboración del envase.

La industria azucarera presenta efectos contaminantes sobre el agua derivados de su elevado consumo energético, sus descargas de alta temperatura y gran contenido de materia orgánica (bagazo y cachaza). Además, contribuye a la contaminación del aire por la utilización de combustóleo y bagazo para la generación de energía térmica.

Las propuestas para disminuir estos daños se enfocan en el ahorro en el uso del agua, sistemas de tratamientos de agua, recuperación de residuos químicos peligrosos (grasas, aceites y productos químicos), sistemas de control de emisiones a la atmósfera eficientes y utilización de combustibles fósiles más limpios para la generación de energía.

Un estudio de este tipo es capaz de proporcionar una cantidad muy grande de información, por lo cual éste se limitó a la etapa de producción y el producto final

(envase y comercialización). Además, la EICV no se consideró las etapas de normalización y ponderación debido a su carácter subjetivo.

Hay que tener en cuenta que el proceso de análisis de inventario (ICV) es iterativo y que debe estar en continua revisión. Se sugiere mejorar la calidad de los datos, con valores lo más actualizados, tanto en la etapa de producción como en la de comercialización del azúcar estándar en México. Aunque debe resaltarse que para este estudio se realizó una búsqueda exhaustiva de información para considerar los datos disponibles del último año reportado.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Agroindustria: conjunto de etapas productivas, factores e interrelaciones que ocurren en la secuencia de fases para la producción, transformación y comercialización de uno o más productos de origen agrícola, pecuario y forestal (Cárdenas, 1990).

Agua de imbibición: es el agua que se agrega en los molinos al bagazo para diluir el jugo, con el objetivo de obtener una mayor extracción (Robledo, 2006).

Bagazo: es el residuo fibroso que se obtiene de la molienda. Se puede usar como abono o combustible (Cortés y Hernández, 2007).

Bioproductos: son el resultado de la aplicación de la biotecnología dentro del ámbito industrial que mediante procesos biológicos, bioquímicos, físicos y/ o térmicos de: fermentación, esterificación, digestión, hidrólisis, etc.; con la incorporación de enzimas, microorganismos, bacterias, etc., se transforma la biomasa en bioproductos como: los bioplásticos, las biopinturas, los biolubricantes, la bioenergía, los biocombustibles, etc. (Escalante, 2017).

Cachaza: son los precipitados que fueron extraídos del proceso de clarificación (Salgado, 2013).

Edulcorante: son sustancias que estimulan el sentido del gusto produciendo un sabor dulce (Akrami, 2016).

Magma "MG_B" y "MG_C": producto azucarado que surge de diluir el azúcar que se obtiene de las centrifugas en los cocimientos "B" y "C" (Golato, 2014).

Meladura: es el jugo concentrado de los evaporadores continuos de varios efectos (Chen, 1991).

Melaza: sustancia espesa, dulce y de color oscuro, es el residuo de la cristalización final del azúcar de caña. Se emplea como alimento de ganado o

elaboración de licor (CONADESUCA, SAGARPA y Universidad Autónoma de Chapingo, 2016).

Poder calorífico inferior (PCI): Es el calor que puede obtenerse en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. Una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua y por ello ese calor no se aprovecha (IDAE, 2010).

Polarización (pol.): grado de refinamiento del azúcar. Se calcula considerando que la pureza de la sacarosa es igual a 100. Es el porcentaje de sacarosa aparente (Caicedo y Medina. 2012).

Política medioambiental: son el conjunto de objetivos, principios, criterios y orientaciones generales para la protección del medio ambiente de una sociedad particular (Rodríguez y Espinoza, 2002).

Residuos químicos peligrosos: son aquellos que independientemente de su estado físico presenta alguna o más de las características de peligrosidad como corrosividad, explosividad, toxicidad e inflamabilidad (INPer, 2011).

Sobresaturación: se produce cuando la solución saturada en el soluto sigue disolviendo al mismo a la misma temperatura, pasando la saturación sin que se produzca precipitación (Golato,2014).

Trapiche: término utilizado que hace referencia a los molinos utilizados en la extracción de la caña de azúcar (Rivera, 2008).

Zafra: es el período del año en que se corta la caña y se produce azúcar. Se utiliza como sinónimo de cosecha y de producción de azúcar (CONADESUCA, 2016).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◇ Adams, R., Zavala, C. J. y Morales, G. F. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en el suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*, 33 (7), 483-486.
- ◇ Akrami, Y. P. (2016). *Edulcorantes alimentarios y su importancia en la alimentación*. Recuperado de: <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/SHIRIN%20PATRICIA%20AKRAMI%20YUS.pdf>.
- ◇ Aranda, U. A. y Zabalza, B. I. (2010). *Ecodiseño y Análisis de ciclo de vida*. España: Universidad de Zaragoza.
- ◇ Basanta, R., García, D. M. A., Cervantes, M. J. E., Mata, V. H. y Bustos, V. G. (2007). *Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera*. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/html/724/72440508/>.
- ◇ Benavides, B. H. O. y León, A. G. E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- ◇ Botha, T & Blottnitz, H. V. (2006). A comparison of the environmental benefits of bagassederived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. *Energy Policy*, 34, 2654 - 61.
- ◇ Bravo, R. N. (2014). *Impacto ambiental de los materiales de construcción. Análisis del ciclo de vida de la vivienda de autoconstrucción*. Tesis de maestría en arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- ◇ Caicedo, C. J. y Medina, J. (2012). *Cálculos básicos en la industria azucarera y proceso para obtención de azúcar blanco directo*. Ecuador. Recuperado de: <http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/calculos-basicos-industria-azucarera>.
- ◇ Capuz, R. S. y Gómez, N. T. (2004). *Ecodiseño. Ingeniería del ciclo de vida para el desarrollo de productos sostenibles*. España: Universidad Politécnica de Valencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◇ Cárdenas, D. S. (1990). *Agroindustria azucarera en México: importancia, problemática, y reprivatización de ingenios*. Recuperado de: <https://chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MjcyNg==>.
- ◇ Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP) y Cámara de diputados. (2001). *La agroindustria azucarera en México*. Recuperado de: <http://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0392001.pdf>.
- ◇ Chacón, J. R. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela de Ingeniería Colombiana*, 72, 37-70.
- ◇ Cheesman, D. O., (2004). *Environmental Impacts of Sugar Production, The Cultivation and Processing of Sugarcane and Sugar Beet*. UK: CABI Bioscience UK Centre Surrey.
- ◇ Chen, C. P. J. (1991). *Manual del azúcar de caña: Para fabricantes de azúcar de caña. y químicos especializados* (Trad. C. A. García). México: Limusa (Original en Inglés, 1985).
- ◇ Comisión interdepartamental del cambio climático y Oficina Catalana del Camvi Climàtic. (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero.GEI*. España: Generalitat de Catalunya.
- ◇ Comité Nacional del Transporte por Carretera (CNTC), Asociación Española de Codificación Comercial (AECOC), Asociación Española de Transporte de Mercancías (aeutransmer) y Asociación Española de Empresas con Transporte Privado de Mercancías y Grandes Usuarios del Servicio Público (Transprime). (2018). *Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera*. Recuperado de: <https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=TTW145>.
- ◇ Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. CONADESUCA. (2014). *Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014- 2018*. México: Diario Oficial de la Federación.
- ◇ CONADESUCA. (2016). *Ficha técnica del azúcar*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114277/Ficha_Tecnica_del_Azucar.pdf.

- ◇ CONADESUCA. (Agosto 2018). *Reporte final de producción de caña y azúcar 2017/18*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/371833/REPORTE_FINAL_.pdf.
- ◇ CONADESUCA-SAGARPA. (2016a). *Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México Zafra 2006-2007/ 2015-2016*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico-zafra-2006-2007-2015-2016?idiom=es>.
- ◇ CONADESUCA-SAGARPA. (2016b). *Reducción del consumo de petróleo y generación de energía eléctrica en los ingenios: Boletín técnico informativo del sector de la caña de azúcar*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114365/Boletin_Tecnico_Informativo_Enero_2016.pdf.
- ◇ CONADESUCA. (2016c). *Legislación aplicable a la agroindustria de la caña de azúcar*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/legislacion-aplicable-a-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar>.
- ◇ CONADESUCA-SAGARPA. (2017a). *Perspectiva del azúcar de caña frente a la inclusión de edulcorantes artificiales*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/201026/Nota_Febrero.pdf.
- ◇ CONADESUCA-SAGARPA. (2017b). *Política Comercial. Balance Nacional de Edulcorantes*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/documentos-politica-comercial-ver-mas>.
- ◇ CONADESUCA- SAGARPA. (2018a). *Reporte final de producción de caña y azúcar. Cifras de corridas finales de la zafra 2017/18*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/la-zafra-2017-18-reporto-una-produccion-nacional-de-6-009-520-toneladas-de-azucar?idiom=es>.
- ◇ CONADESUCA-SAGARPA. (2018b). *5to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México. Nacional y entidad federativa*.

- Recuperado de: <https://www.gob.mx/conadesuca/articulos/5-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico-zafras-2008-2009-2017-2018?idiom=es>.
- ◇ CONADESUCA, SAGARPA y Universidad Autónoma de Chapingo. (2016). *Melazas de caña de azúcar y su uso en la fabricación de dietas para ganado*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171888/Nota_Informativa_No_viembre_Melazas.pdf.
 - ◇ Contreras A. M., Elena Rosa, Maylier Pérez, Langenhove HV, Dewulf J. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* , 17, 772 - 779.
 - ◇ Contreras, W., Cloquell, V. y Owen, M. E. (2007). *Alcances y limitaciones del uso del método de Análisis de Ciclo de Vida para la evaluación de impactos medioambientales en la industria forestal*. Boletín de Información Técnica No. 249. España.
 - ◇ CONUEE-CRE-GTZ. (2009). *Estudio sobre cogeneración en el sector industrial en México*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/92989/EstudioCogeneracion.pdf>.
 - ◇ Cooper, J. (2012). Reformulación de productos ¿Se puede reemplazar el azúcar en los alimentos?. *Revista Internacional del Azúcar*, 114 (1365), 642-645.
 - ◇ Cortés, G. R. y Hernández, G. S. G. (2007). *El bagazo de la caña de azúcar: usos y derivados*. Xalapa, Ver., México: Universidad Veracruzana.
 - ◇ Crespo H. (1998). *Historia del azúcar en México*. México: Centro Fondo de Cultura Económica S.A. de C.V.
 - ◇ Cristán, F. A., Ize, L. I. y Gavilán, G. A. (2003). *La situación de los envases de plástico en México*. Gaceta ecológica. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906905.pdf>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◇ DEAT. (2004). *Life Cycle Assessment; Integrated Environmental Management Information Series 9*. Pretoria, South Africa: Department of Environmental Affairs and Tourism.
- ◇ Domínguez, M. C. A., Bravo, A. H. y Sosa, E. R. (2013). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 15(4), 549-560. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v15n4/v15n4a6.pdf>.
- ◇ Domínguez, M. R. M. (1989). *La industria azucarera mexicana, evolución y retos*. Recuperado de: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/5782/2/24c.pdf>.
- ◇ ELDC 3.2.(2015). *Base de datos europea de referencia del Ciclo de Vida del Centro común de Investigación. Versión 3.2*. Recuperado de: <https://nexus.openlca.org/database/ELCD>.
- ◇ Escalante, L. F. (2017). *Panorama actual de la industria Biotecnológica en México*. Recuperado de: <https://www.promexico.mx/documentos/sectores/presentacion-biotecnologia.pdf>.
- ◇ Ferreri, J. F., Nishihara, H. A. L. y Mele, F. D. (2010). *Estudio ambiental preliminar de la industria de la caña de azúcar en la provincia de Tucumán basado en el Análisis del ciclo de Vida*. Tucumán: Universidad de Tucumán.
- ◇ Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO. (2015). *Food Outlook Biannual Report on Global Food Markets. Unated States*.
- ◇ Gallego, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida: desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre*. Tesis de Maestría. Universidad de Santiago de Compostela; Santiago de Compostela.
- ◇ García, M. J. S. (2014). *Evaluación de estimulantes químicos y biológicos para acelerar la descomposición de residuos provenientes de la cosecha mecanizada de caña de azúcar*. Tesis de licenciatura, Universidad Rafael Landívar, Escuintla, Guatemala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◇ Gazulla, C. et al. (2012). *Manual explicativo del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al sector de la edificación*. Zaragoza, España: Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos.
- ◇ Goedkoop, M., Effting, S. y Collingnon, M. (1999). *Anexo Eco- indicador 99. Método para evaluar el impacto ambiental a lo largo de Ciclo de Vida. Manual para Diseñadores: PRé Consultans C.V.* Traducción y adaptación del lenguaje por IHOPE, Sociedad Pública Gestión Ambiental.
- ◇ Goedkoop, M. & Spriensma, R. (2001). *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report*. PRé Product Ecology Consultants.
- ◇ Golato, M. A. (2014). *Sistema de control en cocimientos de azúcar*. Argentina: Universidad Nacional de Tucumán.
- ◇ Gómez, G. R. J. (2012). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un proceso de fabricación de abrasivos revestidos*. Tesis de maestría en ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, México.
- ◇ Guinée, J. B. et al. (2012). Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 9-11.
- ◇ Hava, L. E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. Madrid, España: Escuela de Organización Industrial.
- ◇ Hernández, H. F. (2013). *Producción y comercialización de la caña de azúcar en el estado de Veracruz*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- ◇ Ihope. Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco. (2009). *Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. Recuperado de: http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001_analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf.
- ◇ INECC-SEMARNAT. (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Recuperado de:

- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf.
- ◇ International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044. Environmental management. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines. Switzerland: ISO.
 - ◇ Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2007). Norma técnica colombiana (NTC)- ISO14040. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. Colombia: ICONTEC.
 - ◇ Jolliet, O., Soucy G. et al. (2016). *Environmental Life Cycle Assessment*. Boca Raton, U.S.: CRC Press Taylor & Francis Group.
 - ◇ Lichts F. O. (2007). *International and sweetener report*. International Sugar Journal. 139(12).
 - ◇ López, F. J., Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) y ELF Lubricantes de México. (2004). *Lubricantes usados*. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/35/lubricantes.html>.
 - ◇ Manso, W. y Manso, M. (2017). *Bagazo, calderas de vapor, gases y medio ambiente*. Recuperado de: <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/2.-F%C3%81BRICA-1.pdf>.
 - ◇ Niembro, J. y González, M. (2008). *Categorías de evaluación de impacto de Ciclo de Vida vinculadas con energía: Revisión y prospectiva*. Zaragoza, España: 12th International Conference on Project Engineering.
 - ◇ NMX-EE-048-2002. *Normas Mexicanas. Dirección General de Normas. Industria Azucarera. Sacos de Polipropileno, sacos con liner de Polietileno y sacos laminados de boca abierta para envasar azúcar. Especificaciones y métodos de prueba. Polipropylene sacks for sugar packing*. (2002). Recuperado de: <https://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-EE-048-2002.pdf>.
 - ◇ OCDE-FAO. (2015). *Proyecciones per cápita global 2015 a 2024*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i4738s.pdf>.
 - ◇ Paredes, A. J. y Comisión Federan de Electricidad (CFE). (2004). *Manejo de solventes y aceites gastados en las centrales de potencia de la CFE*.

- Recuperado de:
<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/35/manejo.html>.
- ◇ PEMEX. (2015). *Hoja de datos de seguridad de combustóleo pesado*. Recuperado de:
<http://www.pemex.com/comercializacion/productos/HDS/refinados/HDS%20SAC%20Combust%C3%B3leo%20pesado%20v2.pdf>.
 - ◇ PEMEX. (2019). *Diésel*. Recuperado de:
<http://www.pemex.com/comercializacion/productos/Paginas/refinados/diesel.aspx>.
 - ◇ Perafán, F. (2009). *Azúcar de caña*. Recuperado de:
<http://www.perafan.com/azucar/ea02azuc.html>.
 - ◇ Pilkington, A., Hurley, F., Donnan, P. (1997). *Health Effects in Externs Transport: Assessment and Exposure-Response Functions*. Edinburgh: Institute of Occupational Medicine.
 - ◇ Plascencia, S. A., (2014). *Balance de materiales para aumento de capacidad ingenio azucarero El Dorado*. Tesis para obtener el título de bioquímico, Instituto tecnológico de Colima.
 - ◇ Porta, A. (1955). *Fabricación del azúcar*. Madrid, España: Salvat, S. A.
 - ◇ Rajan, C. G. (2001). *Optimization energy in industries*. Tata McGraw-Hill.
 - ◇ Ramjeawon, T. (2008). Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1727–34.
 - ◇ Renouf, M. A., Wegener MK, Nielsen LK et al. (2008). An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 32, 1144–55.
 - ◇ Rivera R. F. J. (2008). *El cultivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum) en la región de Cardel, centro de Veracruz*. Tesis de licenciatura de ingeniero agrónomo en producción, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Coahuila, México.
 - ◇ Robledo, R. C. (2006). *Diseño de una unidad de extracción de azúcar a partir de caña de azúcar*. España: Universidad de Cádiz.

- ◇ Rodríguez, B. M. y Espinosa, G. (2002). *Gestión ambiental en América Latina y el Caribe. Evolución, tendencias y principales practicas*. E.U.: Banco Interamericano de desarrollo. División de medio ambiente.
- ◇ Rojas, C. J. C. (2014). *Consumo y alternativas energéticas de la industria azucarera mexicana*. Tesis de maestro en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.
- ◇ Romero, R. B. I. (2003). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. *Tendencias tecnológicas*, 91, 91-97.
- ◇ Ruiz, F. N. (2007). *Aplicación del análisis de ciclo de vida en el estudio ambiental de diferentes procesos avanzados de oxidación*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona.
- ◇ Sáenz, B. y Zúfia, M. J. (1996). Análisis de Ciclo de Vida para la reducción de impactos medioambientales generados por el sector agroalimentario Vasco. *Rev. Agroalimentaria*, 49, 48-50.
- ◇ SAGARPA. (2016a). *Ingenio azucarero, el primer paso de la transformación del azúcar*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/ingenio-azucarero-el-primer-paso-de-la-transformacion-del-azucar>.
- ◇ SAGARPA. (2016b). *Caña de azúcar un valioso alimento*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/cana-de-azucar-un-valioso-alimento>.
- ◇ SAGARPA. (2017). *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Caña de azúcar Mexicana*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sagarpa/documentos/planeacion-agricola-nacional-2017-2030>.
- ◇ SAIC. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Scientific Applications International Corporation. Cincinnati, Ohio: EPA/600/R-06/06.
- ◇ Salgado, G. S., Lagunes, E. L., Núñez, E. R., Ortíz, G. C., Bucio, A. L. y Aranda, I. E. (2013). *Caña de azúcar: Producción sustentable*. México: Colegio de postgraduados.
- ◇ Sellers, K. (2015). *Product Stewardship: life cycle and the environment*. Boca Roton, U.S.: CRC Press Taylor & Francis Group.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ◇ SEMARNAT. (2018). Leyes y normas del sector del medio ambiente. Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/leyes-y-normas-del-sector-medio-ambiente>.
- ◇ Serrano, M. F., Torrado, L. M. y Pérez, D. D. (2013). Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *Ciencia y Tecnología*. 11, 233-244.
- ◇ Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP. (2016). *Azúcar que endulza mi vida*. Recuperado de: <http://siaprendes.siap.gob.mx>, México, 2016.
- ◇ SUCROMER, S.A. de C.V. (2009). *Estudio de factibilidad para la instalación de una destilería de etanol en Atencingo*. Puebla, México.
- ◇ Téllez, M. A. (2012). *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá*. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7080/1/905077.2012.pdf>.
- ◇ Tol, R. S. J. (1999). *New estimates of the damage costs of climate change, Part 2: Dynamic estimates*: IVEM, University of Amsterdam.
- ◇ United States Department of Agriculture and Foreign Agricultural Service. USDA-FAS. (May 2018). *Sugar: World Markets and Trade*. Recuperado de: <https://www.fas.usda.gov/commodities/sugar>.
- ◇ USDA. (2016). *United States Department of Agriculture Report*. Recuperado de: <http://www.usda.gov/>.
- ◇ Vigon, B. W. et al. (1993). *Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*. Cincinnati, U.S.: Environmental Protection Agency.
- ◇ Yarnal, G. y Puranik, V. (2010). Energy Management Study in Sugar Industries by Various Bagasse Drying Methods. *Strategic Planning for Energy and the Environmental*, 29 (3),56-78.
- ◇ Zenón, E. y Yhajaira de la R. G. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida de la bioenergía en México*. Michoacán, México: Red Mexicana de bioenergía.

ANEXOS

Anexo A. Marco legal y normativo en materia ambiental aplicable a la agroindustria azucarera

Tabla 1. Legislación ambiental aplicable a la agroindustria azucarera. Fuente: CONADESUCA, 2016c.

Legislación ambiental	
Título	Descripción
Ley de Aguas Nacionales	Tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	Regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños cuando sea exigible a través de los procesos judiciales federales previstos por el artículo 17 constitucional.
Ley General del Cambio Climático	Establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático.
Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	Se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	Tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

Tabla 2. Normativa ambiental aplicable a la agroindustria azucarera. Fuente: SEMARNAT, 2018.

Normativa ambiental	
Código	Título
Materia de agua	
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
Calidad del aire	
NOM-043-SEMARNAT-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la

	atmosfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
NOM-085-SEMARNAT-2011	Contaminación atmosférica - Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.
NOM-098-SEMARNAT-2002	Protección ambiental- Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.
NOM-025-SSA1-2014	Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM 2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
NOM-022-SSA1-2010	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
NOM-023-SSA1-1993	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.
Materia de suelos	
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, cromo, selenio, talio, y/o vanadio.
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

Anexo B. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar del caso de estudio



COMITÉ NACIONAL PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE DE LA CAÑA DE AZÚCAR
INFORME ESTADÍSTICO DEL SECTOR AGROINDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO, ZAFRAS 2006-2007/
2015-2016



INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	ZAFRAS									
		2015-2016	2014-2015	2013-2014	2012-2013	2011-2012	2010-2011	2009-2010	2008-2009	2007-2008	2006-2007
MOLIENDA Y PRODUCCIÓN											
Inicio de molienda	FECHA	11/11/2015	05/11/2014	20/11/2013	03/11/2012	16/11/2011	22/11/2010	19/11/2009	29/11/2008	14/12/2007	07/12/2006
Fin de molienda	FECHA	21/05/2016	02/05/2015	04/06/2014	22/05/2013	29/05/2012	09/05/2011	04/05/2010	03/05/2009	21/05/2008	28/05/2007
Número de días de zafra	DÍA	191	178	196	200	195	169	166	155	159	172
Horas de zafra	H	4,584	4,269	4,712	4,796	4,685	4,048	3,977	3,723	3,804	4,118
Caña molida bruta	t	1,810,879	1,720,750	1,864,958	1,887,603	1,724,336	1,488,307	1,440,597	1,443,095	1,462,939	1,529,539
Caña molida bruta (semana de mayor molienda en zafra)	t	75,369	72,800	71,055	71,810	66,444	68,435	67,570	71,510	70,900	70,470
Caña molida por día de zafra	t	9,481	9,667	9,515	9,438	8,843	8,807	8,678	9,310	9,201	8,893
Caña molida por hora	t	439	431	426	418	408	394	404	420	427	416
Caña molida por hora por veinticuatro	t	10,526	10,346	10,232	10,042	9,794	9,445	9,701	10,075	10,253	9,973
Imbibición % de caña	%	24.979	23.717	24.324	23.534	24.821	24.159	20.765	21.859	21.549	23.080
Extracción jugo mezclado % caña	%	96.680	95.439	96.405	96.231	96.825	95.445	92.989	94.221	93.245	95.422
Extracción Pol % Pol de caña	%	95.15	94.94	94.81	94.95	94.90	93.81	94.03	94.79	94.77	94.89
Extracción reducida a 12.5% en caña	%	95.32	95.08	94.89	94.91	94.96	93.98	93.99	94.81	94.86	94.93
Jugo mezclado	t	1,750,758	1,642,258	1,797,918	1,816,468	1,669,594	1,420,517	1,339,598	1,359,701	1,364,123	1,459,512
Azúcar producida refinada	t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Azúcar producida estándar	t	228,797	219,434	240,736	240,595	226,804	192,400	179,579	186,571	188,878	195,358
Azúcar producida blanco especial	t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Azúcar producida mascabado	t	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Azúcar producida total	t	228,797	219,434	240,736	240,595	226,804	192,400	179,579	186,571	188,878	195,358
Azúcar producida total (semana de mayor prod. en zafra)	t	9,636	9,797	9,743	9,396	8,975	8,821	8,972	9,640	9,504	9,504
Azúcar prod. total base estándar	t	228,967	219,737	241,084	240,995	227,098	192,644	179,781	186,812	189,124	195,585
Azúcar prod. total por día	t	1,198	1,233	1,228	1,203	1,163	1,138	1,082	1,204	1,188	1,136
Miel final 85° Brix producida	t	71,504	66,525	75,404	74,912	65,338	60,201	53,033	57,559	57,792	60,226
Miel final 85° Brix por tonelada de caña	Kg	39.486	38.661	40.432	39.686	37.892	40.449	36.813	39.886	39.504	39.375
Miel final 85° Brix a fca. alcohol	l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alcohol 96° producido	l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PARÁMETROS DE EFICIENCIA											
Eficiencia en fábrica	%	84.255	84.656	84.127	84.758	85.280	83.141	83.974	83.857	83.851	84.118
Caña molida bruta por hectárea	t	118	113	118	121	121	108	111	109	113	116
Rendimiento en fábrica	%	12.635	12.752	12.908	12.746	13.153	12.927	12.466	12.929	12.911	12.772
Azúcar producida por hectárea	t	15	14	15	15	16	14	14	14	15	15

Fibra en caña*	%	12.894	12.821	12.682	12.427	12.626	12.804	12.422	12.540	12.690	12.580
Pol (Sacarosa) en caña	%	14.917	14.994	15.274	14.973	15.351	15.475	14.772	15.390	15.320	15.110
Pureza aparente en jugo en jugo mezclado	%	84.049	84.522	84.439	84.011	84.386	83.499	82.878	83.610	83.940	83.265
Bagazo obtenido*	t	512,461	486,602	520,672	515,364	482,740	427,349	400,139	398,841	414,065	423,045
Bagazo en caña*	%	28.299	28.279	27.919	27.302	27.996	28.714	27.776	27.638	28.304	27.658
Humedad en bagazo*	%	50.884	50.920	50.700	50.670	51.020	50.860	50.930	50.640	51.320	50.710
Pol (sacarosa) bagazo*	%	2.556	2.685	2.841	2.772	2.798	3.336	3.176	2.902	2.833	2.789
Pol (sacarosa) envasada	%	12.568	12.693	12.849	12.691	13.091	12.866	12.405	12.868	12.850	12.710
Sólidos en jugo mezclado	t	305,806	289,796	319,829	319,411	297,672	258,760	241,435	251,845	253,115	263,397
Brix en jugo mezclado	%	17.467	17.646	17.789	17.584	17.829	18.216	18.023	18.522	18.555	18.047
Pol (sacarosa) en jugo mezclado	%	14.681	14.915	15.021	14.773	15.045	15.210	14.937	15.487	15.575	15.027
Bagazo empacado (vendido)	t	0	0	9,262	0	0	0	0	0	0	0
PÉRDIDAS DE SACAROSA											
Pérdidas en bagazo*	%	0.723	0.759	0.793	0.757	0.782	0.958	0.882	0.802	0.802	0.771
Pérdidas en miel final prod. y est. *	%	1.335	1.293	1.347	1.289	1.251	1.355	1.173	1.418	1.380	1.340
Pérdidas en cachaza*	%	0.056	0.050	0.062	0.066	0.065	0.082	0.067	0.075	0.069	0.066
Pérdidas indeterminadas*	%	0.234	0.199	0.222	0.170	0.160	0.213	0.245	0.231	0.224	0.222
Pérdidas totales*	%	2.349	2.301	2.424	2.282	2.260	2.609	2.367	2.527	2.475	2.400
GENERACIÓN Y CONSUMO DE ENERGÍA											
Generación de vapor	t	861,043	770,911	849,939	868,648	813,144	724,185	688,501	618,498	787,738	868,275
Consumo de vapor por kg de caña	kg	0.475	0.448	0.456	0.460	0.472	0.487	0.478	0.429	0.538	0.568
Generación de energía eléctrica	kWh	31,248,900	28,657,700	31,021,700	31,270,700	29,224,400	25,013,900	24,001,573	24,254,600	24,273,300	25,381,675
Generación de energía eléctrica / t de caña	kWh	17.256	16.654	16.634	16.566	16.948	16.87	16.661	16.87	16.592	16.594
Consumo de energía eléctrica CFE*	kWh	120,925	84,525	110,425	92,890	126,000	68,950	455,940	148,873	63,175	83,125
CONSUMO DE PETRÓLEO											
Petróleo en pruebas*	l	0	0	163,076	155,134	163,291	230,855	370,000	231,501	398,314	375,463
Petróleo en fabrica*	l	0	0	145,674	545,531	1,073,491	516,591	1,400,861	1,541,328	2,587,818	4,040,565
Petróleo en liquidación*	l	0	0	13,593	46,606	73,875	0	22,359	19,011	91,214	621,653
Petróleo en fabrica de alcohol*	l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Petróleo total*	l	0	0	322,343	747,271	1,310,657	747,446	1,793,220	1,791,840	2,997,346	5,037,681
Petróleo en fca. por t caña*	l	0	0	0.078	0.289	0.623	0.347	0.972	1.068	1.714	2.642
Petróleo en fca. por t azúcar*	l	0	0	0.605	2.267	4.733	2.685	7.801	8.261	13.277	20.683

Fuente: CONADESUCA/SAGARPA con datos de los ingenios azucareros del país

*Campo de valor mínimo óptimo

** Mes de inicio más temprano

VALOR MÁXIMO
VALOR MÍNIMO

Anexo C. Gráfico que relaciona los °Brix con el calor específico

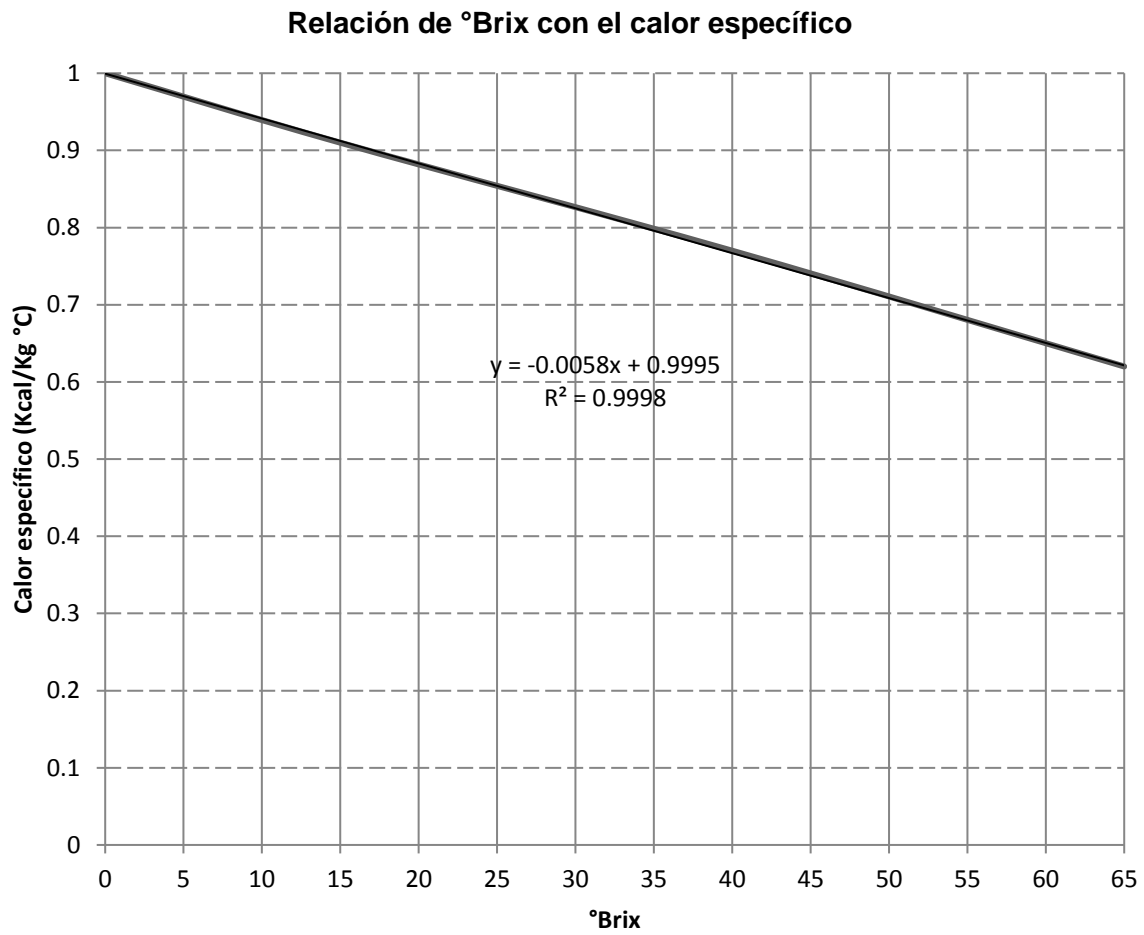


Figura 1. Relación de °Brix con el calor específico de una solución azucarada. Fuente: Porta, 1955.

Anexo D. Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de la sacarosa

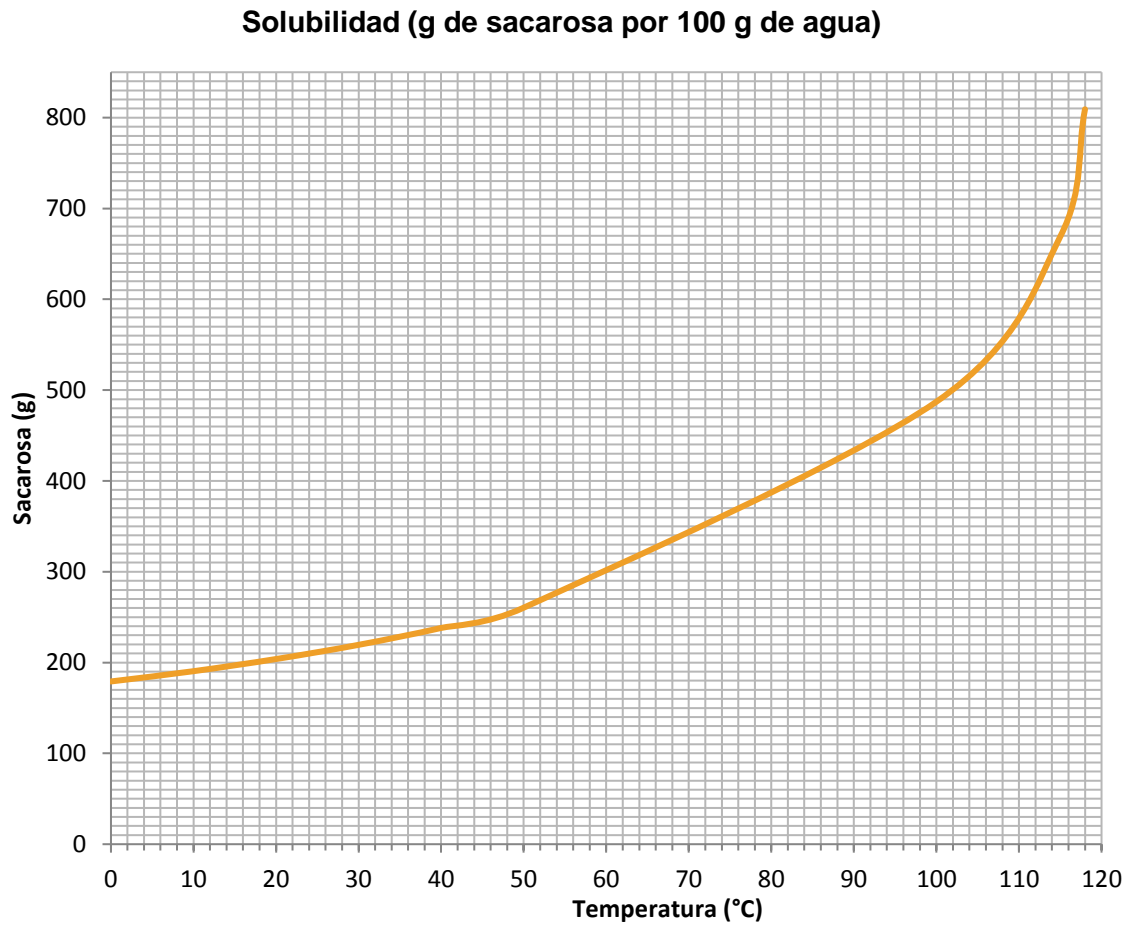


Figura 1. Solubilidad de la sacarosa en función de la temperatura. Golato, 2014.

Anexo E. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles

Tablas 1, 2 y 3 obtenidas de Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero GEI por la Comisión interdepartamental del cambio climático y Oficina Catalana del Camvi Climàtic, 2011.

Consumo de combustibles fósiles

Tabla 1. Factores de conversión para transformar las unidades de masa o volumen en unidades de energía.

COMBUSTIBLE	FACTOR DE CONVERSIÓN ⁵
Gas natural (m ³)	10,65 kWh/Nm ³ de gas natural ^b
Gas butano (kg)	12,44 kWh/kg de gas butano
Gas propano (kg)	12,83 kWh/kg de gas propano
Gasoil (litros)	11,78 kWh/kg de gasoil
Fuel (kg)	11,16 kWh/kg de fuel
GLP genérico (kg)	12,64 kWh/kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	5,70 kWh/kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	7,09 kWh/kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	9,03 kWh/kg de coque de petróleo

Tabla 2. Emisiones de CO₂ asociadas a cada tipo de combustible.

COMBUSTIBLE	FACTOR DE EMISIÓN ⁷
Gas natural (m ³)	2,15 kg CO ₂ /Nm ³ de gas natural
Gas butano (kg)	2,96 kg CO ₂ /kg de gas butano
Gas butano (número de bombonas)	37,06 kg CO ₂ /bombona (considerando 1 bombona de 12,5 kg)
Gas propano (kg)	2,94 kg CO ₂ /kg de gas propano
Gas propano (número de bombonas)	102,84 kg CO ₂ /bombona (considerando 1 bombona de 35 kg)
Gasoil (litros)	2,79 kg CO ₂ /l de gasoil ^b
Fuel (kg)	3,05 kg CO ₂ /kg de fuel
GLP genérico (kg)	2,96 kg CO ₂ /kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	2,30 kg CO ₂ /kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	2,53 kg CO ₂ /kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	3,19 kg CO ₂ /kg de coque de petróleo

Transporte de mercancías

Tabla 3. Emisiones de CO₂ en función de la distancia recorrida, vehículo y velocidad de vía.

VEHÍCULO	TIPO	Emisiones en función del tipo de recorrido (g CO ₂ /km)			
		URBANO	RURAL	INTERURBANO	
Camión diésel	Rígido	<= 14t	539,70	394,98	490,73
		>14t	1103,49	717,04	663,01
	Articulado	<= 34 t	1011,06	646,96	579,96
		>34 t	1506,13	947,43	791,44
Ligero	Gasolina	Cualquiera	365,27	207,32	220,36
	Diésel	Cualquiera	287,14	194,74	282,47

El tipo de recorrido urbano corresponde a vías con una velocidad aproximada de 30 km/h, el rural de 60 km/h (carreteras convencionales) y el interurbano a vías donde el límite de velocidad es alrededor de los 100 – 120 km/h (autopistas / autovías).

Consumo de combustibles fósiles

Tabla 4 obtenida de factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México.

Tabla 4. Factores de emisión e incertidumbre para combustóleo. Fuente: INECC-SEMARNAT, 2014.

Muestra	Densidad	Contenido de carbono	PCN	Contenido de carbono	Factores de emisión		
	kg/litro	% Peso	MJ/kg	kg C/GJ	kgCO ₂ /TJ	kgCO ₂ /kg comb.	kgCO ₂ /l comb.
COMBUSTÓLEO TAR TULA	0.991	86.03	39.00	22.06	80,827.20	3.152	3.124
COMBUSTÓLEO REF. TULA	0.988	83.62	39.39	21.23	77,785.09	3.064	3.026
COMBUSTÓLEO REF. MADERO	1.018	83.40	38.71	21.54	78,943.26	3.056	3.111
COMBUSTÓLEO REF. CADEREYTA	0.986	83.96	39.61	21.20	77,667.58	3.076	3.033
COMBUSTÓLEO TAR SALAMANCA	1.013	86.01	38.42	22.39	82,028.31	3.152	3.192
Promedio	0.999	84.60	39.03	21.68	79,450.29	3.100	3.097
Desviación estándar	0.015	1.31	0.49	0.52	1,920.29	0.048	0.069
Incertidumbre 95% Confianza	0.017	1.46	0.54	0.59	2,146.95	0.054	0.077
% Incertidumbre 95%Confianza	1.70	1.73	1.39	2.70	2.70	1.73	2.50
# Muestras % deseado incert.	1	1	1	2	2	1	2

Nota: TAR: Terminal de Almacenamiento y Recibo. REF.: Refinería.

Anexo F. Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
(RETC)

Tabla 1. Registro de emisiones y transferencias de contaminantes al aire, agua y suelo.
RETC, 2017.

Año	Emisiones al aire			Emisiones Agua		
	Caña molida bruta (t)	Bióxido de Carbono (kg/año)	Plomo (kg/año)	Cadmio (kg/año)	Níquel (kg/año)	Cromo (kg/año)
2017	1,657,919	339,702,411.665	25.381	2.189	-	-
2016	1,810,879	-	-	-	-	-
2015	1,720,750	-	40.677	4.427	42.89	42.89
2014	1,864,958	-	98.478	10.34	90.599	97.985

Emisiones al suelo				
Año	Plomo (kg/año)	Cadmio (kg/año)	Níquel (kg/año)	Cromo (kg/año)
2017	3.723	-	-	-
2016	-	-	-	-
2015	7.897	0.865	8.384	8.384
2014	-	-	-	-

Anexo G. Tablas de caracterización completas para cada subsistema por cada categoría de impacto

Tabla 1. Resultado de los impactos del ingenio azucarero. Fuente: Elaboración propia con datos del ICV y factores de impacto.

INGENIO AZUCARERO							
<i>Daños a los recursos / Extracción de combustibles fósiles</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Combustóleo (PCI =40 MJ/kg)	Recurso/ en tierra	0.0271	kg	5.90E+00	MJ ex/ kg	1.60E-01	MJ ex
					Subtotal	1.60E-01	MJ ex
Total de categoría de daños los recursos						1.60E-01	MJ excedentes
<i>Daños al ecosistema / Acidificación/ Eutrofización</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	0.01597	kg	1.041	PDF·m ² ·año/kg	0.01662477	PDF·m ² ·año
					Subtotal	0.01662477	PDF·m²·año
<i>Daños al ecosistema/ Ecotoxicidad</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Plomo (Pb)	Emisión al agua	1.28E-07	kg	7.39	PDF·m ² ·año/kg	9.46E-07	PDF·m ² ·año
Cadmio (Cd)	Emisión al agua	1.10E-08	kg	480	PDF·m ² ·año/kg	5.28E-06	PDF·m ² ·año
Níquel (Ni)	Emisión al agua	1.95E-07	kg	143	PDF·m ² ·año/kg	2.79E-05	PDF·m ² ·año
Cromo(Cr)	Emisión al agua	1.95E-07	kg	68.7	PDF·m ² ·año/kg	1.34E-05	PDF·m ² ·año
Plomo (Pb)	Emisión al suelo	1.70E-08	kg	12.9	PDF·m ² ·año/kg	2.19E-07	PDF·m ² ·año
Cadmio (Cd)	Emisión al suelo	3.94E-09	kg	9940	PDF·m ² ·año/kg	3.92E-05	PDF·m ² ·año
Cromo(Cr)	Emisión al suelo	3.82E-08	kg	4240	PDF·m ² ·año/kg	1.62E-04	PDF·m ² ·año
Níquel (Ni)	Emisión al suelo	3.82E-08	kg	7320	PDF·m ² ·año/kg	2.80E-04	PDF·m ² ·año
					Subtotal	5.29E-04	PDF·m²·año
Total de categoría de daños a la calidad del ecosistema						1.72E-02	PDF·m²·año
<i>Daños a la salud humana / Cambio climático</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de carbono (CO ₂), fósil	Emisión al aire	2.47380	kg	5.45E-03	DALY/kg	1.35E-02	DALY
Monóxido de dióxido de nitrógeno (N ₂ O)	Emisión al aire	1.06E-05	kg	6.90E-05	DALY/kg	7.31E-10	DALY
Metano (CH ₄)	Emisión al aire	2.40E-07	kg	4.40E-06	DALY/kg	1.06E-12	DALY
					Subtotal	1.35E-02	DALY
<i>Daños a la salud humana / Sustancias cancerígenas</i>							

Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Níquel (Ni)	Emisión al agua	1.95E-07	kg	3.11E-02	DALY/kg	6.06E-09	DALY
Cadmio (Cd)	Emisión al agua	1.10E-08	kg	7.12E-02	DALY/kg	7.83E-10	DALY
Cromo(Cr)	Emisión al agua	1.95E-07	kg	3.43E-01	DALY/kg	6.69E-08	DALY
Cadmio (Cd)	Emisión al suelo	3.94E-09	kg	3.98E-03	DALY/kg	1.57E-11	DALY
Cromo(Cr)	Emisión al suelo	3.82E-08	kg	2.71E-01	DALY/kg	1.04E-08	DALY
Níquel (Ni)	Emisión al suelo	3.82E-08	kg	3.94E-03	DALY/kg	1.51E-10	DALY
					Subtotal	8.43E-08	DALY
Daños a la salud humana / Sustancias inorgánicas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	0.01597	kg	5.46E-05	DALY/kg	8.72E-07	DALY
Partículas < 10 µm	Emisión al aire	0.02284	kg	3.75E-04	DALY/kg	8.57E-06	DALY
					Subtotal	9.44E-06	DALY
Daños a la salud humana / Sustancias orgánicas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Metano (CH ₄)	Emisión al aire	2.40E-07	kg	1.28E-08	DALY/kg	3.07E-15	DALY
					Subtotal	3.07E-15	DALY
Total de categoría de daños a la salud humana						1.35E-02	DALY

Tabla 2. Resultado de los impactos de la producción de envase. Fuente: Elaboración propia con datos del ICV y factores de impacto.

PRODUCCIÓN DEL ENVASE							
Daños a los recursos/ Extracción de minerales							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Plomo (Pb)	Recurso/ en tierra	9.87E-08	kg	7.35	MJ ex/kg	7.25E-07	MJ ex
Cobre (Cu)	Recurso/ en tierra	6.69E-09	kg	36.7	MJ ex/kg	2.46E-07	MJ ex
Hierro (Fe)	Recurso/ en tierra	2.31E-06	kg	0.051	MJ ex/kg	1.18E-07	MJ ex
Zinc (Zn)	Recurso/ en tierra	2.13E-08	kg	1.885	MJ ex/kg	4.02E-08	MJ ex
Níquel (Ni)	Recurso/ en tierra	2.03E-09	kg	16.32	MJ ex/kg	3.32E-08	MJ ex
Bauxita	Recurso/ en tierra	2.97E-08	kg	0.5	MJ ex/kg	1.48E-08	MJ ex
					Subtotal	1.18E-06	MJ excedentes
Daños a los recursos/ Extracción de combustibles fósiles							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Gas natural	Recurso,	37.44838	MJ	1.50E-01	MJ	5.62E+00	MJ ex

(PCI=44.1 MJ/kg)	en tierra				surplus energy/MJ		
Petróleo crudo (PCI=42.3 MJ/kg)	Recurso, en tierra	37.97341	MJ	1.44E-01	MJ surplus energy/MJ	5.47E+00	MJ ex
					Subtotal	1.11E+01	MJ ex
Total de categoría de daños los recursos						1.11E+01	MJ excedentes
Daños al ecosistema/ Acidificación/ Eutrofización							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dioxido de nitrógeno (NO ₂)	Emisión al aire	6.87E-06	kg	5.713	PDF·m ² ·año/kg	3.92E-05	PDF·m ² ·año
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	1.09E-05	kg	1.041	PDF·m ² ·año/kg	1.13E-05	PDF·m ² ·año
					Subtotal	5.05E-05	PDF·m²·año
Daños al ecosistema/ Ecotoxicidad							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Benzo (a) pireno	Emisión al aire	4.58E-13	kg	142	PDF·m ² ·año/kg	6.50E-11	PDF·m ² ·año
Tolueno	Emisión al agua	3.63E-10	kg	0.173	PDF·m ² ·año/kg	6.29E-11	PDF·m ² ·año
Benceno	Emisión al agua	6.16E-10	kg	0.048	PDF·m ² ·año/kg	2.96E-11	PDF·m ² ·año
Benceno	Emisión al aire	9.14E-09	kg	0.00275	PDF·m ² ·año/kg	2.51E-11	PDF·m ² ·año
Dioxinas, medidas como 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina	Emisión al aire	1.33E-16	kg	1.32E+05	PDF·m ² ·año/kg	1.76E-11	PDF·m ² ·año
Bifenilos policlorados	Emisión al aire	1.09E-13	kg	80.7	PDF·m ² ·año/kg	8.80E-12	PDF·m ² ·año
					Subtotal	2.09E-10	PDF·m²·año
Total de categoría de daños a la calidad del ecosistema						5.05E-05	PDF·m²·año
Daños a la salud humana/ Cambio climático							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de carbono (CO ₂)	Emisión al aire	0.00382	kg	2.10E-07	DALY/kg	8.02E-10	DALY
Metano (CH ₄)	Emisión al aire	1.61E-05	kg	4.40E-06	DALY/kg	7.09E-11	DALY
					Subtotal	8.73E-10	DALY
Daños a la salud humana/ Sustancias cancerígenas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Cromo VI	Emisión al agua	1.81E-11	kg	0.343	DALY/kg	6.21E-12	DALY
HAP, hidrocarburos aromáticos policíclicos.	Emisión al aire	5.29E-10	kg	0.00017	DALY/kg	8.99E-14	DALY
					Subtotal	6.30E-12	DALY
Daños a la salud humana/ Sustancias inorgánicas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Emisión al aire	6.87E-06	kg	8.87E-05	DALY/kg	6.09E-10	DALY

Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	1.09E-05	kg	5.46E-05	DALY/kg	5.94E-10	DALY
Partículas <2.5 µm	Emisión al aire	2.41E-07	kg	0.0007	DALY/kg	1.69E-10	DALY
Partículas <10 µm	Emisión al aire	6.49E-08	kg	0.00038	DALY/kg	2.43E-11	DALY
					Subtotal	1.40E-09	DALY
<i>Daños a la salud humana/ Sustancias orgánicas</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
NMVOC, compuestos orgánicos volátiles no metálicos	Emisión al aire	2.68E-06	kg	1.28E-06	DALY/kg	3.43E-12	DALY
Propano	Emisión al aire	7.64E-07	kg	3.83E-07	DALY/kg	2.93E-13	DALY
Metano	Emisión al aire	1.61E-05	kg	1.28E-08	DALY/kg	2.06E-13	DALY
Etano	Emisión al aire	6.75E-07	kg	2.64E-07	DALY/kg	1.78E-13	DALY
Butano	Emisión al aire	2.20E-07	kg	7.57E-07	DALY/kg	1.67E-13	DALY
Pentano	Emisión al aire	1.10E-07	kg	8.51E-07	DALY/kg	9.36E-14	DALY
					Subtotal	4.37E-12	DALY
<i>Daños a la salud humana/ Radiación</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Carbono-14	Emisión al aire	2.25E-05	kBq	2.10E-07	DALY/kBq	4.73E-12	DALY
Cesio-137	Emisión al agua	1.04E-05	kBq	1.70E-07	DALY/kBq	1.77E-12	DALY
Radón-222	Emisión al aire	0.01209	kBq	2.40E-11	DALY/kBq	2.90E-13	DALY
Cobalto-60	Emisión al agua	4.84E-06	kBq	4.40E-08	DALY/kBq	2.13E-13	DALY
Cesio 134	Emisión al agua	1.13E-06	kBq	1.40E-07	DALY/kBq	1.58E-13	DALY
Criptón-85	Emisión al aire	0.82942	kBq	1.40E-13	DALY/kBq	1.16E-13	DALY
					Subtotal	7.28E-12	DALY
<i>Daños a la salud humana/ Agotamiento de la capa de ozono</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Metano, triclorofluoro, CFC-11	Emisión al aire	1.39E-10	kg	0.00105	DALY/kg	1.46E-13	DALY
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Emisión al aire	1.42E-10	kg	0.00089	DALY/kg	1.27E-13	DALY
Metano, diclorodifluoro, CFC-12	Emisión al aire	2.98E-11	kg	0.00086	DALY/kg	2.57E-14	DALY
					Subtotal	2.98E-13	DALY
Total de categoría de daños a la salud humana						2.29E-09	DALY

Tabla 3. Resultado de los impactos de transporte de azúcar. Fuente: Elaboración propia con datos del ICV y factores de impacto.

TRANSPORTE							
<i>Daños a los recursos/ Minerales</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Plomo (Pb)	Recurso/ en tierra	6.75E-08	kg	7.35	MJ ex/kg	4.96E-07	MJ ex
Cobre (Cu)	Recurso/ en tierra	3.67E-09	kg	36.7	MJ ex/kg	1.35E-07	MJ ex
Hierro (Fe)	Recurso/ en tierra	1.43E-06	kg	0.051	MJ ex/kg	7.28E-08	MJ ex
Zinc (Zn)	Recurso/ en tierra	1.34E-08	kg	1.885	MJ ex/kg	2.52E-08	MJ ex
Níquel (Ni)	Recurso/ en tierra	1.37E-09	kg	16.32	MJ ex/kg	2.24E-08	MJ ex
					Subtotal	7.51E-07	MJ excedentes
<i>Daños a los recursos/ Combustibles fósiles</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Diésel (PCI= 42 MJ/kg)	Recurso/ en tierra	1.31E-03	Kg	6.05	MJ ex/kg	0.00792853	MJ ex
					Subtotal	7.93E-03	MJ ex
Total de categoría de daños los recursos						7.93E-03	MJ excedentes
<i>Daños al ecosistema/ Acidificación/ Eutrofización</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Emisión al aire	8.54E-05	kg	5.713	PDF·m ² ·año/kg	0.00049	PDF·m ² ·año
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	5.75E-06	kg	1.041	PDF·m ² ·año/kg	5.98E-06	PDF·m ² ·año
					Subtotal	0.00049598	PDF·m²·año
<i>Daños al ecosistema/ Ecotoxicidad</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Benceno	Emisión al aire	7.16E-08	kg	0.00275	PDF·m ² ·año/kg	1.97E-10	PDF·m ² ·año
Tolueno	Emisión al agua	7.17E-10	kg	0.173	PDF·m ² ·año/kg	1.24E-10	PDF·m ² ·año
Benceno	Emisión al agua	1.20E-09	kg	0.048	PDF·m ² ·año/kg	5.74E-11	PDF·m ² ·año
					Subtotal	3.78E-10	PDF·m²·año
Total de categoría de daños a la calidad del ecosistema						4.96E-04	PDF·m²·año
<i>Daños a la salud humana/ Cambio climático</i>							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Emisión al aire	3.56E-03	kg	5.45E-03	DALY/kg	1.94E-05	DALY
Metano (CH ₄)	Emisión al aire	1.05E-05	kg	4.40E-06	DALY/kg	4.62E-11	DALY
					Subtotal	1.94E-05	DALY
<i>Daños a la salud humana/ Sustancias cancerígenas</i>							

Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Benceno	Emisión al aire	7.16E-08	kg	2.50E-06	DALY/kg	1.79E-13	DALY
HAP, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Emisión al aire	7.65E-10	kg	0.00017	DALY/kg	1.30E-13	DALY
Benceno	Emisión al agua	1.20E-09	kg	4.12E-06	DALY/kg	4.92E-15	DALY
					Subtotal	3.14E-13	DALY
Daños a la salud humana/ Sustancias inorgánicas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Emisión al aire	8.54E-05	kg	8.87E-05	DALY/kg	7.57E-09	DALY
Partículas <2.5 µm	Emisión al aire	1.63E-06	kg	0.0007	DALY/kg	1.14E-09	DALY
Dióxido de azufre (SO ₂)	Emisión al aire	5.75E-06	kg	5.46E-05	DALY/kg	3.14E-10	DALY
					Subtotal	9.03E-09	DALY
Daños a la salud humana/ Sustancias orgánicas							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
NM VOC, compuestos orgánicos volátiles no metálicos	Emisión al aire	2.68E-06	kg	1.28E-06	DALY/kg	3.43E-12	DALY
Propano	Emisión al aire	7.64E-07	kg	3.83E-07	DALY/kg	2.93E-13	DALY
Metano	Emisión al aire	1.61E-05	kg	1.28E-08	DALY/kg	2.06E-13	DALY
Etano	Emisión al aire	6.75E-07	kg	2.64E-07	DALY/kg	1.78E-13	DALY
Butano	Emisión al aire	2.20E-07	kg	7.57E-07	DALY/kg	1.67E-13	DALY
Pentano	Emisión al aire	1.10E-07	kg	8.51E-07	DALY/kg	9.36E-14	DALY
					Subtotal	4.37E-12	DALY
Daños a la salud humana/ Radiación							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Carbono-14	Emisión al aire	3.10E-05	kBq	2.10E-07	DALY/kBq	6.51E-12	DALY
Cesio-137	Emisión al agua	1.44E-05	kBq	1.70E-07	DALY/kBq	2.44E-12	DALY
Radón-222	Emisión al aire	0.01664	kBq	2.40E-11	DALY/kBq	3.99E-13	DALY
Cobalto-60	Emisión al agua	6.66E-06	kBq	4.40E-08	DALY/kBq	2.93E-13	DALY
Cesio 134	Emisión al agua	1.55E-06	kBq	1.40E-07	DALY/kBq	2.17E-13	DALY
Criptón-85	Emisión al aire	1.14184	kBq	1.40E-13	DALY/kBq	1.60E-13	DALY
					Subtotal	1.00E-11	DALY
Daños a la salud humana/ Agotamiento de la capa de ozono							
Nombre	Categoría	Resultado de inventario	Unidad	Factor de impacto	Unidad	Resultado de impacto	Unidad
Metano, triclorofluoro, CFC-11	Emisión al aire	1.02E-11	kg	0.00105	DALY/kg	1.07E-14	DALY

Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Emisión al aire	1.05E-11	kg	0.00089	DALY/kg	9.38E-15	DALY
Metano, diclorodifluoro, CFC-12	Emisión al aire	2.20E-12	kg	0.00086	DALY/kg	1.90E-15	DALY
					Subtotal	2.20E-14	DALY
Total de categoría de daños a la salud humana						1.94E-05	DALY

Anexo H. Factores de caracterización de las categorías de impacto ambiental de la metodología Ecoindicador 99

Tabla 1. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de ecotoxicidad.
Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Ecotoxicidad (PDF·m ² ·Año/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Arsénico, ion	Aire	592
	Suelo	610
	Agua	11.4
Cadmio, ion	Aire	9650
	Suelo/ Agrícola	30.1
	Suelo/ Industrial	9940
	Agua	480
Cromo, ion	Suelo/ Industrial	4240
Plomo	Aire	2540
	Suelo/ Industrial	12.9
	Agua	7.39
Níquel, ion	Aire	7100
	Suelo/ Industrial	7320
	Agua	143

Tabla 2. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría acidificación-eutrofización. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Acidificación-eutrofización (PDF·m ² ·Año/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Amoníaco	Aire	15.57
Dióxido de nitrógeno		5.713
Monóxido de nitrógeno		8.789
Oxido de nitrógeno		5.713
Dióxido de azufre		1.041
Trióxido de azufre		0.8323

Tabla 3. Factores de caracterización de la categoría uso del terreno. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Uso del terreno (PDF·m ² ·Año/ m ² ·a)		
Flujo	Recurso	Factor
Uso del suelo II-III		0.51
Uso del suelo II-IV		0.96
Uso del suelo III-IV		0.96
Ocupación, cultivable, labranza		1.15

convencional o integrada	Tierra	
Ocupación, cultivable, orgánica		1.09
Ocupación, bosque		0.11
Ocupación, área industrial		0.84
Ocupación, pastos y prados, extensa		1.02
Ocupación, pastos y prados, intensiva		1.13
Ocupación, pastos y prados, orgánica		1.02
Ocupación, área de tráfico, terraplén del ferrocarril		0.84
Ocupación, urbana, construida continuamente		1.15
Ocupación, urbana, construida de forma discontinua		0.96
Ocupación, urbana, áreas urbanas		0.84

Tabla 4. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de combustibles fósiles. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Combustibles fósiles (MJ excedentes/m ³ o kg)		
Sustancia	Recurso	Factor
Gas natural, en suelo (m ³)	Tierra	5.49
Carbón (kg)		0.252
Petróleo (kg)		5.9

Tabla 5. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de minerales. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Minerales (MJ excedentes/kg)		
Sustancia	Recurso	Factor
Aluminio	Tierra/No especificado	2.38
Cromo		0.9165
Mercurio		165.5
Níquel		16.32
Zinc		1.885

Tabla 6. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de sustancias cancerígenas. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Sustancias cancerígenas (DALY/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Arsénico, ion	Aire	0.0246
	Suelo	0.0132
	Agua	0.0657
Cadmio, ion	Aire	0.135

	Suelo	0.00398
	Agua	0.0712
Níquel, ion	Aire	0.0235
	Suelo	0.00394
	Agua	0.0311
Óxido de propileno	Aire	1.17×10^{-5}
	Suelo	1.17×10^{-5}
	Agua	1.17×10^{-5}
Estireno	Aire	2.44×10^{-8}
	Suelo	2.09×10^{-8}
	Aire	1.22×10^{-6}

Tabla 7. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de sustancias orgánicas. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Sustancias orgánicas (DALY/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
1-Buteno	Aire	2.3×10^{-6}
Ácido acético		2.13×10^{-7}
Benceno		4.68×10^{-7}
Cloroformo		4.94×10^{-8}
Etanol		8.34×10^{-7}
Propano		3.83×10^{-7}

Tabla 8. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de sustancias inorgánicas. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Sustancias inorgánicas (DALY/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Metano, fósil	Aire	3.32×10^{-4}
Dióxido de nitrógeno		8.87×10^{-5}
Monóxido de nitrógeno		1.37×10^{-4}
Dióxido de azufre		5.46×10^{-5}
Partículas <10 µm		3.75×10^{-4}
Partículas < 2.5 µm		7.00×10^{-4}

Tabla 9. Factores de caracterización de algunas sustancias de la categoría de cambio climático. Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Cambio climático (DALY/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Dióxido de carbono		2.10×10^{-7}
Dióxido de carbono/ fósil		0.005454
Dióxido de carbono,		0.005454

transformación de la tierra	Aire	
Monóxido de dinitrógeno		6.90×10^{-5}
Metano		4.40×10^{-6}
Metano, fósil		0.11429
Hexafluoruro de azufre		0.0053

Tabla 10. Factores de caracterización algunas sustancias de la categoría de cambio radiación.
Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Radiación (DALY/kBq kilobecquerel)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Antimonio-124	Agua	8.2×10^{-10}
Carbón	Aire	2.1×10^{-7}
Cesio-134	Aire	1.2×10^{-8}
	Agua	1.4×10^{-7}
Cesio-137	Aire	1.3×10^{-8}
	Agua	1.7×10^{-7}
Cobalto-58	Aire	4.3×10^{-10}
	Agua	4.1×10^{-11}
Cobalto-60	Aire	1.6×10^{-8}
	Agua	4.4×10^{-8}
Hidrogeno-3 (Tritio)	Aire	1.4×10^{-11}
	Agua	4.5×10^{-13}
Radio-226	Aire	9.1×10^{-10}
	Agua	1.3×10^{-10}
Uranio-234	Aire	9.7×10^{-8}
	Agua	2.4×10^{-9}
Uranio-235	Aire	2.1×10^{-8}
	Agua	2.3×10^{-9}
Uranio-238	Aire	8.2×10^{-9}
	Agua	2.3×10^{-9}

Tabla 11. Factores de caracterización algunas sustancias de la categoría de capa de ozono.
Fuente: Goedkoop & Spriensma, 2001.

Capa de ozono (DALY/kg)		
Sustancia	Tipo de emisión	Factor
Etano, 1,2 dibromotetrafluoro	Aire	0.00737
Metano, bromoclorodifluoro		0.00537
Metano, dibromodifluoro		0.00132
Metano, tetracloro		0.00126
Metano, bromotrifluoro		0.0126