



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS
RECURSOS NATURALES**

**EMISIONES DE CO₂ Y SUSTENTABILIDAD EN
LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE
AZÚCAR EN MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE
LOS RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

ARELLANO LÓPEZ ALICIA

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: ABEL PÉREZ ZAMORANO, DR.

CRISTÓBAL M. CUEVAS ALVARADO, DR.

Chapingo, México, diciembre 2017



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

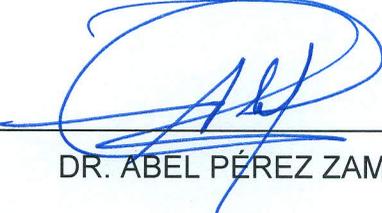


**EMISIONES DE CO₂ Y SUSTENTABILIDAD EN LA AGROINDUSTRIA DE LA
CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO**

Tesis realizada por ALICIA ARELLANO LÓPEZ bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales

DIRECTOR _____


DR. ABEL PÉREZ ZAMORANO

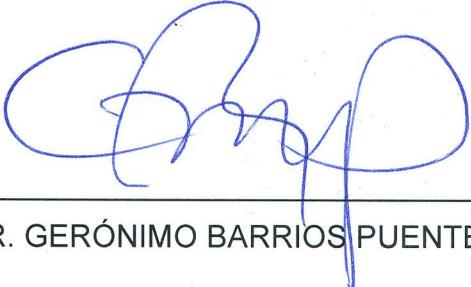
CODIRECTOR _____


DR. CRISTÓBAL MARTÍN CUEVAS ALVARADO

ASESOR _____


DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR _____


DR. GERÓNIMO BARRIOS PUENTE

Chapingo, México, diciembre de 2017

AGRADECIMIENTOS

***Al Consejo Nacional de
Ciencia y Tecnología
(CONACYT)***

Por el apoyo económico otorgado para la realización y culminación de mis estudios de posgrado.

***A la Universidad Autónoma
Chapingo y a la División de
Ciencias Económico-
Administrativas (DICEA)***

Por permitir desarrollarme como profesionista dentro de sus instalaciones.

***Al Dr. Abel Pérez
Zamorano***

Por transmitirme su vocación y disciplina en la realización de este trabajo de investigación.

***Al Dr. Ramón Valdivia
Alcalá***

Por sus sabios y atinados consejos en mi estancia en el posgrado, quien con su conocimiento y su guía fue una pieza clave para que pudiera desarrollar cada etapa de esta investigación.

***Al Dr. Gerónimo Barrios
Puente***

Por su apoyo incondicional y amigo entrañable durante mi estancia en la DICEA, por su gran corazón, pasión y entrega para transmitir conocimientos.

***Al Dr. Cristóbal Martín
Cuevas Alvarado***

Por su apoyo, confianza y paciencia en la realización de este trabajo de investigación.

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mis padres y hermanos:

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis tíos Maximino López y Leticia Pineda:

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis amigos Helí Andrade, José Mis, Flavio Lara, Iraís López e Isauro Nava:

Quienes a través del tiempo fuimos fortaleciendo una amistad y creando una familia, muchas gracias por toda su colaboración, por convivir todo este tiempo conmigo, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, llantos, tristezas, peleas, celebraciones y múltiples factores que ayudaron a que hoy seamos como una familia.

DATOS BIOGRÁFICOS

ALICIA ARELLANO LÓPEZ (1992 -)



Nació en el municipio de Texcoco, Estado de México, el 23 de junio de 1992. Novena hija de José Luis Arellano y Celia López. Desde los seis años de edad hasta los 17 se crió con sus tíos Maximino López y Leticia Pineda, en la localidad de la Resurrección.

En el periodo 1998-2004 estudió en la escuela primaria Profr. “Justo Sierra”, posteriormente ingresó a la Escuela Secundaria Of. No. 538 “Nezahualpilli”. En el año 2007, fue aceptada para estudiar en una de las mejores escuelas de agronomía de Latinoamérica, la Universidad Autónoma Chapingo en donde terminó satisfactoriamente la preparatoria agrícola para posteriormente continuar sus estudios en la División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA) y en 2014 recibir el título por mérito académico de Licenciado en Economía Agrícola.

Al salir de la universidad colaboró un año como docente en la Escuela Normal Particular Ignacio Manuel Altamirano, asimismo se le asignó el cargo de Jefa del Departamento de Vinculación y Extensión Normalista de la misma institución, responsabilidades que tuvo que abandonar para seguir con sus estudios de posgrado. De agosto de 2015 a julio de 2017, realizó sus estudios en la Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, en la Universidad Autónoma Chapingo.

CONTENIDO GENERAL

RESUMEN/ABSTRACT	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. General.....	5
1.2.2. Específicos	5
1.3. Hipótesis.....	6
CAPITULO II. INDUSTRIALIZACIÓN DEL AZÚCAR Y NECESIDADES ENERGÉTICAS 7	
2.1. Descripción básica del proceso agroindustrial de la caña de azúcar	7
2.1.1. Preparación de la caña de azúcar como materia prima	8
2.1.2. Molienda o extracción de jugo.....	10
2.1.3. Clarificación o purificación del guarapo	10
2.1.4. Evaporación.....	11
2.1.5. Cristalización	12
2.1.6. Centrifugación	12
2.1.7. Secado y enfriado	13
2.1.8. Envasado.....	13
2.2. Consumo de energía en la industria del azúcar.....	14
2.2.1. Fuentes de energía	15
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO	17
3.1. Cambio climático	19
3.1.1. Antecedentes.....	19
3.1.2. Definición.....	20
3.1.3. Efectos globales del cambio climático.	23
3.2. Efecto invernadero	26
3.3. Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	28
3.3.1. Dióxido de carbono	30
3.3.2. Metano.....	30
3.3.3. Óxido nitroso	31
3.3.4. Hidrofluorocarbono.....	31
3.3.5. Perfluorocarbono.....	32
3.3.6. Hexafluoruro de azufre.....	32
3.4. El ciclo del Carbono	32
3.5. Los sumideros de carbono	35
3.6. Consumo de energía y emisiones de CO ₂	36

3.6.1. Grado de emisión energética de CO ₂	36
3.6.2. Sustentabilidad y capacidad de carga optima de CO ₂	38
CAPITULO IV. MERCADO MUNDIAL Y NACIONAL DE LA INDUSTRIA AZUCARERA	41
.....	
4.1. Mercado internacional	42
4.1.1. Producción, consumo y comercio mundial de la caña de azúcar	42
4.1.2. Producción mundial de azúcar	45
4.1.3. Consumo mundial	47
4.1.4. Comercio internacional.....	50
4.1.5. Precios.....	51
4.2. Mercado nacional	52
4.2.1. Aspectos socioeconómicos de la industria azucarera	52
4.2.2. Producción nacional	53
4.2.3. Distribución de los ingenios azucareros.....	56
4.2.4. Consumo nacional.....	58
4.2.5. Intercambio comercial	59
4.2.6. Precios nacionales	60
CAPITULO V. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GLOBALES Y EN MÉXICO	61
.....	
5.1. Emisiones de GEI por sectores.....	63
5.2. Impactos y vulnerabilidad ante el cambio climático.....	64
VI. REVISIÓN DE LITERATURA	68
VII. METODOLOGÍA.....	71
7.1. Análisis de las variables	72
7.1.1. Calculo de las emisiones de CO ₂ por la quema de bagazo.....	72
7.1.2. Calculo de las emisiones de CO ₂ por el consumo de petróleo	72
7.1.3. Calculo de las emisiones de CO ₂ por el consumo de energía eléctrica	73
7.1.4. Emisiones totales de CO ₂ en la agroindustria de la caña de azúcar	73
7.1.5. Consumo total de energía utilizada en la agroindustria azucarera.....	74
7.2. Evaluación del nivel de sustentabilidad	74
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
.....	
8.1. Consumo de energía total y emisiones totales de CO ₂ por tonelada de azúcar producida ..	79
8.2. Evaluación de la sustentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar	80
CONCLUSIONES.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	84

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Diagrama del proceso de obtención de azúcar.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. Emisiones antropógenas anuales totales de GEI por gases, 1970-2010.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3. Cambios observados de la temperatura a nivel mundial.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4. Componentes del forzamiento radiativo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. El ciclo del carbono.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6. Distribución de la caña de azúcar en el mundo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 7. Ingenios azucareros de México, zafra 2015/16.....</i>	<i>56</i>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Efectos globales del cambio climático de acuerdo con el aumento de temperatura.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Características de los gases de efecto invernadero.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3. Producción, área cosechada y rendimiento mundial de la caña de azúcar.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4. Consumo de caña de azúcar (2014).....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 5. Exportaciones e importaciones de caña de azúcar (2014).....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 6. Producción de azúcar en México (zafra 2015/16).....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 7. Distribución de los ingenios azucareros (zafra 2015/16).....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 8. Impactos y vulnerabilidad ante el cambio climático.....</i>	<i>65</i>

INDICE DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Consumo total de energía de las principales ramas industriales en México.....</i>	<i>14</i>
<i>Gráfica 2. Estructura del consumo energético de las principales ramas industriales por tipo de energético, 2015.....</i>	<i>15</i>
<i>Gráfica 3. Principales países productores de caña de azúcar.....</i>	<i>43</i>
<i>Gráfica 4. Producción mundial de azúcar, 2004/05 - 2015/16.....</i>	<i>46</i>
<i>Gráfica 5. Principales países productores de azúcar 2014/15.....</i>	<i>46</i>
<i>Gráfica 6. Consumo mundial de azúcar, 2004/05 - 2015/16.....</i>	<i>48</i>
<i>Gráfica 7. Principales países consumidores de azúcar, 2014.....</i>	<i>48</i>

Gráfica 8. Consumo mundial per-capita de azúcar 2010-2014 (kg/persona).....	49
Gráfica 9. Consumo per-capita de azúcar 2014 (kg/persona).....	49
Gráfica 10. Principales países exportadores de azúcar, 2014/15.....	50
Gráfica 11. Principales países importadores de azúcar, 2014/15.....	51
Gráfica 12. Contrato de futuros #11. Precio del azúcar (US Cts/lb).....	52
Gráfica 13. Producción por tipo de azúcar en México, zafra 2005/06 - 2015/16.....	55
Gráfica 14. Consumo de edulcorantes en México, 2004/05 -2014/15.....	58
Gráfica 15. Precio del azúcar en el mercado nacional (pesos por tonelada).....	60
Gráfica 16. Total de emisiones de GEI a nivel mundial.....	61
Gráfica 17. Emisiones de GEI por tipo de gas en México.....	62
Gráfica 18. Emisiones por entidad federativa (millones de toneladas CO ₂).....	62
Gráfica 19. Participación de los sectores en las emisiones de GEI.....	64
Gráfica 20. Producción de azúcar base estándar, 1997/98 -2015/16.....	75
Gráfica 21. Consumo de bagazo en los ingenios azucareros, 1997/98 -2015/16.....	76
Gráfica 22. Consumo de petróleo en los ingenios azucareros, , 1997/98 -2015/16.....	77
Gráfica 23. Demanda de energía eléctrica de CFE de los ingenios azucareros, 1997/98 - 2015/16.....	78
Gráfica 24. Comportamiento de las emisiones de CO ₂	79

ANEXOS

Anexo 1. Emisiones totales de CO ₂ por tonelada de azúcar producida (kilogramos).....	88
Anexo 2. Consumo total de energía por tonelada de azúcar producida (megajoules).....	88
Anexo 3. Factores de emisión en la agroindustria de la caña de azúcar (kgCO ₂ /MJ).....	89
Anexo 4. Valores equivalentes de los factores de emisión (kg de CO ₂ por tonelada de azúcar).....	89
Anexo 5. Porcentaje de carbono que se queda en la atmósfera.....	90
Anexo 6. Carbono que se queda en la atmósfera (kg).....	90

SIGLAS Y ABREVIATURAS

BNE = Balance Nacional de Energía

CCO_{CO_2} = capacidad de carga óptima de CO_2

Cenicaña = Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

CFE = Comisión Federal de Electricidad

CH_4 = metano

CINU = Centro de Información de las Naciones Unidas

CMNUCC/ UNFCCC = Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO_2 = dióxido de carbono

CO_2 eq = dióxido de carbono equivalente

CO_2/MJ = dióxido de carbono por megajoule

CONADESUCA = Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

GEE_{CO_2} = grado de emisión energética de CO_2

GEI = Gases de Efecto Invernadero

Gg = Gigagramo, que equivale a mil toneladas

GtC = Gigatoneladas de carbono

$GtCO_2$ -eq/año = Gigatonelada de CO_2 -equivalente al año

HFC = hidrofluorocarbono

ICSU = Consejo Internacional de Uniones Científicas

INE = Instituto Nacional de Ecología

IPCC = Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

$kgCO_2/MJ$ = kilogramos de dióxido de carbono por megajoule

kW/h = Kilowatt-hora

Mdt = millones de toneladas

$MtCO_2$ eq = Millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente

N_2O = óxido nitroso

OMM = Organización Mundial de Meteorología

ONU = Organización de las Naciones Unidas

PCM = Presupuesto de Carbono Mundial

PFC = perfluorocarbono

PJ = Pentajoules

PNUMA = Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Ppb = partes por billón

Ppm= partes por millón

Ppmm = partes por mil millones

Ppmv = partes por millón en volumen

SAGARPA = Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

SCIANS = Sistema de Clasificación de Industrias de América del Norte

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SENER = Secretaría de Energía

SF₆ = hexafluoruro de azufre

Tg CO₂ eq = teragramo de CO₂ equivalente, que equivale a 1, 000, 000

UNC = Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR.

W/m² = watts por metro cuadrado

EMISIONES DE CO₂ Y SUSTENTABILIDAD EN LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO

CO₂ EMISSIONS AND SUSTAINABILITY IN THE SUGAR CANE INDUSTRY IN MEXICO

Alicia Arellano López¹ y Abel Pérez Zamorano²

RESUMEN

La industria de la caña de azúcar consume grandes cantidades de energía en el proceso de la obtención del azúcar. Esto provoca fuertes emisiones de Gases de Efecto Invernadero, en su mayoría de dióxido de carbono (CO₂), que se acumulan en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global o cambio climático, desafío que enfrenta hoy en día la humanidad. Ante ello, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar, a partir de la cuantificación de las emisiones de CO₂ de la molienda de la caña de azúcar, el nivel de sustentabilidad que tiene dicha industria en México, durante un periodo que abarca desde la zafra 1997/98 hasta la zafra 2015/16. Y así determinar el volumen de CO₂ que absorben los sumideros de carbono. Para ello, se utilizó la metodología de evaluación de sustentabilidad establecida por Morillón y Hernández (2011).

Los datos se obtuvieron de las estadísticas de la Unión Nacional de Cañeros y del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). Las variables utilizadas fueron: la producción de azúcar base estándar (t), bagazo utilizado como combustible (t), petróleo (l) y energía eléctrica de CFE (kW-h) demandada por los ingenios cañeros del país. Posteriormente, con los factores de emisión de CO₂ de cada fuente de energía se cuantificó el total de kilogramos de CO₂ emitidos a la atmósfera.

Los resultados de la investigación arrojaron que los estados de Sinaloa (2,689.4 kg de CO₂) y Campeche (2,457.6 kg de CO₂) tuvieron en promedio el mayor nivel de emisiones de CO₂ por tonelada de azúcar producida, mientras que Puebla (1,735.4 kg de CO₂) y Nayarit (1,756.1 kg de CO₂) registraron el menor nivel de emisiones. En cuanto al nivel de sustentabilidad de la producción de azúcar en los ingenios del país, se pudo observar que en ninguno de los 15 estados puede considerarse sustentable o amigable con el ambiente la industria del azúcar de caña debido a que alrededor del 70% de las emisiones de CO₂ que se generan en la producción de una tonelada de azúcar se quedan en la atmósfera (1,398.24 kg de CO₂) y se acumulan con las ya existentes, contribuyendo así al cambio climático.

Palabras clave: cambio climático, gases de efecto invernadero, sumideros de carbono e ingenios.

ABSTRACT

The sugar cane industry consumes large amounts of energy in the process of obtaining sugar. This causes strong emissions of greenhouse gases, mostly carbon dioxide (CO₂), which accumulate in the atmosphere and contribute to global warming or climate change, a challenge facing mankind today. In response, the main objective of this research was to evaluate, from the measurement of CO₂ emissions from the milling of sugar cane, the level of sustainability that this industry has in Mexico, for the period covering the 1997/98 to 2015/16 sugar harvests, and thus determine the volume of CO₂ absorbed by carbon sinks. For this purpose, the sustainability assessment methodology established by Morillón and Hernández (2011) was used.

The data were obtained from statistics collected by the National Union of Sugarcane Producers and the National Committee for Sustainable Development of Sugarcane (CONADESUCA). The variables used were: sugar production (t), bagasse production (t), oil consumption (l) and power consumption (kW-h) demanded by the sugarcane mills in the country. Later, with the CO₂ emission factors for each energy source the total kilograms of CO₂ emitted into the atmosphere were quantified.

The research results showed that the states of Sinaloa (2689.4 kg of CO₂) and Campeche (2457.6 kg of CO₂) had on average the highest level of CO₂ emissions per ton of sugar produced, while Puebla (1735.4 kg of CO₂) and Nayarit (1756.1 kg of CO₂) recorded the lowest level of emissions. Regarding the level of sustainability of sugar production in the sugar mills of the country, it was observed that in none of the 15 states can the sugar cane industry be considered sustainable or environmentally friendly because about 70% of the CO₂ emissions generated in the production of a ton of sugar remain in the atmosphere (1398.24 kg of CO₂) and accumulate with the CO₂ already existing there, thereby contributing to climate change.

Keywords: climate change, greenhouse gases, carbon sinks and sugar mills.

¹ Tesista

² Director

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad es el cambio climático, el cual se relaciona con el calentamiento del planeta por la elevada concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y otros gases, conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI), principalmente por el uso de combustibles fósiles para las actividades humanas, los cambios en el uso de suelo y la deforestación. La Organización de las Naciones Unidas, dentro de sus objetivos de desarrollo sostenible, muestra su preocupación por adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y poder aminorar las consecuencias de éste (ONU, 2017).

El uso de combustibles fósiles genera emisiones de gases a la atmósfera identificados como los causantes del cambio climático, dentro de ellos el principal GEI de origen antropogénico es el CO₂ que contribuye con alrededor del 78% del total de las emisiones de GEI (IPCC, 2014). No obstante, el progreso que ha traído consigo la utilización de combustibles fósiles para producir energía ha venido acompañado de impactos negativos para el ambiente.

El CO₂ ha sido desechado por el hombre a la atmósfera con mayor velocidad de la que los sumideros de carbono de la Tierra necesitan para eliminarlo, esto implica que se ha excedido la capacidad de absorción y almacenamiento del océano y biosfera terrestre (capacidad de carga de los sumideros de carbono) y ha alterado su funcionamiento. Los inventarios de Carbono Mundial de las últimas décadas, muestra que la cantidad de CO₂ que emite el hombre a la atmósfera rebasa la capacidad de carga de los sumideros de carbono, lo cual está contribuyendo al calentamiento de la Tierra (IPCC, 2007).

México en 1992 se unió a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), comprometiéndose a trabajar, junto con otros países, para estabilizar los GEI. Sin embargo, durante la década de los 90 del siglo pasado, la mitigación y adaptación no fueron prioridad de la agenda de

gobierno. Fue hasta principios del siglo XXI cuando el Gobierno Federal definió como uno de sus objetivos más importantes la reducción de emisiones de GEI en 50.7 MtCO₂ eq. para el 2050. Para cumplirlo, en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2007-2012 se definió por primera vez como prioridad el combate a este fenómeno (Sosa, 2015).

En este sentido, resulta importante analizar la agroindustria de la caña de azúcar debido a que contribuye a las emisiones de GEI, en especial en el proceso de obtención del azúcar en donde se consumen grandes cantidades de energía. Cabe señalar que la agroindustria azucarera en México es una de las más intensivas en el consumo de energía, durante el año 2015 consumió 105.64 Petajoules (SENER, 2015), siendo la tercer rama industrial con mayor consumo energético en el país. Las fuentes de energía que utiliza el sector azucarero para abastecer sus necesidades energéticas son: 1) el bagazo, subproducto de la molienda de caña de azúcar, 2) petróleo o combustóleo y 3) energía eléctrica.

Debido a ello, al cuantificar la cantidad de CO₂, generado en el proceso agroindustrial de la caña de azúcar, en específico en la producción y obtención de azúcar en México, contemplando las zafra 1997/1998 a la zafra 2015/2016 se puede evaluar el nivel de sustentabilidad del sector y posteriormente poder tomar medidas de mitigación de GEI a futuro.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad es el cambio climático, el cual está relacionado directamente con el calentamiento del planeta por la elevada concentración atmosférica de los llamados Gases de Efecto Invernadero (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6)), debido al uso de combustibles fósiles para las actividades humanas, los cambios en el uso de suelo y la deforestación. La variabilidad climática se ha convertido en un desafío de gran preocupación por su impacto económico, social y ambiental.

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático afirma que “la influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia” (IPCC, 2014), dentro de estos gases el CO_2 , procedente de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales, es el de mayor importancia puesto que contribuye alrededor del 80% del aumento total de emisiones de GEI.

Ante tal hecho, resulta preocupante analizar la agroindustria de la caña de azúcar, en específico en el proceso de fabricación del azúcar, ya que en esta etapa se consumen grandes cantidades de energía. Dentro de las fuentes de energía que utiliza la agroindustria cañera para la obtención del azúcar se encuentra el bagazo, el combustóleo y la energía eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Esta industria al consumir una gran cantidad de energía es también una de las más contaminantes por la cantidad de emisiones de GEI que arroja a la atmósfera, en particular de CO_2 . Sin embargo, no basta con saber si es una agroindustria emisora de GEI sino que es necesario analizar el impacto que tiene en el ambiente, lo cual puede lograrse a través del nivel de sustentabilidad, el cual puede definirse como “el nivel de impacto sobre el ambiente que realiza una actividad respecto del límite que tiene el planeta para soportarlo (capacidad de carga)” (Morillón y Hernández, 2011).

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Calcular la cantidad del Gas de Efecto Invernadero dióxido de carbono (CO₂), generado en el proceso agroindustrial de transformación de la caña de azúcar en México desde la zafra de 1997/1998 a la zafra 2015/2016 y con ello evaluar la sustentabilidad del sector azucarero para poder tomar medidas de mitigación a futuro.

1.2.2. Específicos

-  Estimar la emisión total de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de azúcar producida que se genera en cada uno de los estados productores para las zafras de 1997/1998 a la zafra 2015/2016.
-  Determinar el consumo total de energía que demanda la agroindustria azucarera tanto de bagazo de caña, como de petróleo y de energía eléctrica proveniente de la Comisión Federal de Electricidad.
-  Evaluar la sustentabilidad del sector azucarero del país
-  Precisar el volumen de CO₂ que es fijado en los sumideros de carbono así como también el volumen que permanece libre en la atmósfera.

1.3. Hipótesis

- Los estados con mayores emisiones de dióxido de carbono (CO₂), son aquellos que tienen las cifras más altas en producción de azúcar, tal es el caso de Veracruz, San Luis Potosí y Jalisco.
- En el proceso de molienda de la caña de azúcar los ingenios azucareros mexicanos consumen en mayor cantidad bagazo de caña como fuente de energía, responsable de la mayor cantidad de emisiones de CO₂, lo cual influye para que la agroindustria de la caña rebase el límite de capacidad de carga (0.02918 kgCO₂/MJ) que tienen los sumideros de carbono.
- Al rebasar el límite de capacidad de carga de los sumideros de carbono, la agroindustria azucarera se considera no sustentable.
- Durante el periodo de análisis el volumen de carbono, originado por la agroindustria de la caña de azúcar, que queda libre en la atmósfera es mayor en comparación con el absorbido por los sumideros de carbono del planeta.

CAPITULO II. INDUSTRIALIZACIÓN DEL AZÚCAR Y NECESIDADES ENERGÉTICAS

El azúcar se define como un producto sólido obtenido por la cristalización de la sacarosa contenida en los jugos de determinadas especies vegetales mediante procesos industriales apropiados y específicos. Su producción a partir de la caña de azúcar es un proceso consolidado y estable, cuyas variaciones son mínimas y ocurren en las etapas finales, dependiendo del grado de refinación deseado (Suárez, 2012, p.7). El azúcar es un producto básico, esencial y necesario en la dieta alimenticia y constituye la materia prima para numerosas industrias, tales como confiterías, panaderías, bebidas no alcohólicas y alcohólicas.

Los procesos de producción del azúcar se diferencian entre sí según el tipo de azúcar que se desee obtener. Actualmente se comercializan principalmente dos tipos de azúcar en el mundo: azúcar estándar y azúcar refinado; en México a nivel comercial se produce azúcar estándar, refinada, blanco especial y mascabado. La diferencia entre estos productos radica principalmente en la pureza (contenido de sacarosa) y el color, los ingenios azucareros mexicanos producen en su mayoría azúcar estándar (Rojas, 2014, p.37).

2.1. Descripción básica del proceso agroindustrial de la caña de azúcar

De acuerdo a los autores Díaz, Espinosa y Mondragón, se entiende como sistema agroindustrial:

El 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. Se trata de la especialización productiva de la agroindustria por línea de producto(s) y su unidad termina al llegar su producción a los consumidores o a formar

parte de otro sistema no agroindustrial. (Díaz, Espinosa y Mondragón, 1955)

Así, el sistema agroindustrial del azúcar se compone de cuatro etapas secuenciadas: la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); su abastecimiento al ingenio; la agroindustria o transformación industrial; y la comercialización del azúcar, subproductos (bagazo, melaza, cachaza, ceniza, residuo de batey) y derivados (Díaz, 1989).

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se describe, en términos generales, los pasos de la etapa específica de agroindustria o transformación industrial de la caña de azúcar para producir azúcar estándar. Ver *figura 1*.

2.1.1. Preparación de la caña de azúcar como materia prima

El proceso inicia con el peso en básculas de las unidades que transportan la caña de azúcar en el ingenio y que se encuentran al ingreso del área industrial. Además en esta parte se determina la calidad de la materia prima, tomando muestras que se analizan continuamente en el laboratorio de control de calidad. La caña que llega a la fábrica se descarga sobre las mesas de alimentación. Para tener un proceso más limpio, en las mesas de caña se aplica agua entre 110 y 120 °F para lavado, eliminando así sólidos o materia extraña como la tierra, sales, minerales, piedras y otros que se adhieren a ella en el campo durante el alce a las jaulas que la transportan hacia la fábrica.

Luego la caña se somete a un proceso de preparación que consiste en romper y desfibrar las celdas de los tallos por medio de troceadoras, picadoras oscilantes y desfibradoras, para poder pasar al proceso de extracción del jugo.

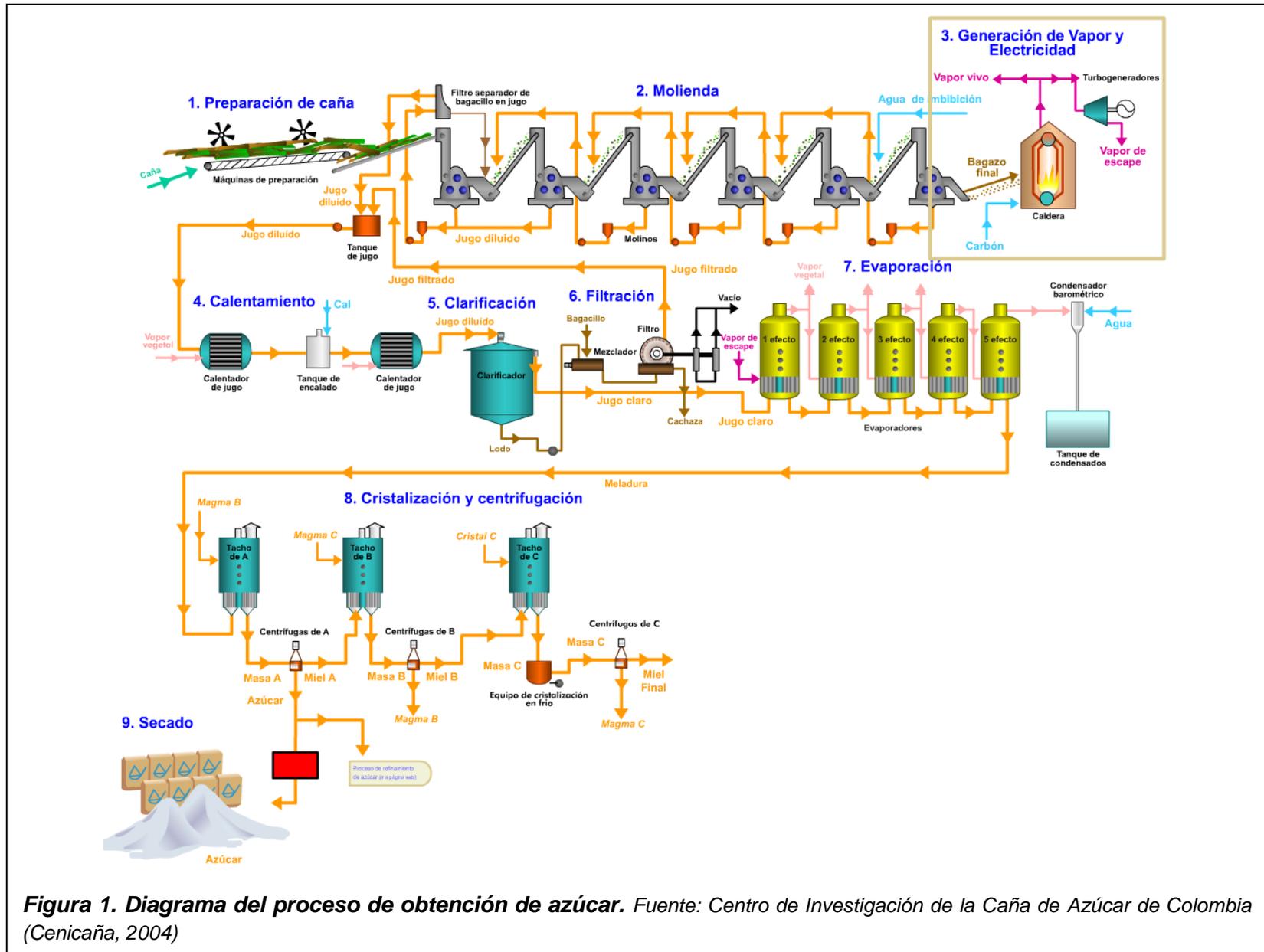


Figura 1. Diagrama del proceso de obtención de azúcar. Fuente: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña, 2004)

2.1.2. Molienda o extracción de jugo

En esta fase del proceso, el material que pasa por la desfibradora se conduce hacia los molinos en donde se exprime la caña para extraer la sacarosa.

Los molinos consisten en unidades múltiples de rodillos ranurados, llamados mazas, entre los cuales se comprime sucesivamente la caña para extraer la mayor cantidad posible de jugo.

Con el objeto de propiciar una mayor extracción de jugo, mediante lixiviación, el colchón de bagazo se rocía con agua caliente o guarapo (jugo extraído de la caña de azúcar) diluido, comenzando en orden regresivo por la última unidad moledora. Este proceso se conoce como imbibición. La imbibición del último y penúltimo molino se realiza con agua; el jugo extraído se utiliza para imbibir los molinos anteriores. La temperatura caliente facilita la lixiviación de azúcar.

En las prácticas de molienda más eficientes, más del 95% del azúcar contenido en la caña pasa al guarapo; este porcentaje se conoce como la extracción de sacarosa (Pol de la extracción).

El jugo que se envía al proceso subsecuente es el extraído de los dos primeros molinos, conocido como jugo mezclado o guarapo. Éste es ácido, turbio, de color verde oscuro a café claro. El jugo se pesa en una báscula automática para dosificar un pre alcalinizador.

El bagazo que sale del último molino aún contiene azúcar que no fue posible extraer, fibra leñosa y de un 45% a 55% de agua, este subproducto industrial se transporta hacia el sistema de calderas para usarlo en calidad de biomasa como combustible.

2.1.3. Clarificación o purificación del guarapo

El objetivo de la etapa de clarificación es eliminar la mayor cantidad de impurezas, solubles e insolubles, presentes en el guarapo (bagacillo, sales, coloides, y material en suspensión), conservando la mayor cantidad de sacarosa y entregando el jugo a la etapa de evaporación en condiciones óptimas de acidez

(ph), turbidez, color y temperatura. Para ello se emplean coladores vibratorios que reducen el bagacillo a aproximadamente 0.5 g/l de jugo, asimismo, el jugo de la caña se mezcla con hidróxido de calcio y ácido fosfórico. Este proceso se llama encalado, que precipita sales insolubles y fosfato de calcio.

La forma más apropiada de conseguir el objetivo es por calentamiento, con posterior decantación en donde el jugo clarificado es canalizado hacia un tanque receptor, y finalmente se realiza una filtración. El residual obtenido de la decantación se denomina cachaza, ésta aún contiene sacarosa por lo que se reprocesa para extraérsela.

Lo anterior se efectúa con ayuda de bagacillo (bagazo fino), que se recupera de tamices ubicados en el conductor elevado del bagazo. La cachaza se mezcla con el bagacillo, se filtra y lava con agua en el tambor rotatorio al vacío y a presión constante. Este jugo se devuelve al tanque de guarapo y la cachaza se desecha.

2.1.4. Evaporación

El jugo clarificado contenido en el tanque receptor, con aproximadamente 85% de agua, se bombea hacia los evaporadores de múltiple efecto al vacío, éstos consisten en una sucesión de celdas de ebullición al vacío dispuestas en serie de manera que cada cuerpo o celda subsiguiente tenga un grado de vacío mayor, lo que hace que el jugo contenido en dicho cuerpo hierva a menor temperatura. Se le llama de múltiple efecto porque el vapor de escape introducido en la primera celda hace la evaporación de las demás a través del vapor vegetal generado por los mismos evaporadores.

El vapor que sale del último cuerpo se dirige a un condensador barométrico, mientras que, de esta misma celda se obtiene el jarabe o meladura con aproximadamente 65% de sólidos y 35% de agua. Este jarabe puede volverse a clarificar, añadiendo cal y ácido fosfórico y aereándolo junto con la adición de un polímero floculante

El parámetro más importante en esta etapa es la temperatura que no debe sobrepasar los 110°C para que las pérdidas de sacarosa no superen el 0.1%.

2.1.5. Cristalización

La cristalización es el proceso en el cual se forman los cristales de sacarosa que contiene la meladura, se lleva a cabo en equipos denominados tachos que son evaporadores al vacío de simple efecto, donde el jarabe se evapora hasta saturarse de azúcar. Es decir, la meladura pasa a los tachos donde continúa la evaporación de agua, lo que ocasiona la cristalización del azúcar.

Para llevar a cabo dicha cristalización se añade al tacho granos microscópicos de azúcar, denominados semillas, conforme se evapora el agua se va añadiendo más jarabe. El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho, cuando este está totalmente lleno todos los cristales tienen el tamaño deseado y se forma una masa de cristales y jarabes conocida como masa cocida o templa, la cual se descarga por medio de una válvula de pie a un mezclador o cristizador separado. La ebullición de esta masa cocida y la re-ebullición de las mieles se llevan a cabo utilizando equipos seleccionados para ajustarse a diferentes condiciones de operación (centrifugas de alta velocidad).

2.1.6. Centrifugación

En los tachos se obtiene una masa, denominada masa cocida o templa, que es una mezcla de cristales de azúcar cruda y miel. Los cristales del azúcar se separan de la miel restante en la centrifugas, equipos cilíndricos que giran a gran velocidad. La miel pasa a través de las telas, los cristales quedan atrapados dentro de las centrifugas y luego se lavan con agua; sin embargo, las mieles vuelven a los tachos, mientras que el azúcar pasa al proceso de secado y enfriado.

Las mieles o melazas finales, un material denso y viscoso con aproximadamente una tercer parte de sacarosa, una quinta parte de azúcares reductores y el resto

de ceniza, sirve como base para la alimentación del ganado, fabricación de alcohol industrial, producción de levadura, etanol y otros.

2.1.7. Secado y enfriado

En el proceso de centrifugado se utiliza agua de condensado para lavar el azúcar, lo cual da como resultado humedades entre 0.3 % y 0.6%, por lo que es necesario pasarla por un proceso de secado para alcanzar niveles entre 0.2% para azúcar crudo y 0.03% para azúcares blancos.

El azúcar se seca mediante un equipo rotatorio, con el que se reduce su contenido de humedad hasta un 0.045%. Para ello, se hace pasar una corriente de aire a 120°C a través del granulador o secador. El aire se calienta en radiadores, por medio de vapor sobrecalentado. Al mismo tiempo, se extrae, atrapa y descarga el polvillo de azúcar.

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 hasta que el producto sale con un 0.02% o menos. 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.

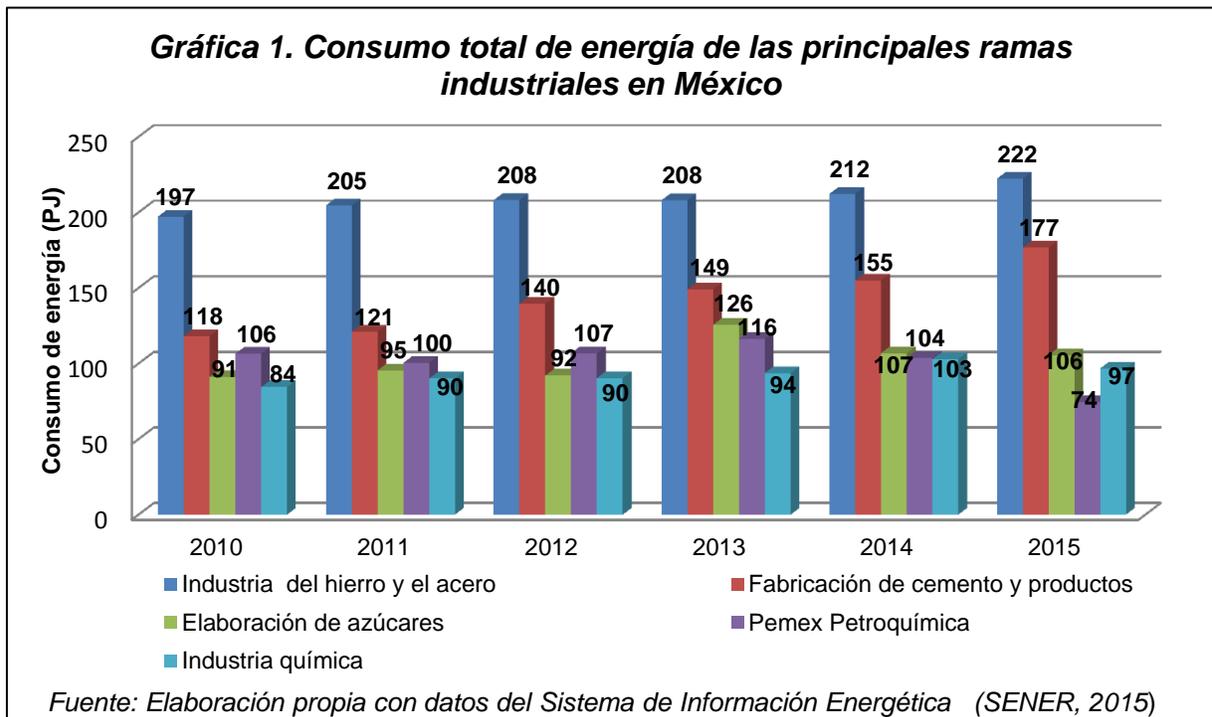
2.1.8. Envasado

El azúcar seca y fría que sale del secador se transporta mediante una banda transportadora de hule hacia la tolva recolectora donde se envasa, ya sea a granel o en paquetes.

2.2. Consumo de energía en la industria del azúcar

El Balance Nacional de Energía (SENER, 2015) para dar a conocer el consumo energético de las diferentes ramas industriales las cataloga de acuerdo al Sistema de Clasificación de Industrias de América del Norte (SCIAN). La rama 31131 denominada “Elaboración de azúcares” es la que contiene la información del consumo de energía anual de la industria azucarera en México; sin embargo, para realizar un correcto balance de la energía consumida dentro de esta industria es importante considerar la cantidad de energía generada del bagazo registrada en las estadísticas de la “Energía primaria a transformar” en específico la del rubro “Centrales eléctricas de autogeneración” como consumo energético final, propio de la rama industrial azucarera, ya que es utilizado para el autoabastecimiento de electricidad de los ingenios.

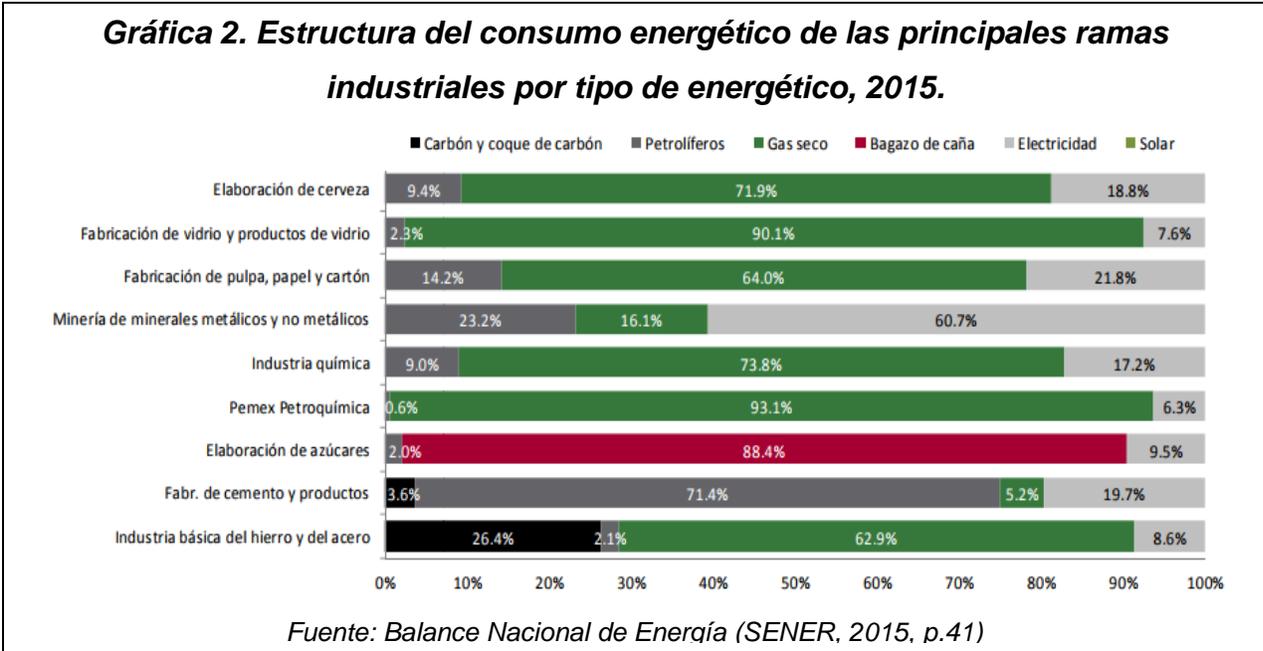
Considerando lo anterior y con la finalidad de obtener un mejor balance de energía de la industria del azúcar, al consumo de energía de la elaboración de azucares se le sumó la cantidad de energía obtenida del bagazo dentro de las centrales eléctricas de autogeneración ambos reportados en el Balance Nacional de Energía (SENER, 2015).



Como se observa en la *Gráfica 1* dentro del sector industrial, la industria azucarera se identifica como una de las más consumidoras de energía, en 2015 la industria del azúcar consumió 105.64 Pentajoules (PJ) (SENER, 2015), mientras que las dos industrias de mayor consumo fueron: la industria del hierro y el acero con un consumo de 222.34 PJ y la industria cementera con 176.76 PJ; por otro lado, la industria química y la petroquímica registraron un menor consumo de 96.75 y 74.41PJ, respectivamente. Aunque la SENER lleva la estadística en años calendario, a diferencia de las organizaciones industriales azucareras que lo hacen por periodo de zafra, no queda duda de que la industria del azúcar consume una gran cantidad de energía.

2.2.1. Fuentes de energía

El suministro de la energía en los ingenios azucareros se realiza con una planta de cogeneración de energía, en la que se utilizan el bagazo y el combustóleo como combustible en las calderas, posteriormente con el calor generado se produce vapor y a partir de éste se obtiene una cantidad de energía térmica, mecánica y eléctrica de autoconsumo para los equipos de la instalación (Rojas, 2014, p.44); sin embargo, el consumo eléctrico de los ingenios también se compone de la compra de electricidad a CFE.

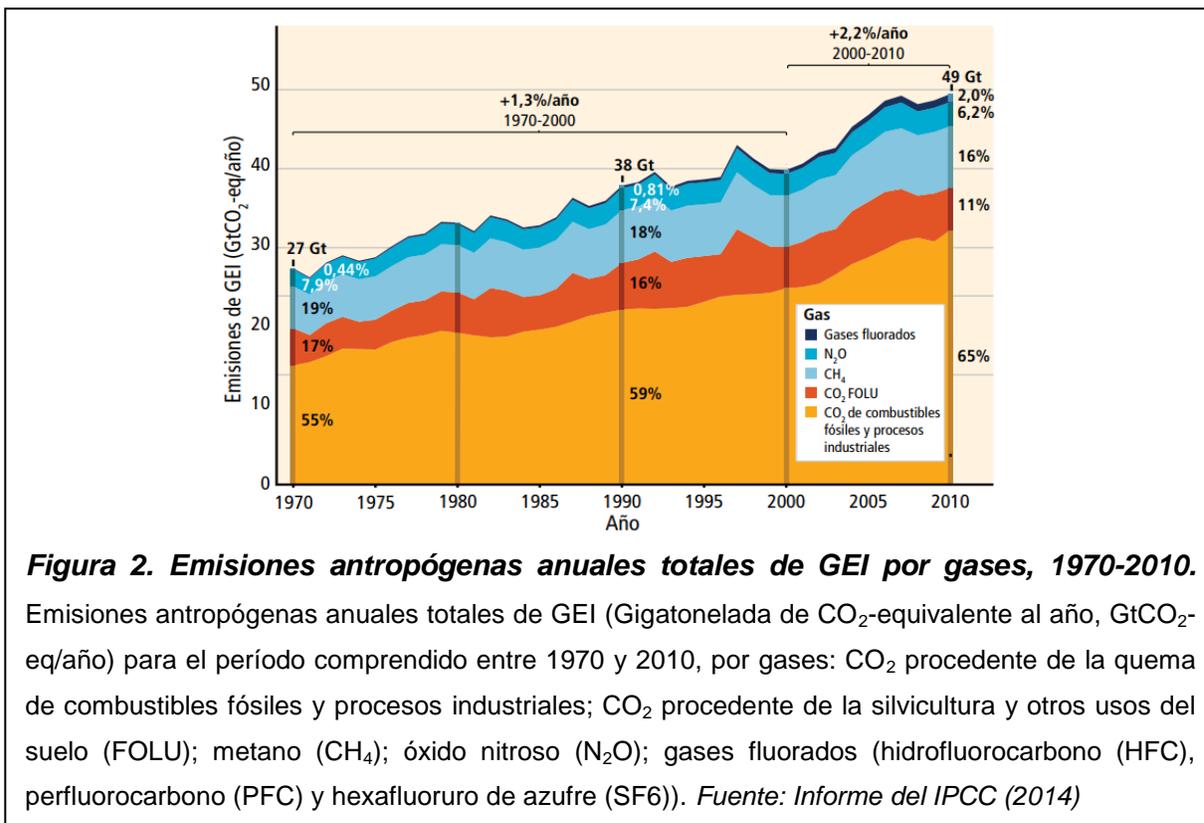


En conclusión, las fuentes que utiliza la industria del azúcar para abastecer sus necesidades energéticas son: el bagazo obtenido de la molienda de la caña de azúcar, el petróleo o combustóleo y la electricidad comprada a la empresa eléctrica CFE. Para el año 2015 representaron el 88.4%, 2.0% y 9.5%, respectivamente, (Ver *Gráfica 2*) del consumo energético del ramo (SENER, 2015). La industria azucarera satisface sus necesidades energéticas en mayor medida del bagazo de caña, mientras que el combustóleo tiene una menor participación. Es importante destacar que el comportamiento del consumo de energía entre los ingenios azucareros es diferente debido a diversos factores, entre los que destaca la tecnología utilizada en el proceso de transformación de la caña de azúcar.

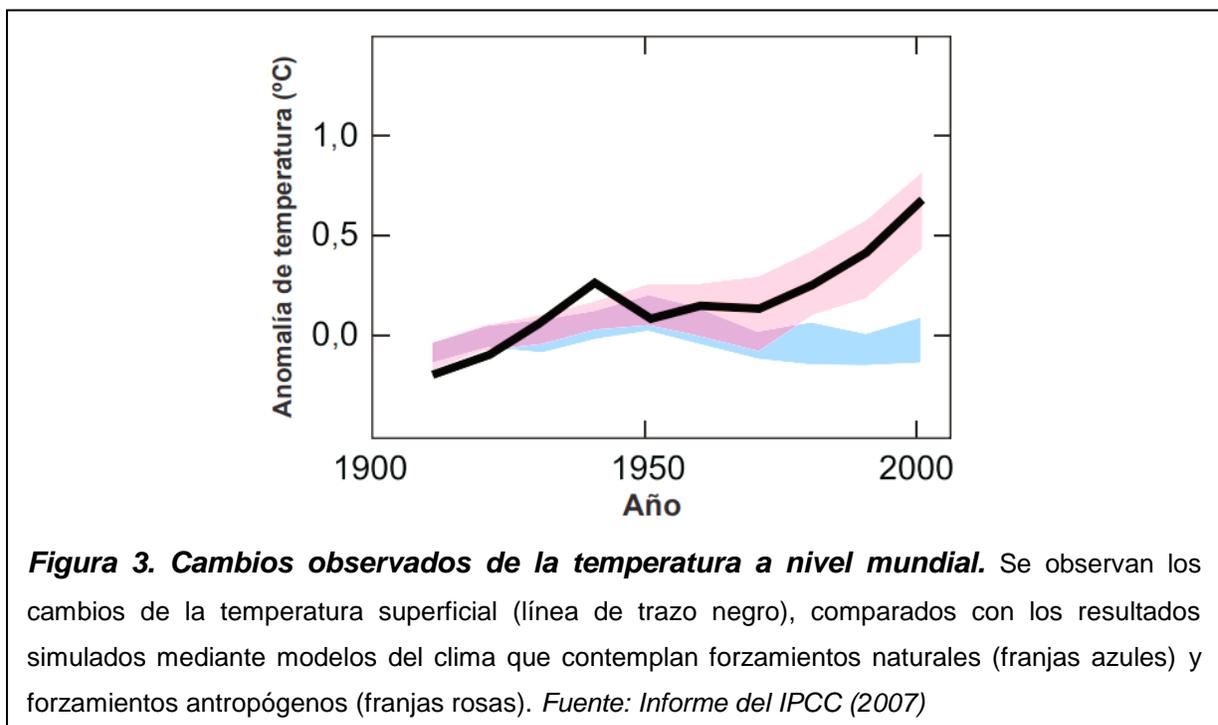
CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

Desde el punto de vista tecnológico, económico y social la energía es esencial para el desarrollo de las sociedades, debido a que es un recurso demandado para satisfacer las necesidades en la producción de bienes y servicios y con ello brindar bienestar a la sociedad. Desde la antigüedad, se ha dependido de la energía; sin embargo, en un principio solo se requería de la fuerza muscular de hombres y animales para satisfacer las necesidades de la sociedad, tiempo después cuando aparecen los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) éstos se convierten en el suministro principal de energía para la población.

El progreso que ha traído consigo la utilización de combustibles fósiles para producir energía ha venido acompañado de impactos negativos para el ambiente. La combustión de combustibles fósiles genera emisiones de gases a la atmósfera identificados como los causantes del cambio climático, dentro de ellos el principal gas de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico es el dióxido de carbono (CO_2) que contribuye con alrededor del 78% del total de las emisiones de GEI en 2010 (IPCC, 2014, p.5) (Figura 2).



El CO₂ ha sido desechado por el hombre a la atmósfera con mayor velocidad de la que los sumideros de carbono de la Tierra necesitan para eliminarlo, esto implica que se ha excedido la capacidad de absorción y almacenamiento del océano y biosfera terrestre (capacidad de carga de los sumideros de carbono) y ha alterado su funcionamiento. El Presupuesto de Carbono Mundial (PCM) de las últimas décadas, muestra que la cantidad de CO₂ que emite el hombre a la atmósfera rebasa la capacidad de carga de los sumideros de carbono, lo cual está contribuyendo al calentamiento de la Tierra (IPCC, 2007). Dicho calentamiento influye en el sistema atmosférico y puede cambiar las condiciones climáticas regional o global, lo que se conoce como cambio climático.



Aunado a lo anterior, es importante destacar que la comunidad científica del Panel Intergubernamental del Cambio Climático atribuye, con una probabilidad mayor del 90%, que el calentamiento global es provocado en gran parte por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Figura 3) (IPCC, 2007). Esto ha tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales.

3.1. Cambio climático

3.1.1. Antecedentes

El cambio climático se ha identificado como uno de los grandes problemas ambientales, ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial. En 1979, se celebró la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, y en 1988 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), junto con la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU) crearon el *Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC) cuya función consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo (CINU, 2017). Los primeros resultados de sus trabajos, aparecieron dos años más tarde, en 1990, año asimismo de la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima. Posteriormente, en 1992, en el marco de la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro, se aprobó el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), firmado por 155 países (incluido México), y que entró en vigor en 1994. En la Tercera Conferencia de las Partes del Convenio, se aprobó el Protocolo de Kioto (1997), el cual establecía que los países desarrollados debían reducir sus emisiones colectivas de seis gases de efecto invernadero (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6)) en un 5.2% entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990, asimismo, se establecieron varios mecanismos innovadores para hacer menos costosa la reducción de las emisiones (CINU, 2017).

Las subsiguientes Conferencias de las Partes trataron de resolver los problemas aparecidos en la implementación de dicho Protocolo, con éxito variable hasta el

momento. Desgraciadamente, la inercia del sistema climático lleva a que cualquier medida que se adopte en un momento determinado, tarde bastantes años en traducirse en algún tipo de cambio (Azqueta, Alviar., *et al.* 2007).

El IPCC en su IV Informe de Evaluación, presentado en febrero de 2007, llegó a la conclusión de que “la influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia. Los cambios climáticos recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales”. Basándose en lo anterior, la evolución de la opinión de la comunidad científica ha ido desde no poder atribuir al hombre efecto alguno sobre el clima (IPCC, 1990) hasta afirmar (IPCC, 2007) que, con una probabilidad mayor del 90%, el calentamiento global es provocado en gran parte por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI).

En 2015, en la 21ª Conferencia de las Partes se adoptó el Acuerdo de París, un acuerdo histórico para combatir el cambio climático e impulsar medidas e inversiones para un futuro bajo en emisiones de carbono, resiliente y sostenible. El objetivo principal es mantener el aumento de la temperatura en este siglo muy por debajo de los 2 grados centígrados (UNFCCC, 2017).

3.1.2. Definición

De acuerdo al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, se entiende al cambio climático como:

Variación del estado del clima, identificable (mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. (IPCC, 2014)

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2014).

El cambio climático es un fenómeno que se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta. Este aumento de la temperatura tiene consecuencias en la intensidad de los fenómenos del clima en todo el mundo (INE, 2005).

Para entender el fenómeno del cambio en el clima, es necesario comprender que, la Tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador a los polos. La energía recibida es re-emitida al espacio (radiación de onda larga) para mantener un balance entre energía recibida y re-emitida en el largo plazo. Cualquier proceso que altere dicho balance, ya sea por cambios en la radiación o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. A esos cambios en la disponibilidad de energía radiativa se les conoce como forzamientos radiativos. Cuando son positivos dichos cambios, tienden a calentar la superficie de la Tierra. Por el contrario, si el forzamiento radiativo es negativo tiende a enfriarla (Magaña, 2004).

Los aumentos en la concentración de los gases de efecto invernadero reducen la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga, emitida por la Tierra al espacio, es re-emitida a la superficie por la presencia de esos gases. Por ende, la temperatura de superficie se eleva para emitir más energía, y aunque parte de ella queda atrapada, sale al espacio la energía suficiente para alcanzar un balance radiativo que mantiene el clima relativamente estable (Magaña, 2004). Si continúan aumentando las concentraciones de gases de efecto invernadero, la temperatura de superficie del

planeta mantendrá una tendencia positiva de los forzamientos radiativos, es decir, tiende a un calentamiento. Ver *Figura 4*.

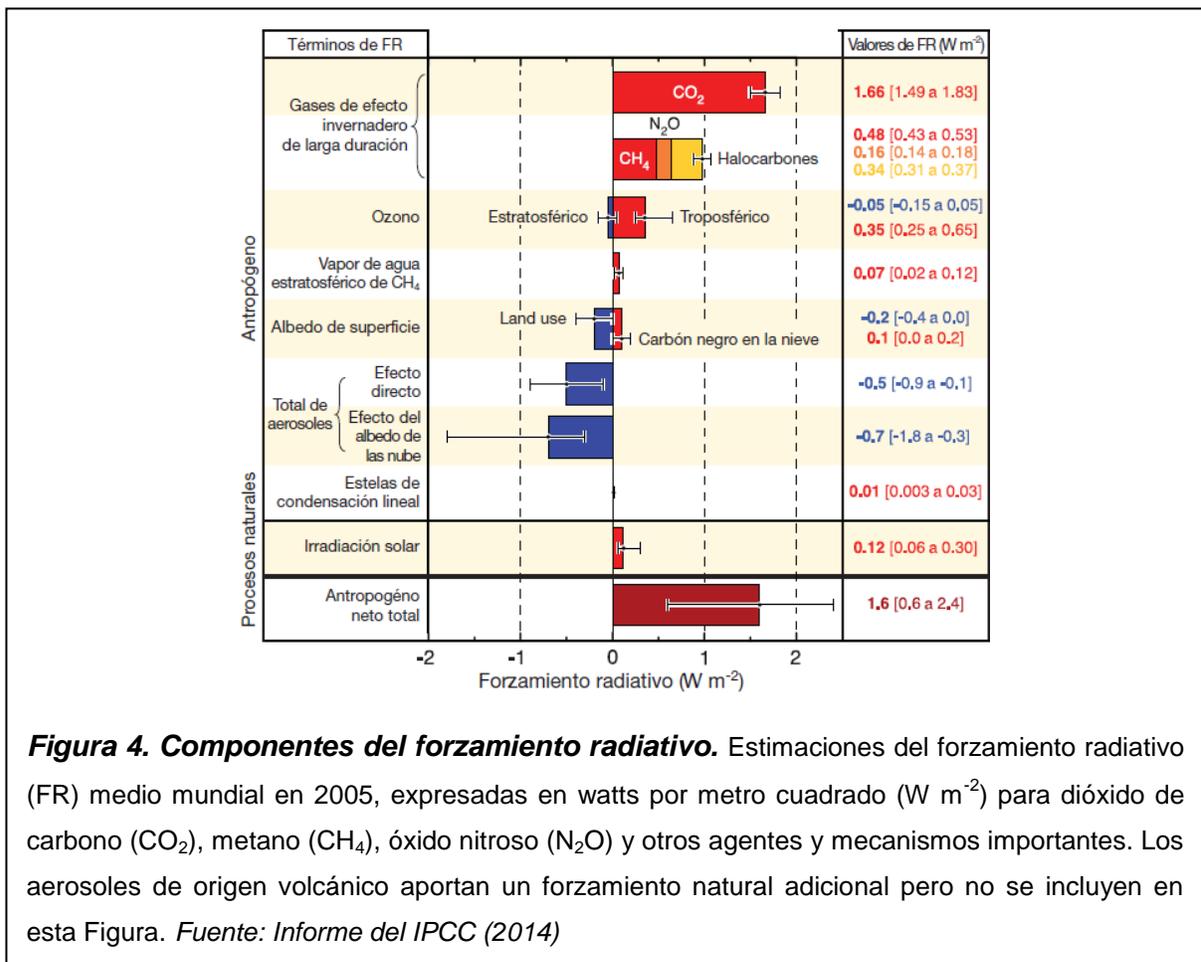


Figura 4. Componentes del forzamiento radiativo. Estimaciones del forzamiento radiativo (FR) medio mundial en 2005, expresadas en watts por metro cuadrado ($W m^{-2}$) para dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y otros agentes y mecanismos importantes. Los aerosoles de origen volcánico aportan un forzamiento natural adicional pero no se incluyen en esta Figura. Fuente: Informe del IPCC (2014)

Por otro lado, los aerosoles de origen antropogénico, “pequeñas partículas presentes en la atmósfera que tienen un amplio rango de variación en cuanto a concentración, composición química y tamaño” (IPCC, 2007); emitidos a la troposfera, como aquellos producidos por las industrias o por la quema de bosques, pueden reflejar radiación solar, constituyéndose en un forzante radiativo negativo que tiende a enfriar el sistema climático. Dado que algunos aerosoles como el hollín de las fábricas, absorben radiación solar, su presencia puede resultar también en proclive al calentamiento. Sin embargo, la presencia de los aerosoles puede alterar la cantidad y reflectividad de las nubes, por lo que en

promedio se estima que su efecto final es el de enfriar el sistema climático (Magaña, 2004).

Con lo anterior se concluye que cuando se cambia el forzante radiativo, ya sea de manera natural o por actividad humana, el sistema climático responde en varias escalas de espacio y tiempo.

3.1.3. Efectos globales del cambio climático.

Los cambios en el clima han causado repercusiones en los sistemas naturales y humanos en todo el mundo, la evidencia de tal fenómeno es cada vez más sólida y completa para los sistemas naturales. Los impactos de los fenómenos extremos relacionados con el clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales, ponen de relieve una importante vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática. Entre esos impactos figuran la alteración de ecosistemas, la desorganización de la producción de alimentos y el suministro de agua, daños a la infraestructura y los asentamientos, morbilidad y mortalidad, y consecuencias para la salud mental y el bienestar humano. Para los países, independientemente de su nivel de desarrollo, esos impactos están en consonancia con una importante falta de preparación para la actual variabilidad climática en algunos sectores (IPCC, 2014). En relación con lo anterior, en la *Tabla 1* se describen algunos de los impactos causados por diferentes incrementos en la temperatura media global.

Tabla 1. Efectos globales del cambio climático de acuerdo con el aumento de temperatura

Aumento de temperatura	Impactos sobre el agua	Impactos sobre la salud	Impactos sobre los ecosistemas	Otros impactos
1° C	Los glaciares andinos desaparecen totalmente, amenazando el suministro de agua de 50 millones de personas.	Al menos 300.000 personas adicionales por año mueren de enfermedades relacionadas con el cambio climático, por ejemplo, malaria, dengue y malnutrición.	Al menos 10% de especies de la flora y la fauna continentales enfrentan la extinción.	Más intensidad de eventos extremos, como las olas de calor.
2° C	El suministro de agua en regiones como el Mediterráneo podría bajar entre 20% y 30%.	Hasta 10 millones más de personas se verán afectadas por inundaciones costeras por año.	La reducción en la disponibilidad de agua afecta negativamente la productividad agrícola en los países tropicales. Alto riesgo de extinción de las especies árticas, incluso el oso polar y el caribú. Se presenta un blanqueamiento más frecuente de los corales, de los que dependen cerca de 500 millones de personas en el mundo para alimentos, ingresos y defensa costera.	La capa de hielo que cubre a Groenlandia puede empezar a derretirse sin reversa. Es un fenómeno que aumentaría el nivel del mar. Su desaparición final, después del siglo veintiuno, produciría un aumento eventual de siete metros en el nivel del mar.
3° C	Entre mil y cuatro mil millones más de	Entre 1 millón y 170 millones más	Entre 20% y 50% de las especies en riesgo de	Aumento del riesgo de cambios

	personas sufren de escasez de agua, mientras que entre mil y cinco mil millones reciben más agua con riesgos posibles de inundaciones.	de personas se verían afectadas por las inundaciones.	extinción, incluso hasta 60% de los mamíferos.	abruptos en la circulación atmosférica (por ejemplo, los monzones).
4° C	El suministro de agua en regiones como el Mediterráneo podría bajar entre 30% y 50%.	Hasta 80 millones más de personas en riesgo de malaria en África.	Declive de entre 15% y 30% de la productividad agrícola en África. Regiones enteras, incluso partes de Australia, ya no son propicias para la producción.	Aumento del riesgo del colapso de la capa de hielo occidental del Antártico. Aumento del riesgo del colapso de la corriente del Atlántico.
5° C	Posible desaparición de glaciares en el Himalaya, afectando a un cuarto de la población de China y a cientos de millones en India.	Se agudizan los problemas de salud anotados en los intervalos de temperatura anteriores.	Aumento en la acidez de los océanos, con graves efectos para los ecosistemas marinos, entre ellos los manglares. Extinción de más especies.	Aumento en el nivel del mar amenaza ciudades como Nueva York, Londres y Tokio.

Fuente: Informe Stern (2006), retomado de Rodríguez y Mance (2009).

Los efectos resultados del cambio climático, van a depender de la cantidad de gases de efecto invernadero que se emitan y de que tanto se pueden controlar esas emisiones. Se cree que si las emisiones siguen creciendo de la misma manera que hasta ahora, a finales del presente siglo la temperatura podría aumentar más de 5°C en relación con la época preindustrial (Stern Review, 2007).

Los cambios en la temperatura traen consigo una serie de repercusiones en diferentes sectores y a su vez consecuencias negativas para el crecimiento económico, ya en 2007 en el Informe Stern sobre la economía del cambio climático, se consideró a éste como una amenaza mundial, que exige una

respuesta urgente debido a que es un reto único para la economía (Stern Review, 2007).

3.2. Efecto invernadero

Todos los cuerpos emiten radiación que son ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance. Como cualquier onda, las electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda o por su frecuencia, siendo ambas inversamente proporcionales: una onda larga es de baja frecuencia y una corta es de alta frecuencia. La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos: por un lado, conforme aumenta la temperatura la cantidad de radiación también aumenta y, por otro, cuando la temperatura sube la longitud de onda disminuye.

En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiaciones distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja invisible emitida por la Tierra. Por la diferencia en su longitud de onda, a la radiación solar se le llama de onda corta, y a la terrestre, de onda larga (Garduño, 2004).

Entendido lo anterior, el efecto invernadero resulta de, que el aire es demasiado transparente para la radiación de onda corta y opaca a la de onda larga. O sea que la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre y sus componentes, que se calientan en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre, que es detenida por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas y las nubes van sucesivamente absorbiendo, calentándose y reemitiendo hacia arriba y abajo radiación térmica procedente de abajo. El resultado de dicho mecanismo es que la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme uno asciende a través de ella, es decir, la temperatura disminuye con la altura (Garduño, 2004).

El vapor de agua y el CO₂ son los dos principales gases de efecto invernadero, pero el CO₂ es el principal causante del cambio climático. Los cambios del vapor

de agua son los denominados mecanismos de retroalimentación y se producen como respuesta a los cambios que se dan en el CO_2 .

Algunos autores dicen que el nombre efecto invernadero no es el más adecuado, pues un invernadero se calienta más por impedir la convección que por atrapar radiación, y sugieren que se le llame efecto atmosférico. Este efecto se debe a los gases atmosféricos más complejos y minoritarios, llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI). La atmósfera está compuesta principalmente por oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2), el 99% lo conforman estos dos elementos los cuales no son GEI, los GEI están dentro del 1% restante de la composición atmosférica, los más importantes son el vapor de agua (H_2O) y el dióxido de carbono (CO_2), los demás se llaman gases traza por su presencia ínfima en la atmósfera como el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) (Hardy et al. 1986 citado por Garduño, 2004, p.32).

El efecto invernadero siempre ha existido como consecuencia de la composición natural de la atmósfera; sin embargo, esta situación ha sido alterada por el progreso humano de los últimos siglos, debido a que la industrialización ha inyectado a la atmósfera diversas cantidades de GEI, ya sea mediante la quema de combustibles fósiles y de la deforestación, o por diversos artefactos y actividades industriales, domésticas y agropecuarias (Hardy et al. 1986, Suple, 1998, Tanck,1971 citado por Garduño, 2004, p.34). Lo anterior, conlleva al aumento del efecto invernadero, pues más gases absorbedores presentes atrapan más radiación en el sistema climático; por lo tanto, el efecto invernadero del que se habla hoy en día es propiamente un incremento antropógeno de éste.

3.3. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

En 1988 se estableció el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC), cuya función es evaluar la información científica disponible sobre el mismo, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático, y formular estrategias de respuesta. El Grupo de Trabajo I del PICC colaboraron diversos científicos para la elaboración de los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, con el fin de asegurar que los que se sometían a consideración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), sean consistentes y comparables (Cuatecontzi y Gasca, 2004, p.87).

El objetivo del artículo 2 de la CMNUCC es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera en un nivel tal que no se generen interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Dicho nivel deberá lograrse en un periodo que sea suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten de manera natural al cambio climático y asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada, mientras el desarrollo económico continúa su avance de manera sustentable (PNUMA, 1999)..

Se entiende por Gases de Efecto Invernadero a “aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorbe y reemiten radiación infrarroja a la Tierra” (PNUMA, 1999). En 1997 se aprobó el Protocolo de Kioto de la CMNUCC, mediante el cual se estableció controlar las emisiones de en específico seis GEI: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

En la *Tabla 2* se hace mención de las principales características de los seis GEI establecidos en el Protocolo de Kioto, posteriormente para un mayor entendimiento se describe de manera extensa cada uno de los gases.

Tabla 2. Características de los gases de efecto invernadero

GEI VARIABLE	CO₂	CH₄	N₂O	HFC-23	PFC CF₄	SF₆
Concentración periodo previsto a la industrialización (1750)	280 ppm	700 ppmm	270 ppmm	0 ppb	40 ppb	0 ppb
Concentración en 2014	397.7 ppm	1,833 ppmm	327.1 ppmm	14 ppb*	80 ppb*	4.2 ppb*
Tasa de cambio en concentración	1.5 ppm/año	7.0 ppmm/año	0.8 ppmm/año	0.55 ppb/año	1 ppb/año	0.24 ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera (años)	5 - 200	12	114	260	>50,000	3,600
Forzamiento radiativo (W/m ²)	1.66	0.48	0.16	0.002	0.003	0.002
Potencial de Calentamiento Global	1	23	296	12,000	5,700	22,200
Fuente por actividad humana	Combustibles fósiles (carbón, derivados del petróleo y gas), producción de cemento, cambio de uso de suelo	Combustibles fósiles, descomposición anaerobia (cultivo de arroz, rellenos sanitarios, estiércol), minas y pozos petroleros.	Producción y uso de fertilizantes nitrogenados, quema de combustibles fósiles (motores de vehículos), tratamiento de aguas residuales	Electrónicos, refrigerantes	Productos intermedios en la fundición de aluminio, fabricación de semi-conductores	Aislante en interruptores y equipos eléctricos, proceso de fabricación semi-conductores

Nota: La abundancia de gases traza en la atmósfera se indica aquí como la fracción molar (proporción de mezcla molar) del gas en relación con el aire seco (ppm, partes por millón= 10^{-6} ; ppmm, partes por mil millones= 10^{-9} ; ppb, partes por billón= 10^{-12}).

*Concentraciones en 1998

Fuente: IPCC (2001) retomado de Martínez y Fernández (2004), complementado con IPCC (2007, 2014) y la OMM (2015)

3.3.1. Dióxido de carbono

En la naturaleza, billones de toneladas de carbono en forma de CO₂ son emitidas a la atmósfera anualmente por medio de los procesos naturales y son absorbidas por los océanos y la biomasa viviente (sumideros). Los flujos continuos más grandes ocurren entre la atmósfera y la biota terrestre y entre la atmósfera y el agua de la superficie de los océanos. En la atmósfera, el carbono existe predominantemente en forma oxidada: el dióxido de carbono. Este gas forma parte del ciclo global del carbono y su tiempo de vida en la atmósfera es de 5 a 200 años.

Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han incrementado aproximadamente 42% del año 1750 a 2014, pasando a 397.7 partes por millón en volumen (ppmv) (IPCC, 2001). El IPCC ha establecido que este incremento se debe en gran medida a las actividades humanas, principalmente aquellas relacionadas con la combustión de los energéticos fósiles, la deforestación y otros procesos de quema de biomasa, así como a los que consumen energía, como es la producción de cemento; sin embargo, la mayoría de la emisiones durante los últimos 20 años se deben predominantemente a la quema de combustibles de origen fósil y a la deforestación (Cuatecontzi y Gasca, 2004, p.90).

El CO₂ es el gas de efecto invernadero dominante, con un forzamiento radiativo de 1.66 W/m² (IPCC, 2014), que representa 70% del total de los cambios en las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero, mezclados de manera homogénea en el planeta. Sin embargo, estudios de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) aseguran que contribuyó en un 83% al aumento total del forzamiento radiativo causado por los GEI (OMM, 2015).

3.3.2. Metano

El metano (CH₄), se produce fundamentalmente por la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los sistemas biológicos, también, durante la producción y distribución del gas natural y del petróleo, y es liberado como subproducto en la extracción del carbón y en la combustión incompleta de los energéticos fósiles.

La concentración media global de metano en la atmósfera en 2014 fue de 1,833 ppm, mostrando un incremento de 162% en relación con la concentración existente en el periodo preindustrial (*Tabla 2*). El CH₄ tiene un tiempo de vida de 12 años y es eliminado de la atmósfera por reacciones químicas. El forzamiento radiativo directo actual del metano es de 0.48 W/m² (IPCC, 2014) y representa el 20% del total de los GEI.

3.3.3. Óxido nitroso

Las fuentes antropogénicas emisoras de óxido nitroso (N₂O) son: los suelos agrícolas que utilizan fertilizantes nitrógenados y abonos sintéticos, la combustión de energéticos fósiles en vehículos, la producción de ácidos adípico y nítrico, el tratamiento de aguas residuales, la combustión de desechos y el quemado de biomasa.

La concentración en la atmósfera de N₂O en el periodo previo a la industrialización era de 270 ppm para 2014 la concentración atmosférica era de 327.1 ppm, por lo que hubo un incremento de 21% atribuido a las actividades antropogénicas. El tiempo de vida del N₂O en la atmósfera es de 114 años y su remoción en ella se realiza fundamentalmente por medio de la acción fotolítica de la luz solar en la estratosfera. El forzamiento radiativo se estima en 0.16 W/m² equivalente a 6% del total de todos los gases de efecto invernadero.

3.3.4. Hidrofluorocarbono

Los hidrofluorocarbonos (HFC) son gases utilizados para reemplazar las sustancias agotadoras de la capa de ozono. La concentración del HFC-23 ha aumentado más de tres veces entre 1978 y 1995; el tiempo de vida de este compuesto es de 260 años. Su concentración en 1998 fue de 14 ppb y tiene una tasa de concentración de 0.55 ppb/año. Debido a que las concentraciones actuales son relativamente bajas, la contribución de los HFCs al forzamiento radiativo es modesta.

3.3.5. Perfluorocarbono

Los perfluorocarbonos (PFC) como el perfluorometano (CF_4) y el perfluoroetileno (C_2F_6), tienen tiempos extremadamente largos de residencia atmosférica y absorben gran cantidad de radiación infrarroja, por lo que tienen la posibilidad de influir sobre el clima en un futuro lejano (IPCC, 2001). Por ejemplo, el CF_4 permanece en la atmósfera 50,000 años como mínimo, su concentración paso de 40 a 80 ppb de 1750 a 1998, y tiene una tasa de cambio de concentración de 1 ppb/año.

Los PFC se utilizan como productos intermedios en la fundición de aluminio que constituye la principal fuente, seguida de la fabricación de semiconductores (los más empleados en el ámbito de la industria, se encuentran el silicio, el azufre y el germanio).

3.3.6. Hexafluoruro de azufre

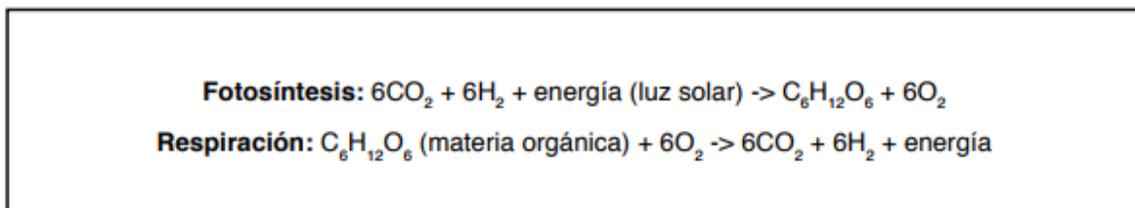
El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un gas de efecto invernadero que se utiliza como aislante en interruptores y equipos eléctricos, es generado por fugas en procesos de fabricación de algunos semiconductores y manufacturación de magnesio. Las concentraciones actuales en la atmósfera son muy bajas, en 1998 fue de 4.2 ppb, sin embargo, tienen una tasa de cambio de concentración importante de 0.24 ppb/año (IPCC, 2001).

3.4. El ciclo del Carbono

El carbono es parte primordial de la Tierra y del sistema estructural de la vida en la Tierra. Su presencia en la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) es determinante para conservar unas condiciones de vida habitables. También, es el elemento dominante de las fuentes energéticas que utiliza el ser humano, ya que es la base del carbón, el petróleo y el gas natural, que son hidrocarburos derivados de vegetales que absorbieron CO_2 atmosférico

hace cientos de millones de años (Michalak *et al.*, 2011 citado por NEIKER-Tecnalia, 2015).

Los cambios climáticos guardan estrecha relación con el ciclo del carbono que de acuerdo al IPCC, es un “ciclo biogeoquímico por el que se intercambia carbono entre la atmósfera, la hidrosfera (incluyendo, océanos, organismos marítimos, materia no viva y el carbono inorgánico disuelto), la biosfera terrestre (incluyendo agua dulce, carbono del suelo y de la biomasa) y la litosfera (incluyendo sedimentos y combustibles fósiles)” (NEIKER-Tecnalia, 2015). Los movimientos de carbono entre estos cuatro depósitos ocurren gracias a una serie de procesos químicos, biológicos, físicos y geológicos (Ver *Figura 5*). Dentro del ciclo de carbono, se pueden dividir a su vez dos ciclos que interactúan: uno geológico o lento y, otro, biológico, mucho más rápido. En el ciclo biológico, los flujos entre la biosfera terrestre, los océanos y la atmósfera, ocurren mediante procesos de fotosíntesis y respiración, es decir, mediante las ecuaciones que se pueden resumir así:



Las componentes del ciclo del carbono se encuentran balanceadas, de manera que el incremento de carbono en uno de los depósitos implica la disminución en otro.

Por otra parte, en el ciclo geológico o lento, el flujo entre la litósfera, los océanos y la atmósfera se da cuando el CO_2 de la atmósfera, combinado con el agua, forma el ácido carbónico, el cual reacciona lentamente con el calcio y con el magnesio de la corteza terrestre, formando carbonatos. A través de los procesos de erosión (lluvia, viento), estos carbonatos son arrastrados a los océanos, donde se acumulan en su lecho en capas, o son asimilados por organismos marinos que, eventualmente, después de muertos, también se depositan en el fondo del mar.

Estos sedimentos se van acumulando a lo largo de miles de años, formando rocas calizas. El ciclo continúa cuando las rocas sedimentarias del lecho marino son arrastradas hacia el manto de la Tierra por un proceso de subducción (proceso por el cual una placa tectónica desciende por debajo de otra). Así, las rocas sedimentarias están sometidas a grandes presiones y temperaturas debajo de la superficie de la Tierra, deritiéndose y reaccionando con otros minerales, liberando CO_2 . El CO_2 es devuelto a la atmósfera a través de las erupciones volcánicas y otro tipo de actividades volcánicas, completándose así el ciclo (Pérez, 2014).

Los balances entre los diversos procesos del ciclo del carbono geológico han controlado la concentración de CO_2 presente en la atmósfera a lo largo de millones de años.

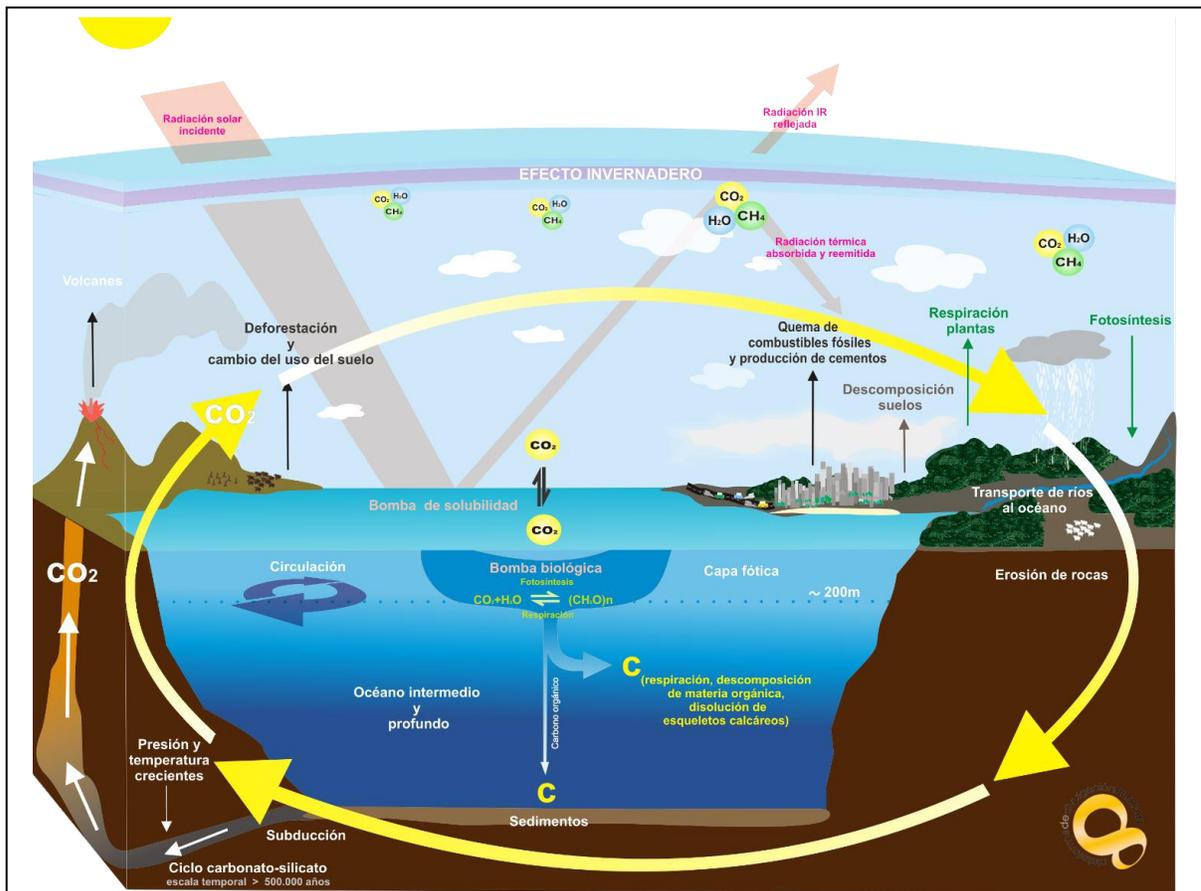


Figura 5. El ciclo del carbono. Los intercambios de carbono entre reservas ocurren como resultado de varios procesos químicos, físicos, geológicos y biológicos. El océano contiene el depósito activo más grande de carbono. Fuente: *Ecología Activa Red* (2017)

3.5. Los sumideros de carbono

El concepto de sumidero en relación con el cambio climático fue adoptado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992. Según la Convención, un sumidero es “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero”. Los ecosistemas terrestres y el océano son los principales sumideros de GEI de la biosfera y absorben principalmente el CO₂ de la atmósfera (Red Española de Ciudades por el Clima, 2012).

Desde una concepción economicista del medio natural, no se deberían realizar más emisiones a la atmósfera de las que la Tierra puede eliminar, o de lo contrario se estará excediendo la capacidad de carga de los sumideros de carbono y el almacenamiento del océano y biosfera terrestre, alterando su funcionamiento (Morillón y Hernández, 2011). Cuando los sumideros de carbono son superados en su capacidad de absorción y eliminación por GEI que tienen la propiedad de retener parte de la energía que emite el suelo al haber sido calentado por la radiación solar, éstos comienzan a acumularse en la atmósfera, obstaculizando cada vez más la salida de energía hacia el espacio exterior, y provocan con ello un aumento gradual de la temperatura media del planeta.

El reto está en alcanzar un razonable equilibrio entre energía incorporada y emisiones de CO₂ de origen fósil y la capacidad de carga de los sumideros de carbono del planeta; sin embargo, el Presupuesto de Carbono Mundial (PCM) de las últimas décadas, muestra que la cantidad de CO₂ que emite el hombre a la atmósfera rebasa la capacidad de carga de los sumideros de carbono. El PCM para la década de 1990, de las emisiones totales por combustión de combustibles fósiles y por el flujo de cambio en el uso de la tierra, llegó a 8 gigatoneladas de carbono (GtC) por año. De éstas, 3.2 GtC (40%) se quedaron en la atmósfera, mientras que el 60% restante lo absorbieron y almacenaron los sumideros de carbono (IPCC, 2007). Pero de 2000 a 2007, de acuerdo con el Global Carbon Project (GCP), se emitieron a la atmósfera en promedio 10 GtC por año, de las

cuales 45% se quedó en la atmósfera y el 55% restante fue absorbido y almacenado por los sumideros de carbono. Según estos datos, los sumideros de carbono del planeta redujeron su capacidad de absorción y almacenamiento en 5% con respecto a la década de 1990 (GCP, 2008).

3.6. Consumo de energía y emisiones de CO₂.

La energía es básica para el crecimiento económico y nivel de vida de un país, es un recurso que permite producir calor, movimiento, electricidad, y en general, el desarrollo de la gran mayoría de las actividades que realiza el hombre. De acuerdo a su origen, existen dos tipos de energía: renovable y no renovable. Las fuentes de energía renovables son aquellas virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por la capacidad de regenerarse de manera natural; las fuentes de energía no renovables son temporales y no está en las manos del hombre reponer lo que se gasta, sino en la acción evolutiva de la Tierra (Morillón y Hernández, 2011, pp. 33-34).

Desde el punto de vista de emisiones de CO₂, los combustibles fósiles son recursos no renovables que producen energía contaminante, mientras que la energía nuclear es un recurso no renovable también, pero limpio. Las energías renovables son limpias excepto la biomasa que emite CO₂ a la atmósfera al quemarse.

3.6.1. Grado de emisión energética de CO₂

Existe una gran diferencia en el consumo de energía total entre los países del mundo y en la proporción de la participación de los diversos tipos de energía (procedente de combustibles fósiles, renovable limpias, nuclear y procedente de la biomasa), las cuales condicionan la cantidad de CO₂ que emite un país. Para conocer la relación entre el consumo de energía total y las emisiones de CO₂ totales, se establece la siguiente ecuación, la cual nos permite saber la cantidad de CO₂ total que se emite por unidad de energía consumida total:

$$\frac{CO_{2T}}{EF + ER + EN + EB}$$

Dónde:

CO_{2T} son las emisiones de CO₂ totales

CET = (E F + E R + E N + E B) el consumo de energía total

EF= consumo de energía que procede de combustibles fósiles

ER= consumo de energía que procede de fuentes renovables limpias

EN= consumo de energía nuclear

EB= consumo de energía que procede de la biomasa.

Por la importancia y participación de las emisiones de CO₂ procedentes de los combustibles fósiles, existe un indicador que se conoce como *intensidad de CO₂ del consumo energético* (IEA, 2008 citado por Morillón y Hernández, 2011) en el cual se puede relacionar exclusivamente las emisiones de CO₂ de origen fósil con el consumo energético total, lo que permite conocer la cantidad de CO₂ de origen fósil que se utiliza por unidad de energía consumida total:

$$\frac{CO_{2F}}{CET}$$

Dónde:

CO_{2F} son las emisiones de CO₂ de origen fósil

CET el consumo de energía total

Independientemente de cual sea la composición del consumo energético total en cuanto tipo y proporción de energía (EF, ER, EN o EB), el indicador anterior señalará el grado de emisión con relación al CO₂ de origen fósil, por lo que puede llamársele grado de emisión energética de CO₂ (GEE_{CO2}). Resultados con valores altos o bajos señalarán una cantidad alta o baja de CO₂ de origen fósil utilizado por unidad de energía (Morillón y Hernández, 2011). En este sentido, mezclas de consumos de energía con predominio de combustibles fósiles tendrán un GEE_{CO2} mayor que mezclas que equilibren su consumo con energías limpias (energía renovable y energía nuclear).

3.6.2. Sustentabilidad y capacidad de carga optima de CO₂

El tema de capacidad de carga ha sido debatido desde 1798 a partir de los trabajos del economista Thomas Malthus; sin embargo, no existe una definición universal de lo que significa por lo que es común encontrar diversas definiciones (Population Information Program [PIP], 1997).

Una de ellas es la que brinda la Comisión Independiente sobre la Población y la Calidad de Vida (CIPCV) que la define como, “la carga máxima que la humanidad puede imponer de modo sostenible al medio ambiente antes de que este sea incapaz de sostener y alimentar la actividad humana” (CIPCV, 1999).

La definición que ofrece la SEMARNAT, menciona que “la capacidad de carga es la medida que posee un componente ambiental (agua, aire, suelo, flora o fauna) para depurar, dispersar, absorber o soportar vertidos, emisiones o residuos sin afectar su calidad, estructura o función” (SEMARNAT, 2008 citado por Morillón y Hernández, 2011).

Este concepto está directamente relacionado con el de sustentabilidad. La definición de desarrollo sustentable precisada en 1992 en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, habla de conciliar tres esferas conceptuales: la económica, la ecológica y la social. Dicho concepto plantea el establecimiento de límites para cada esfera, lo que permite el equilibrio en el ecosistema. No se puede concebir un crecimiento económico infinito sobre una base finita, como son los recursos de la Tierra. Se advierte, por tanto, la existencia de un límite óptimo o una capacidad de carga óptima para el desarrollo humano (Morillón y Hernández, 2011).

Odum y Warrett (2006) mencionan que la sustentabilidad será mejor comprendida manejándose en términos del concepto de capacidad de carga óptima. Se puede decir, que la determinación o establecimiento de un límite óptimo en la relación población-recursos de un ecosistema cualquiera permite identificar el nivel más adecuado (capacidad de carga óptima), el cual constituye una puerta que conduce hacia la sustentabilidad.

Una de las tres condiciones para ser sustentable según Herman Daly es que “la tasa de emisión de contaminación no debe superar la capacidad de asimilación del medio ambiente” (Meadows *et al*, 2006 citado por Hernández y Hernández, 2013). Por tanto, el nivel de sustentabilidad respecto del problema del calentamiento global, se encuentra en la capacidad de absorción y asimilación de CO₂ que tienen los sumideros de carbono (Hernández y Hernández, 2013). Si la reducción de emisiones de CO₂ no considera dicha capacidad de carga y la rebasa, no se puede considerar sustentable o amigable con el medio ambiente, ya que, al superarla, contribuye a su acumulación en la atmósfera, y con esto, al calentamiento de la Tierra.

De acuerdo con los datos del Presupuesto de Carbono Mundial, actualmente del total de CO₂ que se emite a la atmósfera, el 55% es absorbido y almacenado por los sumideros de carbono del planeta (GCP, 2008) por lo que se puede establecer este factor de absorción como el límite máximo de emisión de CO₂ (grado máximo de emisión energética de CO₂). La capacidad de carga máxima, por tanto, está dada por la siguiente ecuación:

$$CCM = \left(CO_{2F} / CET \right) * 0.55$$

Dónde:

CCM es la capacidad de carga máxima

CO_{2F} son las emisiones de CO₂ de origen fósil

CET es el consumo energético total

0.55 la capacidad actual de los sumideros de carbono del planeta.

El intervalo formado por la capacidad máxima de absorción de los sumideros de carbono (capacidad de carga máxima) y el límite óptimo (cero emisiones) puede considerarse como óptimo desde el punto de vista de eliminación del CO₂ que se emite. Dicho intervalo, recibe el nombre de intervalo de capacidad de carga óptima de CO₂ (CCO_{CO2}) y representa el nivel de relación entre consumo de energía y emisiones de CO₂ (grado de emisión energética de CO₂), y la capacidad de absorción de los sumideros de carbono del planeta. Cualquier reducción de

emisiones que se encuentre entre la capacidad de carga máxima y el límite óptimo puede considerarse sustentable. Entre más cercana es la reducción de emisiones a cero, mayor es el nivel de sustentabilidad.

Por tanto, la comparación del grado de emisión energética de CO₂ (GEE_{CO2}) de una actividad con la capacidad de carga óptima de CO₂ (CCO_{CO2}), puede ayudar a identificar el acierto o desacierto en la cantidad de emisión de CO₂ que se emite a la atmósfera respecto de la energía consumida, es decir, el nivel de sustentabilidad con el que se cuenta.

Para México el intervalo de CCO_{CO2}, de acuerdo a los cálculos realizados por Morillón y Henández (2011) es:

$$0 \leq \text{CCO}_{\text{CO}_2} \leq 0.02918 \text{ kgCO}_2/\text{MJ}$$

Este intervalo significa que cualquier relación de consumo de energía y emisiones de CO₂ de origen fósil de cualquier producto o actividad en México, se considera sustentable o amigable con el ambiente si el GEE_{CO2} es menor o igual a 0.02918 kgCO₂/MJ. Valores mayores de 0.02918 kgCO₂/MJ superan la capacidad de carga del planeta y contribuyen a la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Morillón y Hernández, 2011).

CAPITULO IV. MERCADO MUNDIAL Y NACIONAL DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

El azúcar es uno de los productos más consumidos a nivel mundial, es considerado como uno de los alimentos básicos más importantes debido a que es puro en carbohidratos, una de las mejores y más baratas fuentes de energía. El azúcar es el único alimento que se obtiene de dos especies vegetales distintas, la remolacha azucarera (*beta vulgaris*) y la caña de azúcar (*saccharum officinarum*) en regiones de cultivo distintas (la remolacha se desarrolla en zonas templadas de Europa y Norteamérica; sin embargo, la caña de azúcar es un cultivo de climas tropicales y se produce mayormente en Asia y Latinoamérica).

El azúcar es un bien significativo tanto para la economía interna de una nación, como para el comercio internacional. Mintz citado por Aroche (2004), afirmaba:

“Alrededor de 1900 el azúcar se había sumado ya al pan, la sal y el vino como uno de los componentes básicos en la dieta del hombre occidental, asentado en el hecho de que la caña de Azúcar produce mayores cantidades de calorías utilizables por unidad de tierra en un tiempo, dado que cualquier otra planta cultivada en sus respectivas zonas climáticas. De esto se desprende su presencia como un producto estratégico en el sector alimenticio y en comercio mundial”.

Para muchos países de Latinoamérica, entre ellos México, y de Asia, el azúcar que se obtiene a partir de la caña de azúcar juega un papel importante como fuente de empleo y generación de ingresos para un amplio grupo de la población. Debido a esta importancia, en la presente investigación se hace un análisis de la producción mundial y nacional de la caña de azúcar, destacando a los principales productores, consumidores y el comercio, este mismo análisis se realiza para el edulcorante.

4.1. Mercado internacional

4.1.1. Producción, consumo y comercio mundial de la caña de azúcar

Como se mencionó anteriormente, el cultivo no puede darse en cualquier parte del mundo, es por ello que los países que cultivan la caña de azúcar están entre la latitud 36.7°N y 31.0°S del Ecuador, extendiéndose desde regiones tropicales a subtropicales (Ver *figura 6*), de allí que la mayoría de los principales países productores se encuentren en Asia, Latinoamérica y unas cuantas regiones de Europa.



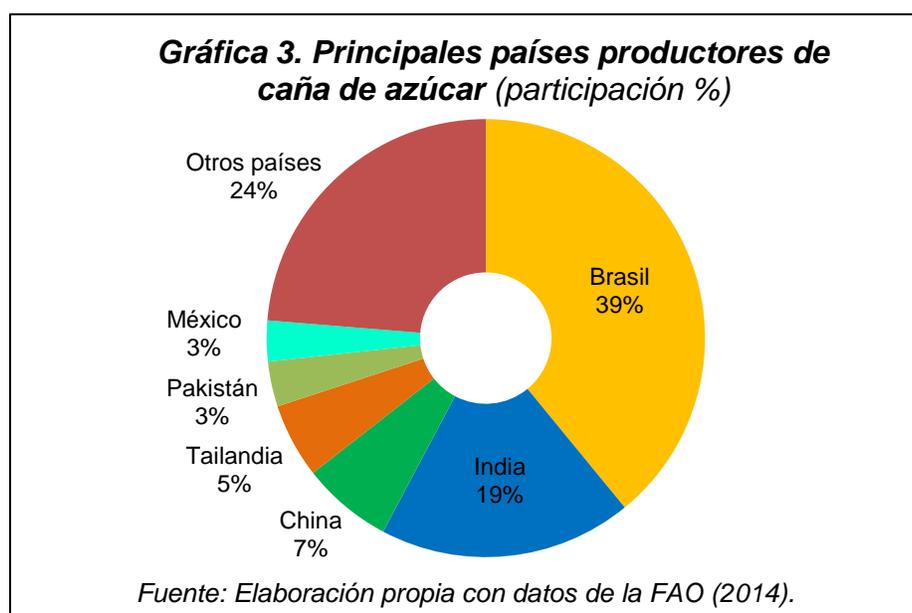
De acuerdo con información de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés), en 2014 la superficie cosechada de caña de azúcar abarcó un área de 27 millones de hectáreas en todo el mundo, con una producción total de más de 1,800 millones de toneladas métricas (FAO, 2017). Como se puede observar en la *Tabla 3*, el área cosechada de caña de azúcar y el rendimiento difieren considerablemente de un país a otro. Brasil, por ejemplo, tiene la mayor área cosechada (10.42 millones de ha), mientras que Guatemala tiene el mayor rendimiento por ha (103.68 t/ha). En el caso de México, el rendimiento por ha es de 74.39 t.

Tabla 3. Producción, área cosechada y rendimiento mundial de la caña de azúcar

País	Producción (Millones de t)	Área cosechada (Millones de ha)	Rendimiento (t/ha)
Brasil	736.11	10.42	70.65
India	352.14	0.47	70.26
China	126.15	0.40	71.34
Tailandia	103.70	0.30	76.64
Pakistán	62.83	1.35	55.09
México	56.67	1.14	74.39
Colombia	36.51	0.45	91.01
Australia	30.52	0.38	81.33
Indonesia	28.60	0.76	60.51
EE.UU	27.60	0.43	78.53
Guatemala	27.36	5.01	103.68
Filipinas	25.03	0.26	57.94
Argentina	24.50	0.37	66.54
Vietnam	19.82	1.77	65.00
Cuba	18.00	0.35	39.98
Otros países	208.71	3.25	4,756.31
Total mundial	1,884.25	27.12	5,819.20

Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO (2014).

De los 121 países productores de caña de azúcar, los principales son: Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán y México, cuya producción conjunta concentra aproximadamente el 76% del total mundial (Ver Gráfica 3).



La mayor parte de la caña de azúcar producida a nivel mundial se consume internamente en los mismos países productores, quienes destinan el producto principalmente a las industrias de azúcar y alcohol. Esto se refleja en el hecho de que prácticamente los mismos países que dominan las listas de producción mundial, son también los principales consumidores de caña de azúcar en el mundo.

De acuerdo a los datos de FAO, para el período 2013/2014, el consumo mundial de caña de azúcar fue de 1,877.7 millones de toneladas (mdt), el primer lugar lo ocupó Brasil, cuyo nivel de consumo fue de 739.27 mdt, siguiéndole India, China, Tailandia y Pakistán. En el caso de México el consumo fue de 61.18 mdt (Ver *Tabla 4*).

Tabla 4. Consumo de caña de azúcar (2014)

País	Consumo (Millones de t)
Brasil	739.27
India	341.20
China	129.13
Tailandia	100.10
Pakistán	61.75
México	61.18
Colombia	34.87
Indonesia	33.70
Filipinas	31.87
EE.UU	27.92
Australia	27.14
Guatemala	26.33
Argentina	23.70
Otros países	239.58
Total mundial	1,877.73

Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO (2014).

Con respecto al intercambio comercial de la caña de azúcar en 2014 los principales países exportadores fueron la República Democrática Popular Lao, Malasia, Colombia, China y México, los cuales en conjunto exportaron 96.8% del total mundial, es decir, 42,788 t. En cuanto a los países importadores de dicho

producto, destacan por su importancia China, Estados Unidos, Venezuela, Arabia Saudita y Kuwait, quienes compraron en 2014 el 99.7% del total mundial (Ver *Tabla 5*).

Tabla 5. Exportaciones e importaciones de caña de azúcar (2014)

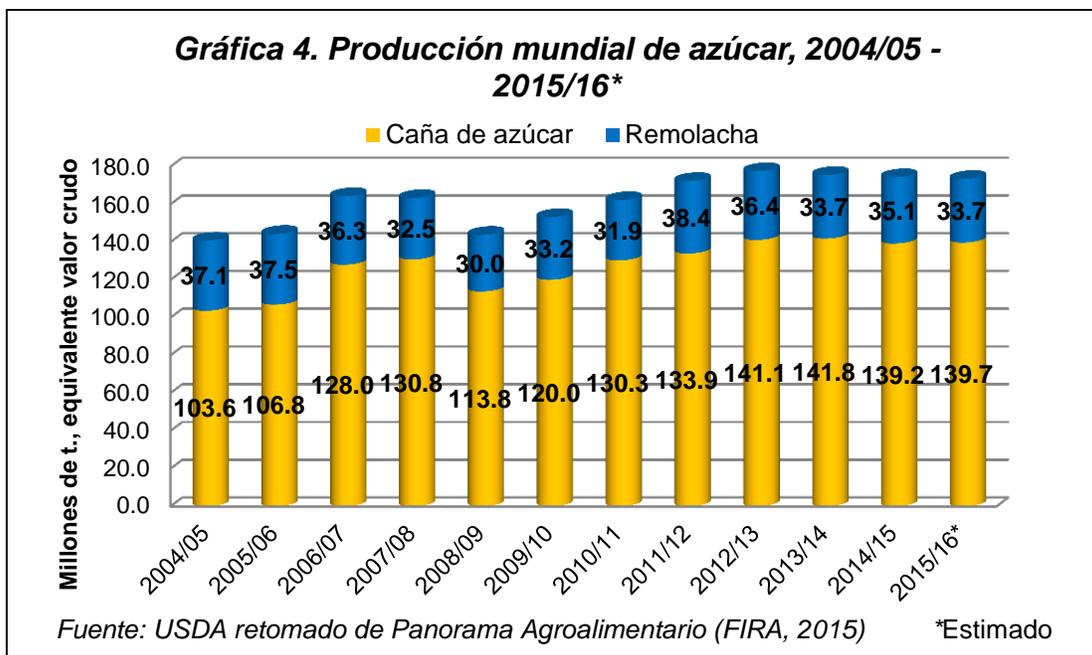
País	Exportaciones (toneladas)	País	Importaciones (toneladas)
República Democrática Popular Lao	23,431	China	928,185
Malasia	9,532	EE.UU	12,390
Colombia	6,166	Venezuela	9,905
China	2,675	Arabia Saudita	9,476
México	984	Kuwait	1,991
Indonesia	435	Canadá	733
Costa Rica	249	República de Corea	585
Pakistán	195	Bélgica	290
EE.UU	126	Chipre	122
Tailandia	92	Países Bajos	91
Otros países	318	Otros países	869
Total mundial	44,203	Total mundial	964,637

Fuente: Elaboración propia con datos de la FAO (2014).

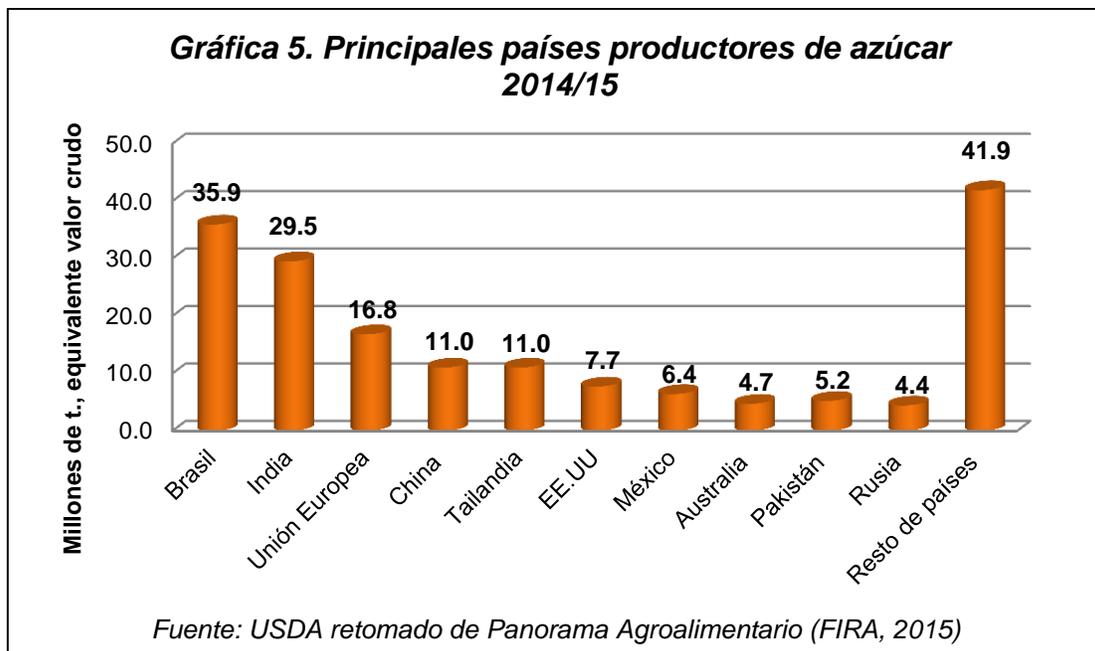
4.1.2. Producción mundial de azúcar

Se sabe que, la obtención de azúcar en el mundo se logra, principalmente, a través de la extracción del jugo o miel de dos productos: la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Del total de la producción mundial de azúcar, cerca del 70% proviene de la caña de azúcar y el resto de la remolacha azucarera (Claridades Agropecuarias, 2004, p.7). Sin embargo, entre los ciclos azucareros 2004/05 y 2015/16 alrededor del 78% de la producción mundial de azúcar proviene de la caña de azúcar.

Según los reportes del USDA, la producción mundial del azúcar, en el lapso de 2004/05 a 2015/16 se ubicó en 162.1 millones de toneladas (mdt) en promedio, con una tasa promedio anual de 2.2%. Durante el ciclo 2012/13 se reportó el nivel máximo de producción con 175.5 mdt., para 2014/15 la producción fue de 174.3 mdt. (Ver *Gráfica 4*)



A nivel particular, los principales países productores de azúcar son: Brasil, India, la Unión Europea, China, Tailandia y México, que en conjunto aportan el 67.8% de la producción global del edulcorante (Ver Gráfica 5).



Brasil se ha convertido en el principal país productor de azúcar, donde prácticamente la mayoría de ésta se obtiene de la caña de azúcar, a tal grado que hoy en día tiene una fuerte influencia sobre la tendencia de los precios

internacionales del dulce. En la zafra 2014/15 la producción de azúcar en Brasil fue de 35.9 mdt, lo que representó el 20.6% de la producción global.

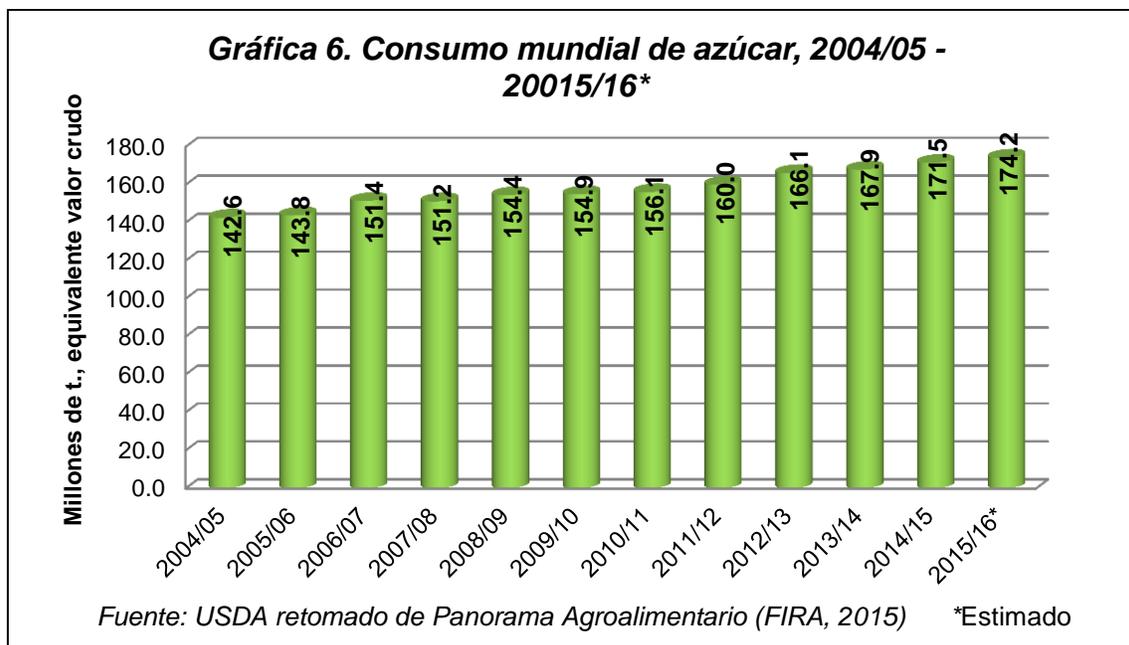
La India, es el segundo mayor productor de azúcar en el mundo, durante el ciclo 2014/15 la producción del dulce en este país alcanzó 29.5 mdt, es decir, dicho volumen representó el 16.9% del volumen total mundial del edulcorante.

Por su parte, México se posicionó en el sexto lugar (no tomando en cuenta a la Unión Europea, la cual produce en su mayoría azúcar de remolacha) con una producción de 7.7 mdt, lo cual representó el 3.7% de la producción total mundial. Si bien es cierto el país está muy lejos de alcanzar los niveles de producción de países como Brasil, India y China; sin embargo, México tiene un gran potencial productivo gracias a las favorables condiciones climáticas para el cultivo de la caña de azúcar, la riqueza de sus suelos y las mayores inversiones que se están haciendo para aumentar la productividad en las plantaciones de caña de azúcar, lo anterior está originando que la producción azucarera mexicana tenga una mayor participación en el mercado mundial.

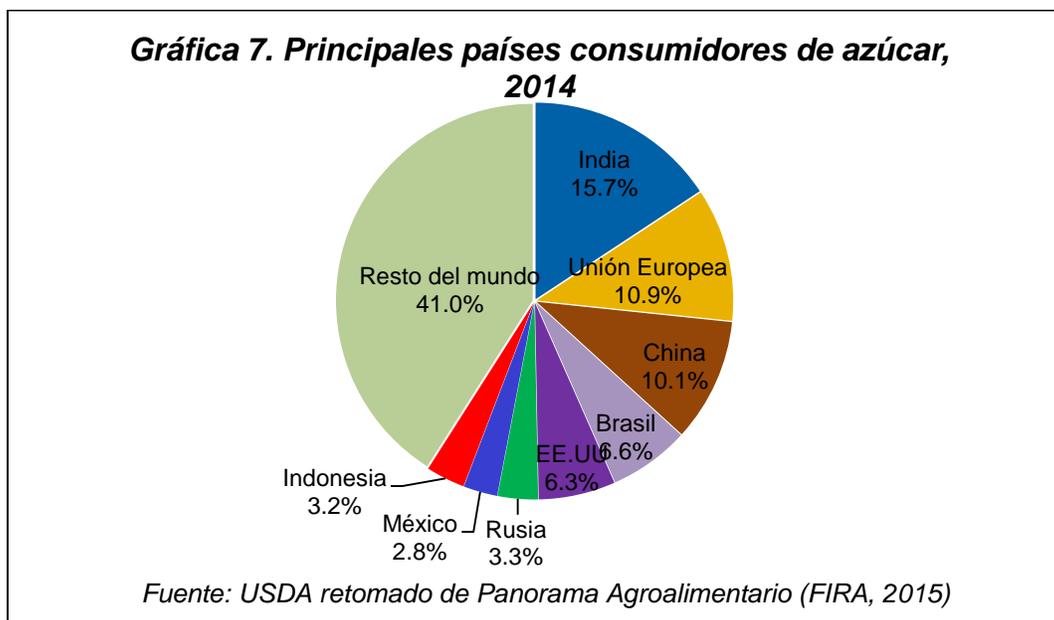
4.1.3. Consumo mundial

De acuerdo con FAO, se estima que el consumo global de azúcar se mantendrá con una tendencia a la alza en el corto y largo plazo, impulsado por un mayor consumo en países en vías de desarrollo (FAO, 2015 citado por FIRA, 2015). Lo anterior depende principalmente del crecimiento poblacional, el ingreso, el precio y la demanda de productos sustitutos. La tendencia a la que se hace referencia se puede observar en la *Gráfica 6*, en donde el consumo mundial de azúcar entre el periodo 2004/05 - 2014/15 creció a una tasa promedio anual de 0.7%. El consumo promedio anual de azúcar fue de 157.8 mdt, para el periodo ya mencionado.

Es importante destacar que la demanda de azúcar se concentra principalmente en el uso industrial para consumo humano a través de la fabricación de alimentos, bebidas y diversas preparaciones (FIRA, 2015, p.6).



Los principales países productores de azúcar figuran también como los consumidores, destacando los casos de India, Unión Europea, China, Brasil, Estados Unidos, Rusia y México que en conjunto concentraron en 2014 el 55.7% del consumo mundial de azúcar, es decir, 95.5 mdt. (Ver Gráfica 7).



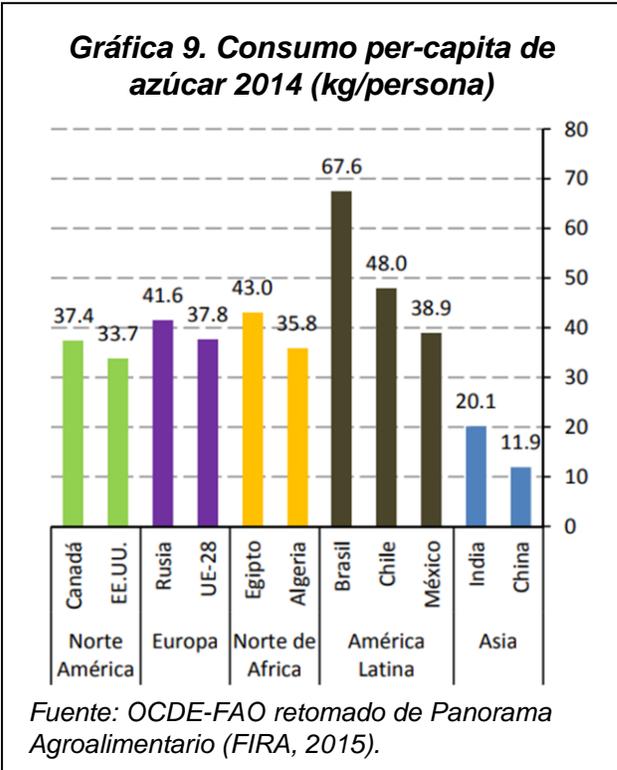
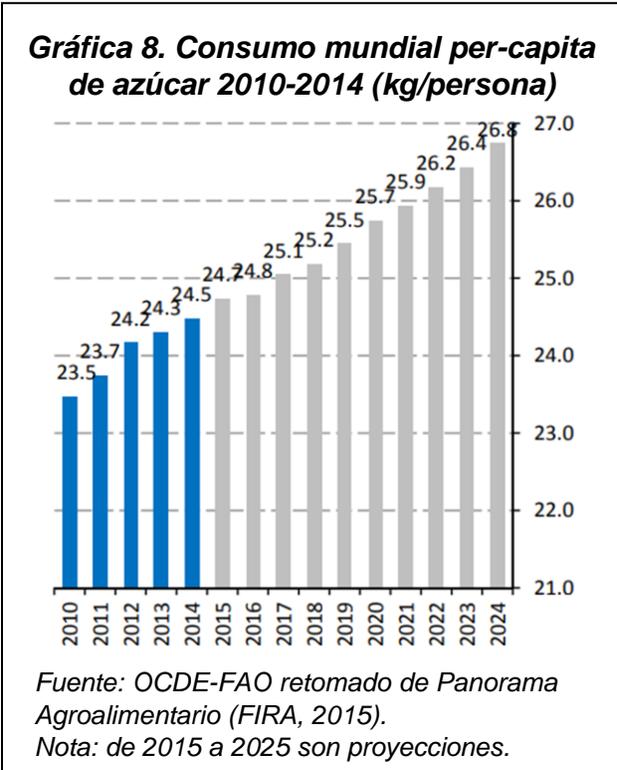
India en 2014 consumió cerca del 16% del azúcar que se consume en todo el mundo, el consumo en este país ha incrementado gracias a la política de ofrecer el producto a un precio por abajo del mercado a un sector de la población, lo que

aunado al crecimiento de la población y de los ingresos de algunos sectores, le ha permitido mantener altas tasas de crecimiento en la demanda de azúcar.

China consumió en promedio 17.3 mdt., lo que representa el 10.1% del total mundial. Este país se ha caracterizado en los últimos años por impulsar el consumo de azúcar de origen natural y disminuir el uso de azúcares sintéticos, aunado a esto, al ser China el país con mayor población del mundo y al presentar una mejoría en el ingreso de la población gracias al dinamismo de su economía, ha permitido el alza en el consumo de azúcar per cápita (11.9 kg).

En México el azúcar es un producto de consumo popular, es el dulce que de una u otra forma no puede faltar en la mesa de su población. Pero además, la industria mexicana de alimentos también es un fuerte consumidor de azúcar, que incluso ha buscado la sustitución por otro tipo de productos como la alta fructuosa en la industria de bebidas.

Con lo que respecta al consumo per-cápita global, este muestra un aumento al pasar de 23.5 kg en 2010 a 24.7 kg en 2015. Las proyecciones de la OCDE indican que el consumo per-cápita se incrementará en un cuarto de kilo por año hasta el 2024 (Ver Gráfica 8).

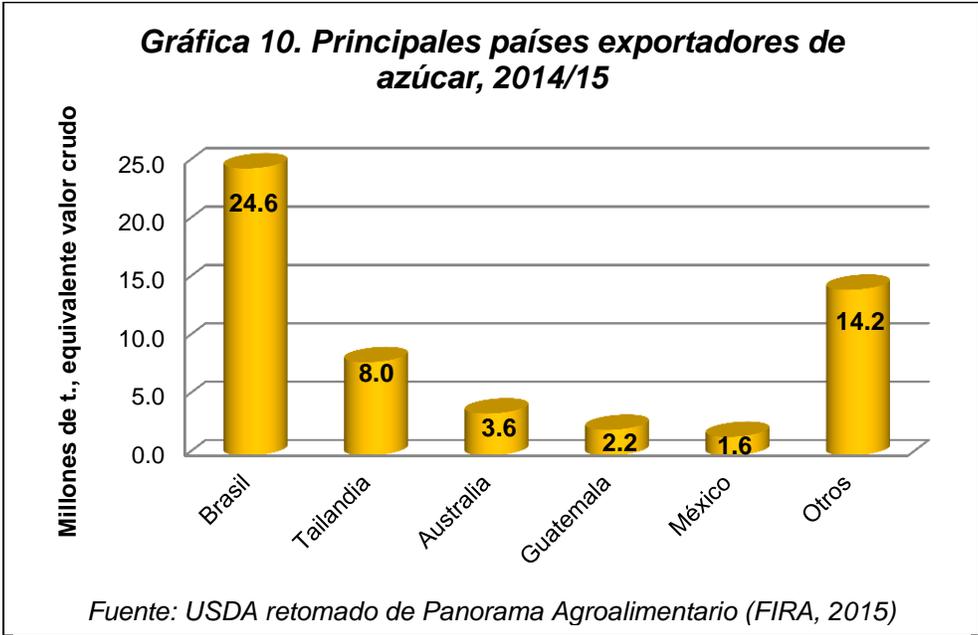


En la *Gráfica 9*, se puede apreciar el consumo per-cápita de azúcar en 2014 de algunos países, en América Latina el mayor consumo per-cápita lo tienen Brasil, Chile y México con 67.6, 48.0 y 38.9 kg, respectivamente.

4.1.4. Comercio internacional

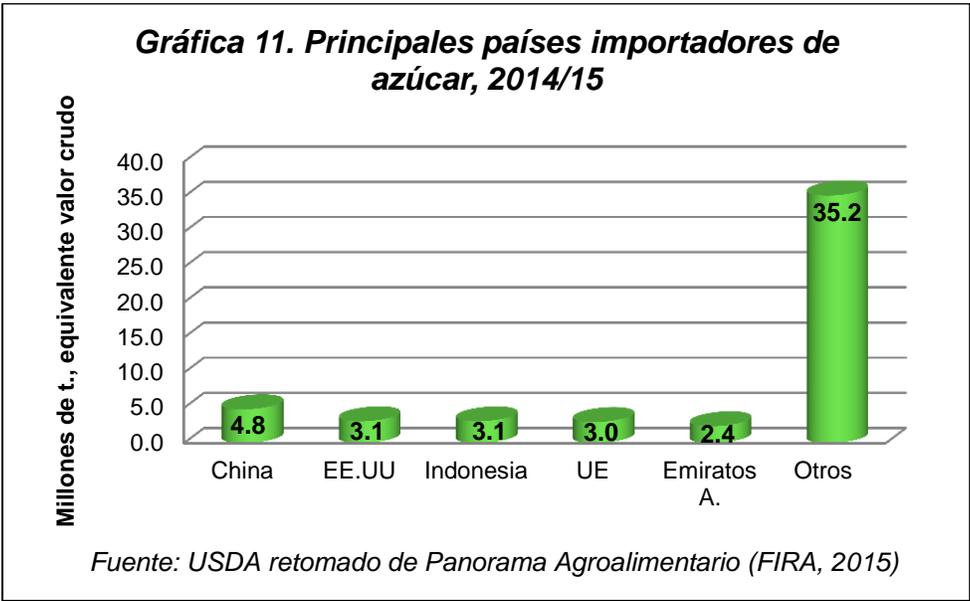
Durante 2014/15, el 31.1% de la producción mundial de azúcar se comercializó en los mercados internacionales, es decir, 54.2 mdt., mientras que el 68.9% de la producción total se comercializó en los mercados locales. Las exportaciones totales de azúcar crecieron a una tasa promedio anual de 1.4 entre 2004/05 y 2014/15 (FIRA, 2015).

En la *Gráfica 10*, se aprecia que las exportaciones globales de azúcar fueron de 54.2 mdt. Brasil ocupó el primer lugar con el 45.4%, seguido de Tailandia con 14.8%, Australia con 6.6%, Guatemala con 4.1% y México con 3.0%. Estos cinco países participan en conjunto con el 73.8% del volumen total de exportaciones en 2014/15, lo que representa 40 mdt.



En cuanto a las importaciones de azúcar, éstas sumaron 51.6 mdt.; sin embargo, están menos concentradas que las exportaciones, ya que los cinco principales

países importadores concentran, en conjunto, el 31.8% del volumen total en 2014/15.



China participó con el 9.3% de las importaciones mundiales de azúcar, también destacan Estados Unidos con el 6.0%, Indonesia con 6.0%, la Unión Europea con 5.8% y Emiratos Árabes con el 4.7% de las compras de azúcar en el mercado internacional (Ver Gráfica 11).

4.1.5. Precios

Los precios internacionales para el comercio del azúcar tienen como principal referente el contrato #11. En la Gráfica 12, se puede observar que el precio internacional del azúcar ha mantenido una tendencia a la baja, tan es así que en 2015 se registraron los menores niveles de precios; sin embargo, en el último trimestre de ese mismo año se revirtió la tendencia en el precio internacional lo que provocó que en septiembre de 2016 se alcanzara un valor de 21.35 centavos de dólar por libra (23.53 dl por bulto de 50 kg), el cual es el máximo alcanzado desde julio de 2012.



4.2. Mercado nacional

4.2.1. Aspectos socioeconómicos de la industria azucarera

En México la agroindustria azucarera es una de las más importantes debido a su relevancia económica y social, durante la zafra 2015/2016 la agroindustria de la caña de azúcar represento el 0.47% del PIB general y el 9% del PIB primario (SAGARPA, 2016), ello ubica a la caña de azúcar como el segundo producto agrícola más valioso en el país, tan sólo detrás del maíz en grano. Se considera una actividad de alto impacto en 227 municipios compuestos por alrededor de 12 millones de habitantes. En su conjunto, la industria azucarera genera más de 450 mil empleos (equivalente a 0.9% y 6.7% de la Población Económicamente Activa total y del sector primario, respectivamente) y beneficios directos a más de 2.2 millones de personas (Banco de México, 2013). Las actividades productivas de la caña de azúcar se concentran en 15 estados de la república con climas tropicales o subtropicales, entre los cuales destacan Veracruz, San Luis Potosí y Jalisco al aportar casi el 60% de la producción nacional de caña y azúcar.

La industria azucarera en el país cuenta con la capacidad de abastecer la demanda nacional, y es capaz de generar excedentes que históricamente se han destinado principalmente al mercado regional de América del Norte, en su mayoría a Estados Unidos (FIRA, 2015).

Desde el ciclo 2012/13 el excedente de producción ha llevado a la necesidad de incursionar en nuevos mercados; sin embargo, ante la disminución de los precios internacionales del azúcar, se han considerado alternativas tales como: destinar caña a la producción sustentable de biocombustibles para el mercado nacional, para la producción de alcohol, así como productos y subproductos, con lo que se aprovecharían los altos niveles de producción de caña de azúcar alcanzados (Diario Oficial de la Federación, 2014).

4.2.2. Producción nacional

La producción mensual de caña de azúcar en México inicia en octubre y concluye en septiembre del siguiente año (FIRA, 2015). En general, dadas las condiciones climatológicas del cultivo de la caña su producción se distribuye en 6 regiones geográficas del país las cuales se integran por las siguientes entidades federativas:

-  Noroeste: Sinaloa
-  Pacífico: Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán
-  Centro: Puebla y Morelos
-  Noreste: Tamaulipas y San Luis Potosí
-  Golfo: Veracruz, Tabasco, y Oaxaca.
-  Sur: Chiapas, Campeche y Quintana Roo

En el ciclo azucarero 2015/16 se industrializaron 778,930 hectáreas de caña de azúcar en México. Entre las principales entidades con superficie industrializada de caña destacaron: Veracruz con una participación del 41.6%, San Luis Potosí con 11.5% y Jalisco con 9.6% del total nacional.

En términos de producción, en la zafra 2015/16 la producción nacional de azúcar fue de 6.1 millones de toneladas, en la *Tabla 6* se observa que las entidades que presentan la mayor eficiencia en cuanto al rendimiento en campo y fábrica son Morelos y Puebla seguidos de Michoacán, Chiapas, Jalisco y Nayarit. Estas entidades reportaron los rendimientos más altos expresados en toneladas de caña de azúcar por hectárea y de azúcar obtenida por hectárea. Cabe mencionar que en dichas entidades el 96% del total de la superficie sembrada se cultiva bajo condiciones de riego (FIRA, 2015). Sin embargo, por la cantidad de azúcar producida siguen destacando los estados de Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí que contribuyen con el 37.9%, 13% y 10.1% respectivamente de la producción total de azúcar de caña.

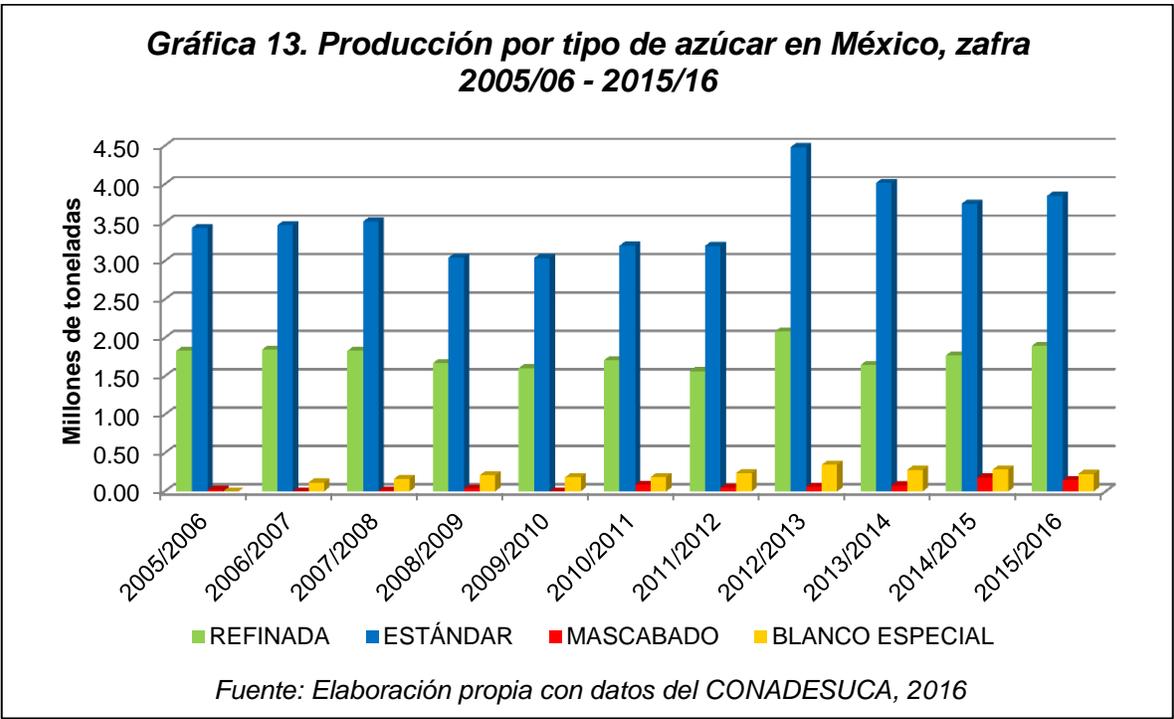
Tabla 6. Producción de azúcar en México (zafra 2015/16)

ESTADO	No. DE INGENIOS	CAÑA MOLIDA (t)	AZÚCAR PRODUCIDA (t)	SUPERFICIE COSECHADA (ha)	RENDIMIENTO EN CAMPO (t de caña/ha)	RENDIMIENTO EN FÁBRICA (t de azúcar/ha)
Campeche	1	792,519	82,428	14,821	53.47	5.56
Chiapas	2	2,785,136	302,307	30,503	91.31	9.91
Colima	1	1,425,200	162,549	17,794	80.09	9.14
Jalisco	6	6,762,177	792,502	74,393	90.90	10.65
Michoacán	3	1,399,332	160,028	15,099	92.68	10.60
Morelos	2	1,645,455	228,157	16,033	102.63	14.23
Nayarit	2	2,838,567	333,149	31,316	90.64	10.64
Oaxaca	3	3,297,594	372,013	53,944	61.13	6.90
Puebla	1	1,810,879	228,797	15,382	117.73	14.87
Quintana Roo	1	1,335,437	129,960	30,090	44.38	4.32
San Luis Potosí	4	5,399,255	618,024	89,869	60.08	6.88
Sinaloa	1	264,043	25,769	2,984	88.49	8.64
Tabasco	3	1,959,237	200,103	38,034	51.51	5.26
Tamaulipas	2	1,612,531	160,361	25,017	64.46	6.41
Veracruz	18	20,861,246	2,320,901	323,650	64.46	7.17
NACIONAL	50	54,188,609	6,117,048	778,930	69.57	7.85

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA, zafra 2015/16

La superficie de caña de azúcar cosechada o para industrializar durante los últimos años ha mostrado un dinamismo importante, ya que creció a una tasa promedio anual de 1.7% entre 2005/06 y 2015/16, mientras que la producción de azúcar creció a una tasa promedio del 1.5% durante el mismo periodo.

En México se producen diferentes tipos de azúcar, entre los que destacan: azúcar estándar, refinada, mascabado y blanco especial. La mayor parte de la producción nacional durante el periodo 2005/06 – 2015/16 en promedio fue de azúcar estándar (63.5% del volumen total), seguida por el azúcar refinada (31.9%), azúcar blanco especial (3.6%) y mascabado (1.1%).



En las últimos diez zafras, el dinamismo de la producción difiere por tipo de azúcar. La producción de azúcar estándar creció a una tasa media anual de 1.2% entre 2005/06 y 2015/16, la producción de azúcar refinada creció en 0.3% para el mismo periodo, mientras que la producción de azúcar mascabado creció a tasa media anual de 22.9%.

4.2.3. Distribución de los ingenios azucareros

La industrialización de la caña con el fin de transformarla en azúcar se llevó a cabo en la zafra 1997/98 en 60 ingenios, sin embargo por la problemática que presenta la agroindustria azucarera mexicana en la zafra 2015/16 únicamente operaron 50 ingenios azucareros los cuales pueden observarse en la *Figura 7*.



En la *Tabla 7* se presenta un listado de los ingenios agrupados por estado que operan actualmente. Como se puede observar el principal estado productor de azúcar, Veracruz, operó con 18 ingenios, que representan el 36% del total de ingenios en función. Asimismo, el grupo o consorcio que más participación tiene en el manejo de los ingenios es Beta San Miguel que cuenta con nueve ingenios en el país, ubicados en Colima, Jalisco, Morelos, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz; le sigue Zucarmex e Independientes.

Tabla 7. Distribución de los ingenios azucareros (zafra 2015/16)

ESTADO	PARTICIPACIÓN (%)	CONSORCIO	INGENIO
Campeche	2	GRUPO AZUCARERO DEL TRÓPICO	La Joya
Chiapas	4	PORRES	Huixtla
		ZUCARMEX	Pujiltic (Cia. La Fe)
Colima	2	BETA SAN MIGUEL	Quesería
Jalisco	12	SANTOS	Bellavista
		GRUPO LA MARGARITA	José María Morelos
		ZUCARMEX	Melchor Ocampo
		BETA SAN MIGUEL	San Francisco Ameca
		GRUPO AZUCARERO DE MÉXICO	Tala (Jose Ma. Martínez)
		SÁENZ	Tamazula
Michoacán	6	GRUPO AZUCARERO DE MÉXICO	Lázaro Cárdenas
		SANTOS	Pedernales
		PORRES	Santa Clara
Morelos	4	BETA SAN MIGUEL	Central Casasano
		BETA SAN MIGUEL	Emiliano Zapata
Nayarit	4	INDEPENDIENTES	El Molino
		INDEPENDIENTES	Puga
Oaxaca	6	GRUPO PROMOTORA INDUSTRIAL AZUCARERA	Adolfo López Mateos
		GRUPO MOTZORONGO	El Refugio
		GRUPO LA MARGARITA	Pablo Machado (La Margarita)
Puebla	2	ZUCARMEX	Atencingo
Quintana Roo	2	BETA SAN MIGUEL	San Rafael De Pucté
San Luis Potosí	8	SANTOS	Alianza Popular
		SANTOS	Plan De Ayala
		GRUPO PROMOTORA INDUSTRIAL AZUCARERA	Plan De San Luis
		BETA SAN MIGUEL	San Miguel Del Naranjo
Sinaloa	2	GRUPO AZUCARERO DE MÉXICO	Eldorado
Tabasco	6	INDEPENDIENTES	Azsuremex
		GRUPO AZUCARERO DE MÉXICO	Presidente Benito Juárez
		BETA SAN MIGUEL	Santa Rosalía
Tamaulipas	4	SÁENZ	Aarón Sáenz Garza
		SÁENZ	El Mante
Veracruz	36	BETA SAN MIGUEL	Central La Providencia
		GRUPO MOTZORONGO	Central Motzorongo
		GRUPO LA MARGARITA	Central Progreso
		BETA SAN MIGUEL	Constancia
		SANTOS	Cuatotolapam (Ciasa)

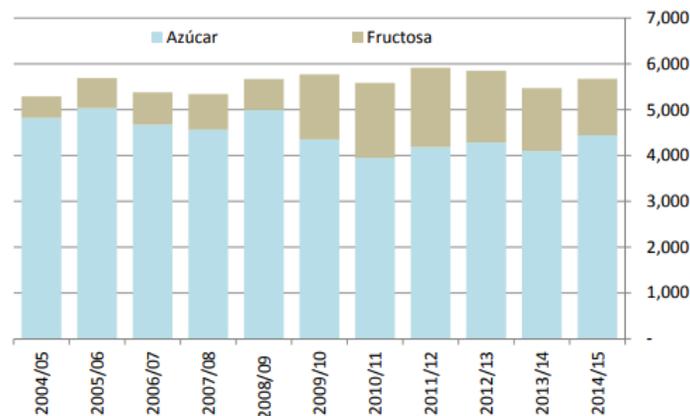
	GARCÍA GONZÁLEZ	El Carmen
	ZUCARMEX	El Higo
	PORRES	El Modelo
	FEESA	El Potrero
	GRUPO AZUCARERO DEL TROPICO	La Gloria
	ZUCARMEX	Mahuixtlán
	INDEPENDIENTES	Pánuco
	ZUCARMEX	San Cristóbal
	INDEPENDIENTES	San José de Abajo
	FEESA	San Miguelito
	INDEPENDIENTES	San Nicolás
	PORRES	San Pedro
	GRUPO PROMOTORA INDUSTRIAL AZUCARERA	Tres Valles

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA

4.2.4. Consumo nacional

El consumo nacional de edulcorantes en México durante la zafra 2014/15 se ubicó en 5.67 mdt de los cuales 4.44 mdt fueron de consumo de azúcar (78.3%), en tanto la fructosa (Jarabe de Maíz de Alta Fructosa, principal competidor del azúcar) registró un consumo de 1.23 mdt (21.7%) (Ver Gráfica 14). El consumo de edulcorantes durante el periodo 2004/05 – 2014/15 ha presentado un pequeño aumento a una tasa promedio anual de 0.7%.

Gráfica 14. Consumo de edulcorantes en México, 2004/05 -2014/15



Fuente: CONADESUCA retomado de Panorama Agroalimentario (FIRA, 2015)

En 2014, el consumo per-cápita de azúcar en México fue de 38.9 kilogramos de azúcar por persona por año. Durante los últimos 5 años, el consumo per-cápita pasó de 36.42 en 2010 a 38.91 kilogramos en 2014; lo anterior representa un aumento en 1.7 por ciento a tasa promedio anual, o bien, en términos absolutos, un aumento anual de 0.490 kilogramos.

Algunos analistas indican que el consumo de azúcar en el país se incrementó, por un lado, debido a las restricciones a los cupos de importación de azúcar impuesta por EE.UU a las exportaciones de azúcar mexicana hacia ese país y, por el otro, a que el precio nacional es superior al internacional por lo que industriales prefieren vender el producto en el mercado nacional (FIRA, 2015).

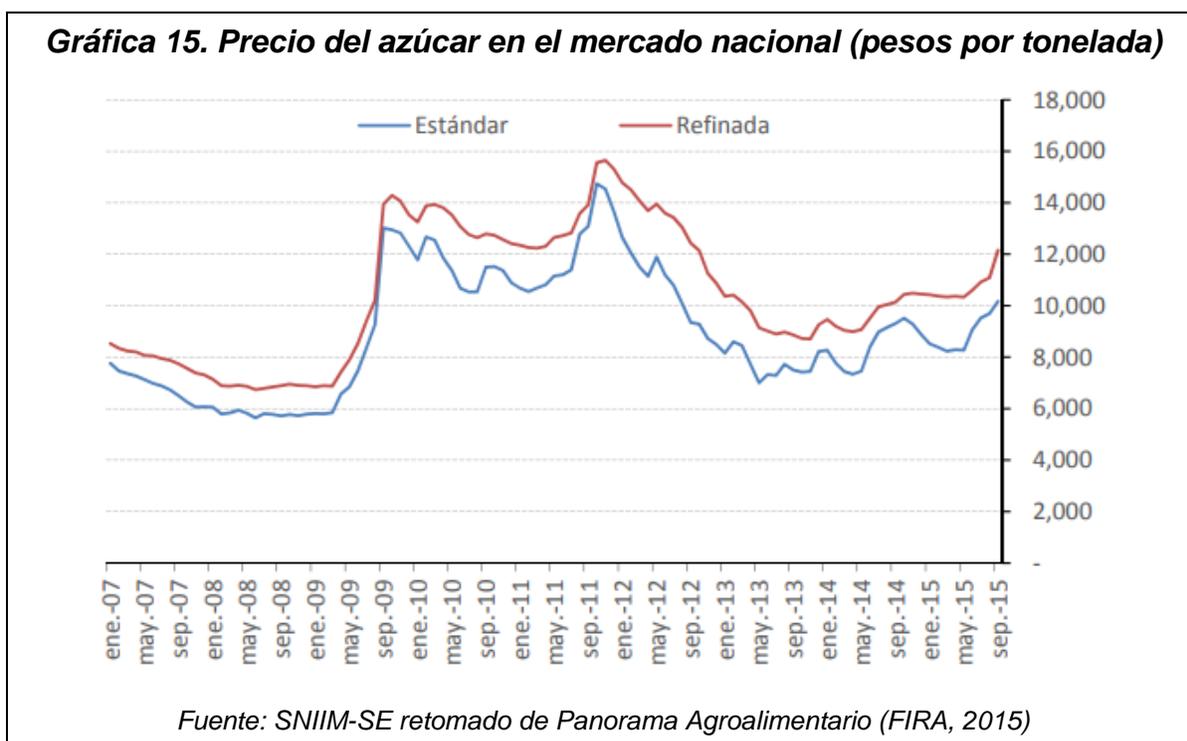
4.2.5. Intercambio comercial

México en 2014/15 exportó 1.7 millones de toneladas de azúcar, a nivel mundial el país participó en el mercado azucarero con el 3.0% del total del volumen de las exportaciones, por lo cual se ubicó en el 5° lugar entre los países exportadores (FIRA, 2015). En junio de 2015 hubo una reducción en las exportaciones nacionales debido al establecimiento del cupo de importación impuesto por Estados Unidos al azúcar mexicana. Más del 90% del volumen de las exportaciones mexicanas de azúcar tienen como destino Estados Unidos y le sigue Puerto Rico.

Por su parte, las importaciones de azúcar de México se realizan al amparo de cupos de importación con un arancel preferencial mediante el mecanismo de cupos, con el fin de asegurar el abasto y mantener la estabilidad del precio del azúcar para la industria alimentaria y los hogares. Los principales países de origen de las importaciones de azúcar en México provienen de Guatemala, Nicaragua, Brasil y Colombia (Secretaría de Economía, 2012). Durante el ciclo azucarero 2014/15 se reportaron en 91.9 miles de toneladas (FIRA, 2015).

4.2.6. Precios nacionales

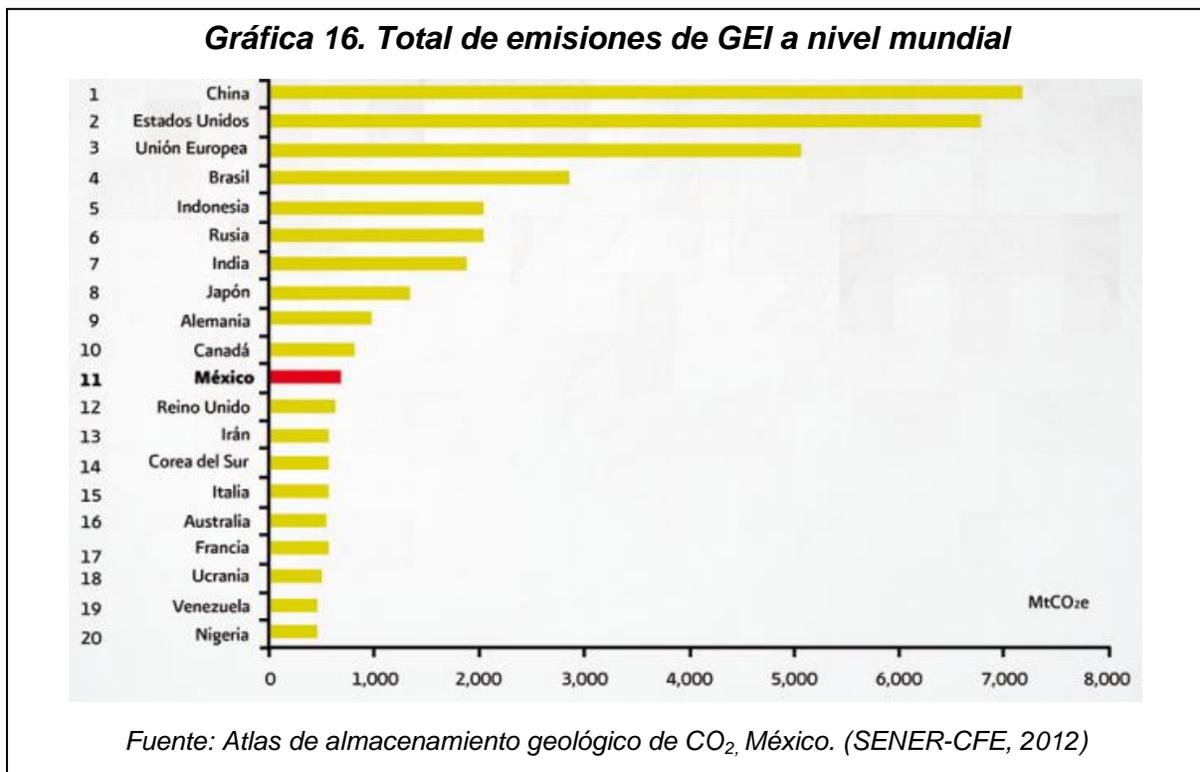
A nivel nacional, debido a que el azúcar es un producto de origen agroindustrial, existen diferentes tipos de precio de acuerdo al estado o fase en el que se encuentra el producto, es decir desde que es un producto primario (caña de azúcar) hasta que es un producto agroindustrial (azúcar). En este sentido, los precios para el edulcorante son: el precio de referencia por tonelada de azúcar, el precio de referencia para el pago de caña de azúcar (precio pagado al productor primario), precios al mayoreo y menudeo en centrales de abasto, y precios al consumidor. Dichos precios están sujetos también al comportamiento de los precios internacionales (FIRA, 2015).



Para 2015 los precios nacionales de azúcar estándar y refinada alcanzaron los 10,000 y 12,000 pesos por tonelada; sin embargo, el comportamiento de los precios a nivel nacional ha mostrado un gran dinamismo, el máximo alcanzado entre 2007 y 2015 fue en 2011 con un monto entre los 15,000 y 16,000 pesos dependiendo del tipo de azúcar (Ver Gráfica 15).

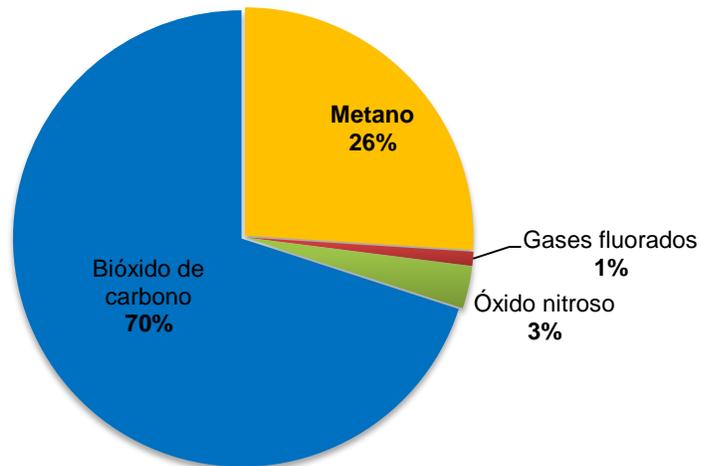
CAPITULO V. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GLOBALES Y EN MÉXICO

En México en 2010 se emitieron un total de 748 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.), lo cual contribuyó con el 1.6% del total de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Esto posicionó a México en el décimo primer lugar entre los países con mayores emisiones, sin embargo, en comparación con los países industrializados sus emisiones son relativamente bajas (Ver *Gráfica 16*). Estados Unidos y Canadá ocupan los primeros lugares contribuyendo con al menos el 40% de las emisiones totales (ONU, 2016)



Dentro de la distribución de las emisiones de GEI en México por tipo de gas, como lo muestra la *Gráfica 17*, el CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante con una participación del 70% (493 millones de toneladas de CO₂), siguiéndole el metano con una menor participación (26%).

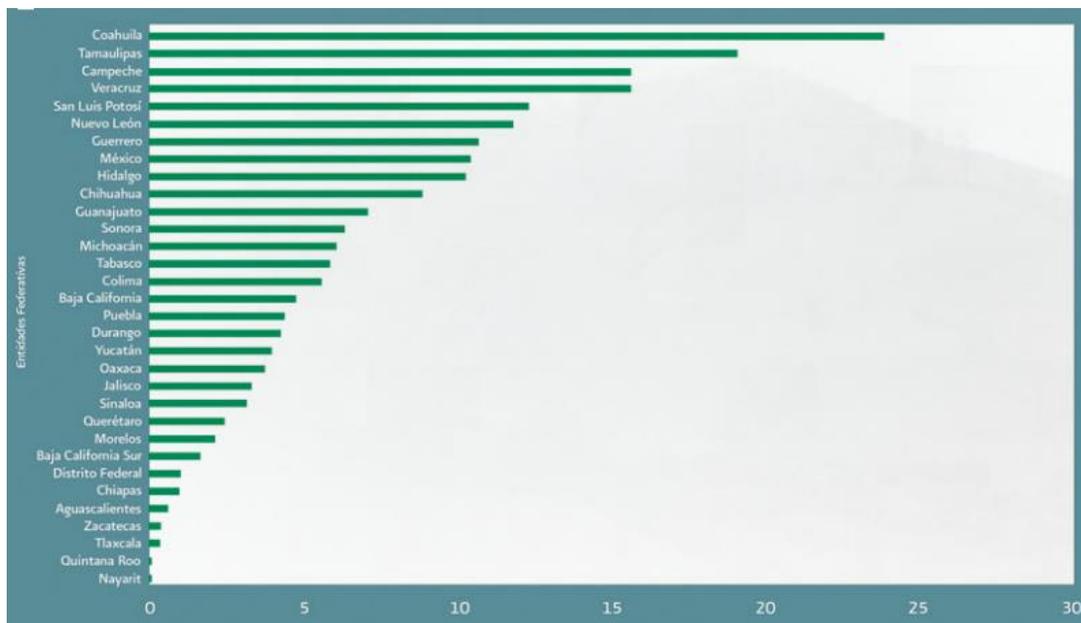
Gráfica 17. Emisiones de GEI por tipo de gas en México



Fuente: Atlas de almacenamiento geológico de CO₂, México. (SENER-CFE, 2012)

El CO₂ se encuentra naturalmente en la atmósfera, sin embargo las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, cambio de uso de suelo, deforestación, entre otros, aumentan significativamente su concentración en la atmósfera contribuyendo al calentamiento global.

Gráfica 18. Emisiones por entidad federativa (millones de toneladas CO₂)



Fuente: Atlas de almacenamiento geológico de CO₂, México. (SENER-CFE, 2012)

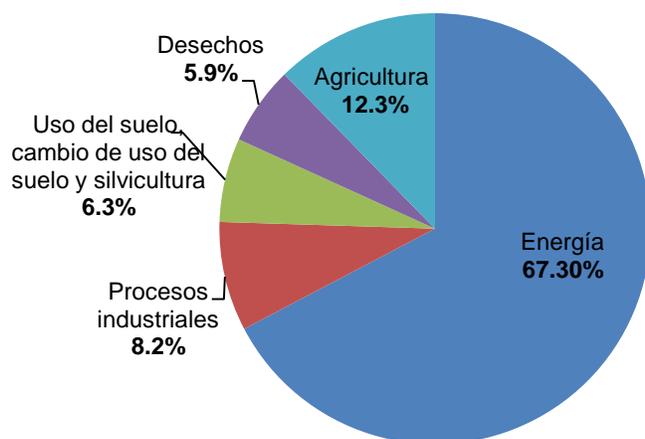
En México del total de emisiones de GEI por entidad federativa, Coahuila es quien reporta mayores emisiones con un total de 24 millones de toneladas de CO₂, el segundo lugar lo ocupa Tamaulipas con una aportación de 19 millones, mientras que Campeche y Veracruz reportan emisiones de 15.5 millones de toneladas de CO₂ cada una (Ver *Gráfica 18*) (SENER-CFE, 2012).

5.1. Emisiones de GEI por sectores

Dentro del contexto internacional, la Agencia Internacional de Energía ha identificado que el sector energético contribuye con el 64% de las emisiones de GEI en el mundo, y es responsable del 84% de las emisiones de CO₂. No obstante, también existen emisiones fugitivas producidas por la liberación de gases como el metano (CH₄) (SENER-CFE, 2012).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero 1990-2010, el sector energético en México (producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos) es el principal emisor de GEI. Dicho sector, representó el 67.3% del total de las emisiones durante 2010 (Ver *Gráfica 18*), alcanzando emisiones de 516.84 millones de toneladas de CO₂ eq. Del total de las emisiones de GEI del sector en 2010, el 83.5% (415.91 Tg CO₂ eq.) correspondió a las emisiones asociadas al consumo de combustibles fósiles, y el restante 16.5% (100.93 Tg CO₂ eq.) a emisiones fugitivas. En cuanto a las emisiones asociadas al consumo de combustibles, se estiman las correspondientes a CO₂, CH₄ y N₂O. Las emisiones de CO₂ dependen del contenido de carbono en el combustible. Los otros gases obedecen a las condiciones de combustión y la tecnología. Por su parte, en las emisiones fugitivas se estiman las de CH₄ provenientes de la producción y manejo del carbón y de las actividades del petróleo y gas natural. Sin embargo, el principal gas emitido en el sector energético fue el CO₂, que contribuyó con 83.7% del total. Le siguieron las emisiones de CH₄, con 13.6% y N₂O, con 2.8% (SENER, 2012).

Gráfica 19. Participación de los sectores en las emisiones de GEI



Fuente: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010 (SEMARNAT- INECC, 2010)

Para 2010 las emisiones de GEI en unidades de CO₂ eq. generadas en el sector de energía provinieron de todo tipo de actividades económicas entre las que destaca el transporte que contribuyó con 33.0% (166,412.0 gigagramos (Gg)); industrias de la energía, 32.3% (162,969.2 Gg); manufactura e industria de la construcción, 11.3% (56,740.8 Gg); emisiones fugitivas, 16.5% (83,119.8 Gg), y otros sectores (comercial, residencial y agropecuario), 6.9% (34,575.8 Gg).

5.2. Impactos y vulnerabilidad ante el cambio climático en México

Los impactos del cambio climático se distribuyen de manera desigual en el país debido a sus diferentes climas, recursos naturales, infraestructura instalada, desarrollo económico y concentración demográfica. A pesar de ello, México se considera una de las naciones más vulnerables a los efectos del cambio climático, ya que 15% del territorio nacional, 68.2% de su población y 71% del producto interno bruto (PIB) están propensos a sufrir las consecuencias negativas de este fenómeno (Banco Mundial, 2010 citado por Sosa, 2015). A continuación en la *Tabla 8* se identifican los impactos que el país podría experimentar por el cambio climático, así como la vulnerabilidad de algunos sectores y regiones para hacerle frente.

Tabla 8. Impactos y vulnerabilidad ante el cambio climático

SECTOR	IMPACTOS	VULNERABILIDAD
Agua	Se distribuye de forma desigual espacial y socialmente: la región norte puede experimentar sequías prolongadas, mientras que la región sur podría ser afectada por lluvias torrenciales. La sequía y olas de calor pueden reducir la disponibilidad y calidad del agua. Asimismo, se proyectan más frecuentes e intensos eventos hidrometeorológicos extremos que aumentarán los riesgos de inundaciones y que podrían dañar los sistemas de distribución del vital líquido y drenaje, incrementando la exposición de la población a enfermedades transmitidas por el agua.	El rápido crecimiento demográfico y urbano ha aumentado la demanda de servicios básicos (suministro de agua y drenaje). En algunas regiones, el volumen asignado excede la disponibilidad natural, por lo que el vital líquido se transfiere desde cuencas lejanas. La falta de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales ha incrementado la contaminación de las fuentes de agua. Los asentamientos irregulares en zonas de recarga han disminuido la infiltración del agua de lluvia, favoreciendo la sobreexplotación de los acuíferos.
Bosques	Pueden favorecer la reducción de GEI al ser sumideros de CO ₂ , pero estos ecosistemas pueden verse afectados por cambios en la temperatura y precipitación, los cuales podrían favorecer la aparición de plagas y la ocurrencia de sequías, las cuales podrían aumentar los incendios forestales.	La urbanización y el desarrollo económico han impulsado la deforestación y degradación de los bosques. La deforestación ha incrementado los incendios forestales y disminuido los servicios ambientales de estos ecosistemas (el secuestro de carbono), la recarga de acuíferos y la infiltración del agua de lluvia, reduciendo su disponibilidad.
Agricultura	Cambios en la precipitación pueden aumentar la ocurrencia de sequías e inundaciones y, con ello, destruir cultivos (en especial de temporal), poniendo en riesgo la estabilidad económica de los agricultores y la seguridad alimentaria de México. La degradación del suelo y el agotamiento de las fuentes del vital líquido están afectando la productividad agrícola. Se espera que la demanda de agua con fines agrícolas aumente por el cambio climático (CC); este sector es el principal usuario con un consumo de 77% del volumen total abastecido a nivel nacional (CONAGUA, 2011).	La fuerte migración hacia las ciudades ha provocado que miles de hectáreas de cultivo se encuentren abandonadas. La productividad del suelo se ha reducido por el uso intensivo de plaguicidas y los sistemas de riego ineficientes. Muchas zonas todavía se riegan por gravedad, ya que los costos del agua son bajos y no representan su valor económico real. Asimismo, las prácticas agrícolas no cuentan con infraestructura, apoyo financiero o información climática para hacer frente a los impactos de las variaciones climáticas.

Biodiversidad	Los ecosistemas naturales más frágiles se verán afectados por el CC; algunas especies se extinguirán si se presentan variaciones en las temperaturas y precipitación (regional y local). Otros impactos esperados son la migración de especies hacia regiones con condiciones climáticas parecidas a sus hábitats de origen, la pérdida de capacidad reproductiva de diversas especies y cambios en su morfología para adaptarse.	México es un país megadiverso; esta característica lo hace más vulnerable a los impactos que el CC pudiera tener sobre las especies, algunas de las cuales son endémicas. La falta de investigación sobre los efectos que las variaciones climáticas pudieran tener sobre los ecosistemas más frágiles incrementa su vulnerabilidad.
Transporte	Este sector es uno de los principales generadores de GEI, y su infraestructura podría verse dañada por una mayor frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, los cuales favorecen la ocurrencia de inundaciones y deslizamientos. Se proyecta que la infraestructura (portuaria y carretera) de las zonas costeras será la más afectada por eventos hidrometeorológicos, así como por el aumento esperado en el nivel del mar.	La planificación y operación del sistema de transporte no ha incorporado los impactos del CC, incrementando la vulnerabilidad del sector a inundaciones y deslizamientos. Mayor concentración de población en zonas costeras por el crecimiento del turismo ha aumentado la cantidad de las personas expuestas a desastres. En algunas ciudades, el parque vehicular supera la capacidad de la infraestructura vial, provocando tráfico y mayores emisiones de GEI.
Salud	Las variaciones climáticas favorecerán el brote de enfermedades de origen hídrico y la ocurrencia de olas de calor y frío; estos eventos aumentarán la morbilidad y mortalidad en el país. En el norte, las muertes por altas temperaturas (superiores a 50° C) han aumentado, y continuará por el CC. En el sur, los casos de dengue y malaria se incrementarán por las variaciones climáticas.	Las altas temperaturas pueden afectar la salud de las personas, especialmente a los ancianos, niños y pobres, quienes están más expuestos a padecer deshidratación, golpes de calor, así como enfermedades transmitidas por el agua (en particular, las de tipo gastrointestinal). En todas las regiones del país, el número de enfermedades diarreicas agudas podría aumentar.
Turismo	La temperatura superficial del mar en el Caribe, Golfo de México y Pacífico mexicano podría aumentar en hasta 2° C causando huracanes, olas de calor, tormentas intensas y sequías más frecuentes e intensas; estos eventos afectarán en particular a centros turísticos de playa del país. El aumento en el nivel del mar también podría tener consecuencias negativas para el sector turístico y la población de las zonas costeras. Los	Por su ubicación, la infraestructura turística en los centros de playa podría ser dañada por eventos hidrometeorológicos extremos, por ende, el CC podría incrementar la exposición de la infraestructura y la población que reside en estas zonas. Por la pérdida acelerada de manglares en las zonas costeras, los impactos de estos eventos extremos podrían aumentar, afectando a

	<p>impactos del CC en áreas turísticas incluyen: pérdidas de empleo y desplazamiento de gran parte de la población en búsqueda de oportunidades laborales.</p>	<p>la población y actividades económicas de estas regiones.</p>
Energía	<p>El crecimiento demográfico y la concentración de las actividades económicas han aumentado tanto la producción como el consumo de energía y, con ello, también las emisiones de GEI y las variaciones en la temperatura y precipitación. En el norte del país, la demanda de energía ha crecido por el mayor uso de los sistemas de aire acondicionado; se proyecta que ésta se incrementará si la temperatura continúa ascendiendo. La ocurrencia de más frecuentes e intensos eventos naturales extremos podría poner en riesgo la infraestructura para la producción de electricidad y petróleo; por ejemplo, temperaturas más altas reduciría la eficiencia en la transmisión de electricidad y la generación de energía hidroeléctrica podría verse afectada por la reducción de los niveles de agua de las presas.</p>	<p>La infraestructura para la generación de energía es insuficiente para satisfacer la creciente demanda de electricidad. Gran parte de esta infraestructura (para la generación de electricidad y extracción y procesamiento del petróleo) está expuesta a ser destruida por fenómenos hidrometeorológicos extremos por su ubicación. Estos eventos podrían aumentar en frecuencia e intensidad por el CC. La infraestructura petrolera podría ser severamente afectada por huracanes: en el Golfo de México hay 215 plataformas de petróleo que tendrían que suspender su funcionamiento por la ocurrencia de estos eventos (SENER, 2008) causando grandes pérdidas económicas. El funcionamiento de las centrales hidroeléctricas también podría ser afectado por fuertes lluvias y sequías.</p>
Socio-económico	<p>El CC puede afectar la salud de la población y actividades económicas, incrementando la pobreza del país. Sequías y lluvias intensas pueden aumentar la pérdida de cultivos, amenazando la seguridad alimentaria y los ingresos de los agricultores, quienes suelen ser de los grupos más marginados. La disponibilidad y calidad del agua podría reducirse por aumentos en la temperatura y reducciones en la precipitación, favoreciendo la sobreexplotación de los acuíferos y transferencia de agua de fuentes distantes. Una mayor escasez podría provocar conflictos, en particular en zonas con estrés hídrico.</p>	<p>Las poblaciones que viven en asentamientos irregulares están en mayor riesgo a ser dañadas por impactos del CC, ya que suelen localizarse en zonas propensas a ser afectadas por inundaciones, deslizamientos o falta de servicios públicos. Los eventos hidrometeorológicos, en particular las sequías, han aumentado la migración de las zonas rurales a las ciudades, acelerando el crecimiento demográfico y, con éste, el incremento de la demanda de servicios y empleo. Estas demandas no han logrado ser satisfechas, situación que incrementa aún más la vulnerabilidad de los grupos más pobres del país.</p>

Fuente: Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos (Sosa, 2015)

VI. REVISIÓN DE LITERATURA

Existen diversas metodologías para poder medir la huella de Carbono, entre las que se encuentran: The Life-Cycle Assesment (La valoración del ciclo de vida), ISO 14064-1, ISO 14069 (guía de aplicación ISO14064-1), The Carbon Trust (El verdadero Carbono) and The EPA SmartWay (Agencia de protección del medio ambiente). En la actualidad el GHG protocol (Protocolo de los gases de la casa verde), es la herramienta más usada tanto por los gobiernos como por las empresas a nivel mundial para realizar las mediciones y la administración de las emisiones de gases de efecto invernadero. En alianza con el Instituto de Recursos del Mundo (The World Resources Institute) y el Concejo de Negocios del Mundo para el Desarrollo Sostenible (The World Business Council for Sustainable Development), están trabajando con diferentes empresas, gobiernos y grupos defensores del medio ambiente para contribuir a la creación de nuevos programas confiables y efectivos que aborden el problema del cambio climático (Gómez y Tafur, 2012)

Dentro de los autores que han empleado este tipo de metodologías complementadas con alguna otra, destacan, Hierro, O., Pinto, M., *et al.* (2012) los cuales calcularon los costes energéticos directos e indirectos y su huella de carbono de ocho granjas de ovino de leche agrupadas según su sistema productivo en intensivos, semiintensivos, semiextensivos y ecológicos. El objetivo del trabajo fue comprobar el grado de sostenibilidad de las granjas ovinas, respecto a su dependencia energética y la emisión de gases de efecto invernadero durante un año. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el coste energético total por oveja, donde las granjas ecológicas obtienen los menores costes frente a las granjas intensivas y semiintensivas. Con respecto a la huella de carbono, presenta resultados menores para las granjas ecológicas en las emisiones derivadas de los animales, las estructuras y total de la granja.

Andrade, H., Segura, M., *et al.* (2014), realizaron un estudio en el sector azucarero de Colombia, su objetivo fue estimar la huella de carbono producida por la caña de azúcar en el municipio de Palmira, Valle del Cauca, a partir de las emisiones de

gases de efecto invernadero durante el proceso de cultivo de caña de azúcar y la molienda. Los resultados mostraron que la producción de azúcar tiene una huella de carbono que emite aproximadamente 947 ± 1381 kg CO₂e/ha/ciclo. Los fertilizantes nitrogenados fueron los que más aportaron a las emisiones de GEI, en un 73% del total, en contraste con el uso de combustibles fósiles y energía, cuya contribución está en 17% y 10%, respectivamente.

Por su parte, Iribarren, D., Vázquez-Rowe, I. (2010), enfocaron su estudio en la evaluación de la huella de carbono de los productos del mar como un subgrupo clave en el sector alimentario. Se seleccionó Galicia, España como estudio de caso. El análisis se basó en un conjunto representativo de especies dentro del sector pesquero gallego, incluidas las especies obtenidas de la pesca costera, pesca en alta mar, acuicultura extensiva y acuicultura intensiva. Para ello, las huellas individuales de carbono de cada especie fueron utilizadas para calcular la huella de carbono para cada una de las diferentes actividades de pesca y cultura gallega. Por último, la suma global de las huellas de carbono para la pesca costera, en alta mar y la acuicultura extensiva e intensiva produjeron la huella de carbono de la actividad pesquera gallega.

Los autores Morillón y Hernández (2011), desarrollaron una metodología para evaluar materiales de construcción con base en la normatividad del análisis del ciclo de vida (ACV), la cual identifica un límite para la cantidad de emisiones de CO₂ por consumo de energía que los sumideros de carbono de la Tierra son capaces de absorber y asimilar. Con esta metodología se determina el nivel de sustentabilidad de los materiales de construcción y los objetivos de reducción de emisiones de CO₂. Aplicando la metodología a dos tecnologías de producción de acero en México, se estableció que de las emisiones de CO₂ generadas cada vez que se produce una tonelada de acero, en un caso 49.2% y en otro 67.8%, no pueden ser absorbidas y asimiladas por los sumideros de carbono de la Tierra, por lo que tales porcentajes de emisiones se quedan en la atmósfera y se adicionan al total existente; así estas tecnologías de producción de acero se consideran no sustentables.

El trabajo Hernández y Hernández (2013), retoma la metodología desarrollada por Morillón y Hernández (2011) y la adaptan para estudiar la sustentabilidad de la producción del azúcar de caña de los ingenios mexicanos, durante la zafra 2010-2011. Los resultados muestran que los estados con mayores emisiones de CO₂ fueron de Chiapas, Colima, Jalisco y Quintana Roo. Comparando las emisiones con el límite de capacidad de carga evaluado para México, se observó, que cerca del 71% de las emisiones de CO₂ que se generan por la producción de una tonelada de azúcar, se quedan en la atmósfera y se acumulan con las ya existentes. Por ende, la producción de azúcar de caña en México no es sustentable.

Aquino *et al.*, (2016) retomaron los dos trabajos anteriores para estimar la emisión total de dióxido de carbono (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero, por parte de la agroindustria de la caña de azúcar durante el proceso de producción de azúcar para las zafras 2010/11 a 2014/15 y determinaron tanto el volumen de CO₂ que es fijado en los sumideros de carbono, como el volumen que permanece en la atmósfera. Para el periodo de estudio la estimación de las emisiones de CO₂ por tonelada de azúcar producida, indicó que las entidades que muestran mayores emisiones por parte de la agroindustria cañera son Sinaloa con una emisión de 2,265 kilogramos de CO₂, Quintana Roo con 2,223 kilogramos y Tabasco con 2,162 kilogramos.

VII. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó es la descrita por Morillón y Hernández (2011) complementada con la metodología propuesta por Hernández y Hernández (2013). Esta es una metodología de análisis de energía incorporada que mide y registra la cantidad de energía que se consume en las diferentes etapas de fabricación de un producto, la cual también es conocida como contenido energético. Con ello, se puede estimar las emisiones de CO₂ durante el proceso específico de la obtención de azúcar (molienda de la caña de azúcar) y no a lo largo de la cadena de suministros representada por las emisiones que se dan desde la compra de insumos, hasta la distribución al consumidor (Análisis del ciclo de vida). Posteriormente con los datos obtenidos, es posible analizar el nivel de sustentabilidad que tiene la agroindustria de la caña de azúcar en México.

Los datos utilizados para dicha investigación fueron:

-  Producción de azúcar total (t) para las zafras 1997/98 - 2003/04 y la producción de azúcar base estándar (t) para las zafras 2004/05 - 2015/16.
-  Producción total de bagazo de caña (t) utilizado como fuente de energía para la molienda, para ello a la producción total se le restó la cantidad de bagazo vendido. Se trabajó bajo el supuesto de que la producción total de este subproducto se utiliza como fuente de energía.
-  Consumo de petróleo total (l).
-  Consumo de energía eléctrica (kW/h).
-  Emisiones totales de CO₂.
-  Consumo total de energía.

Las fuentes de información para obtener los datos mencionados anteriormente fueron: las Estadísticas de la Agroindustria de la Caña de Azúcar de la Unión Nacional de Cañeros, A.C.-CNPR., para el periodo comprendido entre los años 1997 – 2006; y el Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) para las zafras comprendidas entre 2007 y 2016.

7.1. Análisis de las variables

Para poder calcular las emisiones de cada una de las fuentes de energía utilizadas en el proceso de obtención del azúcar (bagazo, petróleo y energía eléctrica) fue necesario transformarlas de sus unidades de medida inicial (toneladas, litros o Kw/h) a megajoules (MJ). Para la obtención de la cantidad total de emisiones de CO₂, se utilizaron los siguientes factores de emisión: 0.1000 kg de CO₂/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a IPCC, 2006) para el bagazo; 0.0741 kg de CO₂/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a SENER, 2008) para el petróleo (diésel y combustóleo) y 0.0523 kg de CO₂/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a Morillón y Hernández, 2011) para la electricidad de CFE.

7.1.1. Calculo de las emisiones de CO₂ por la quema de bagazo

Para convertir las toneladas de bagazo utilizado a megajoules, primero se convirtieron a kilocalorías y estas a su vez a megajoules, de acuerdo a SENER (2017) una tonelada de bagazo equivale a 1,684,990 kilocalorías (factor de conversión) lo que a su vez equivale a 7,054.7161 MJ. Por lo tanto al multiplicar la cantidad de bagazo por 7,054.7161 (factor de conversión) se obtiene la equivalencia de toneladas de bagazo en megajoules. Toda vez que se obtiene dicha equivalencia, se procede a multiplicarla por el factor de emisión de CO₂ del bagazo (0.1000 kg de CO₂/MJ), para así obtener la emisión total de CO₂ resultante de la quema de bagazo para generar energía en la molienda de la caña.

7.1.2. Calculo de las emisiones de CO₂ por el consumo de petróleo

En este caso, para la transformación a megajoules, el primer paso consistió en convertir el total de litros consumidos, por entidad federativa, a barriles de petróleo; lo cual se obtuvo al dividir el volumen total de petróleo consumido entre 158.9872 litros (factor de conversión). Posteriormente el total de barriles se convirtió a kilocalorías, esto, multiplicando la cantidad total de barriles por 1,469,600 (factor de conversión). Enseguida, el total de kilocalorías se dividió

entre 238.8458 (factor de conversión) para obtener el total de megajoules. Finalmente, cuando se obtuvo la transformación de litros de petróleo a megajoules, esta se multiplicó por el factor de emisión del petróleo (0.0741 kg de CO₂/MJ) para así obtener la emisión total de CO₂ a partir de este tipo de energía. .

7.1.3. Calculo de las emisiones de CO₂ por el consumo de energía eléctrica

Para esta conversión, de acuerdo a la SENER (2017) un Watt-hora (Wh) de electricidad producido por la CFE equivale a 3,600 Joules (J), esto implica que un Kilowatt-hora sea equivalente a 3, 600, 000 J (factor de conversión). Por lo tanto, al multiplicar el consumo total de energía eléctrica de los ingenios por este factor de conversión, se obtuvo la equivalencia a Joules. Posteriormente, se dividió el consumo total de electricidad en Joules entre un millón para obtener el consumo total de electricidad en megajoules. Por último, la electricidad de CFE tiene un factor de emisión de CO₂ 0.0523 de CO₂/MJ, por lo que al multiplicar el total de megajoules por el factor de emisión se obtuvo la emisión total de CO₂ por el uso de energía eléctrica de CFE.

7.1.4. Emisiones totales de CO₂ en la agroindustria de la caña de azúcar

Las emisiones totales de CO₂ en el proceso agroindustrial de la caña de azúcar (molienda de la caña de azúcar) se obtienen al sumar las emisiones de CO₂ generadas por las tres fuentes de energía utilizadas en los ingenios. Los resultados arrojan luz sobre cuanto CO₂ se produce por tonelada de azúcar producida, al quemar bagazo, petróleo y energía eléctrica proveniente de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en los estados productores de este edulcorante. Ello es importante para la definición de políticas por parte de los actores de la agroindustria de caña de azúcar o del gobierno que conduzcan a una gestión de las emisiones que redunden en una minimización del impacto sobre el medio ambiente y recursos naturales como son el agua, suelo y aire.

7.1.5. Consumo total de energía utilizada en la agroindustria azucarera

El consumo total de energía concentra el total de los energéticos utilizados en la producción de una tonelada de azúcar, se compone de la energía obtenida del bagazo, del petróleo y la electricidad de CFE. Se expresa en megajoules por tonelada de azúcar producida (Hernández y Hernández, 2013).

7.2. Evaluación del nivel de sustentabilidad

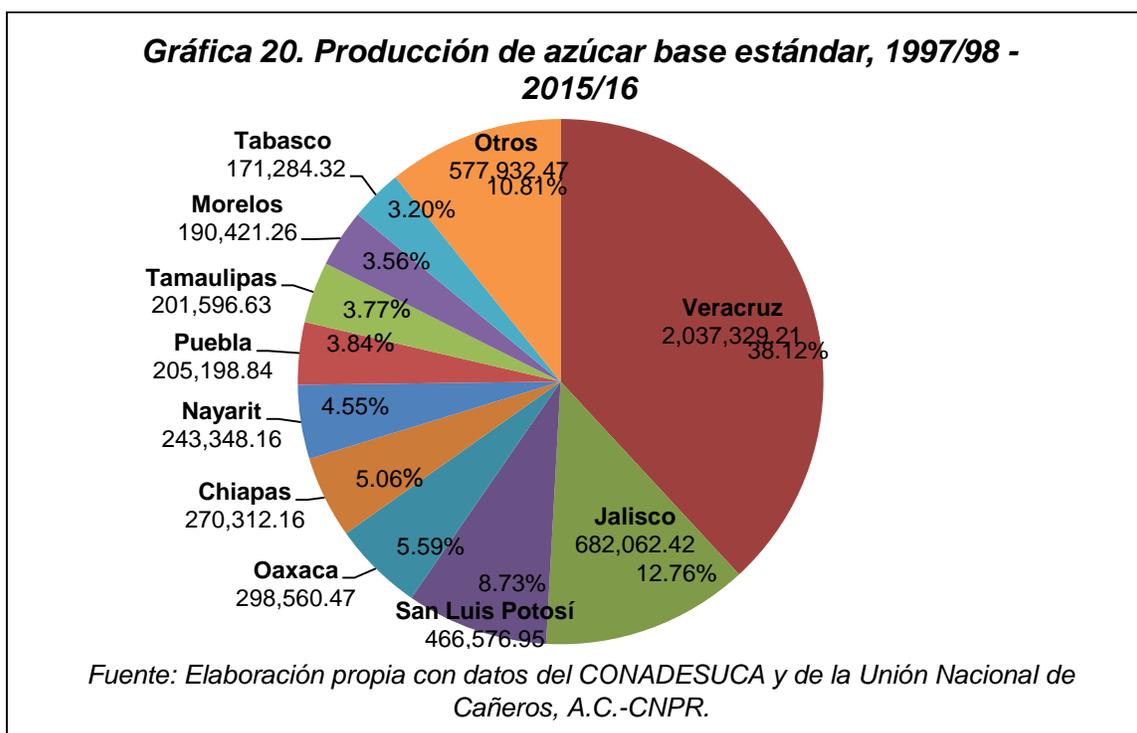
Con la información obtenida anteriormente y aplicando la metodología propuesta por Morillón y Hernández (2011), retomada por los hermanos Hernández (2013) y por Aquino, Cuevas y Carrillo (2016), para evaluar el nivel de sustentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar de los estados productores, es necesario determinar el factor de emisión, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\textit{Factor de Emisión} = \frac{\textit{Cantidad total de CO}_2 \textit{ emitida (kg)}}{\textit{Total de energía (megajoules)}}$$

El límite de capacidad de carga óptima para México, determinado por Morillón y Hernández (2011), es de 0.02918 kg de CO₂ por megajoule (kgCO₂/MJ) de energía utilizada, por lo que, la actividad que genera emisiones de CO₂ superiores a este valor se consideran no sustentables o amigables con el ambiente, ya que contribuyen a la acumulación de CO₂ en la atmósfera (Hernández y Hernández, 2013). Sin embargo, si el valor de las emisiones es menor a 0.02918 kgCO₂/MJ la actividad que las emite se considera sustentable.

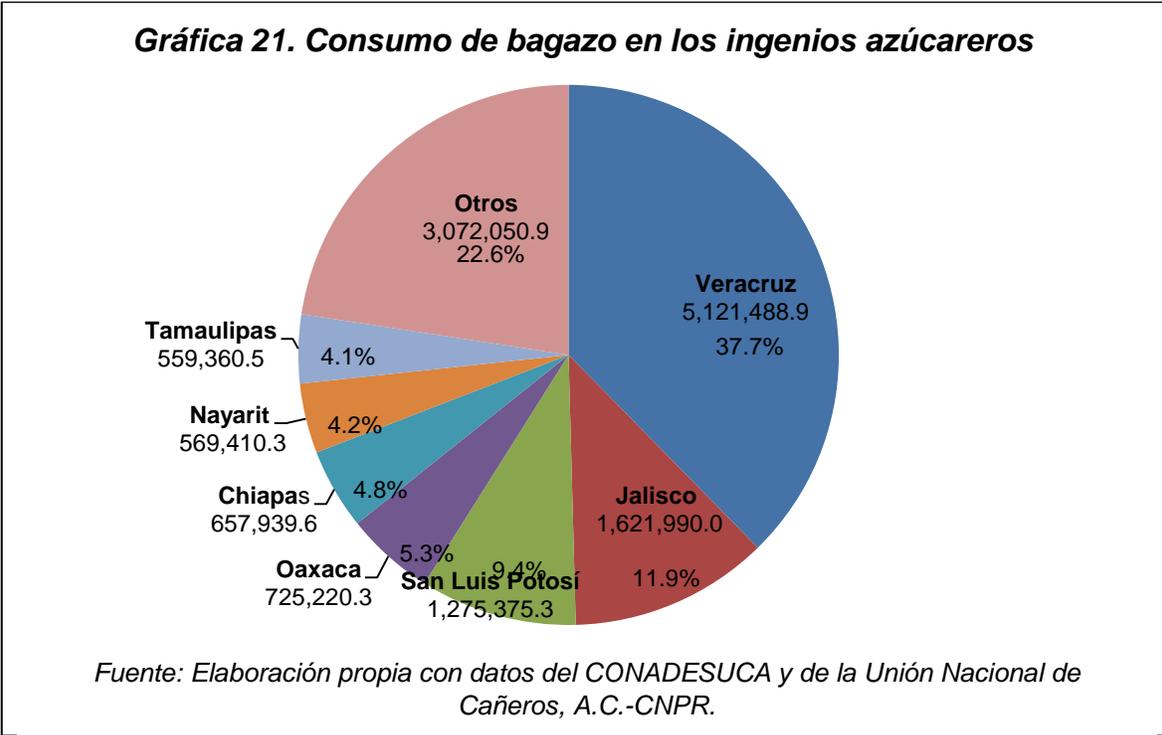
VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el periodo de análisis comprendido desde la zafra 1997/1998 hasta la zafra 2015/16, la producción de azúcar en México en promedio fue de 5.34 millones de toneladas. Los estados que mayor participación tuvieron en la elaboración del edulcorante fueron: Veracruz que ocupó el primer lugar con una producción promedio de 2.04 millones de toneladas de azúcar (38.12%), en donde destacó la participación de los ingenios: San Cristóbal, Tres Valles, El potrero, La gloria, Central Motzorongo y Pánuco quienes en conjunto produjeron el 51.8% de azúcar del estado. El segundo lugar lo tuvo Jalisco con un promedio de 683.06 miles de toneladas (12.76%), aquí destacaron los ingenios de Tala y Tamazula aportando el 52% de la producción de azúcar del estado. Y en tercer lugar estuvo San Luis Potosí con 466.58 miles de toneladas (8.73%), los ingenios Alianza Popular y San Miguel del Naranjo participaron con el 54.4% de la producción de azúcar en este estado. En conjunto estos tres estados son responsables del 60% de la producción de azúcar en México, posteriormente le siguen los estados de Oaxaca, Chiapas, Nayarit, Puebla y Tamaulipas (*Ver Gráfica 20*).



La tasa media de crecimiento (TMC) anual a nivel nacional de producción de azúcar en el periodo de análisis fue de 5.39%, es importante destacar que en los estados de Michoacán, Sinaloa y Tamaulipas se obtuvo una TMC negativa.

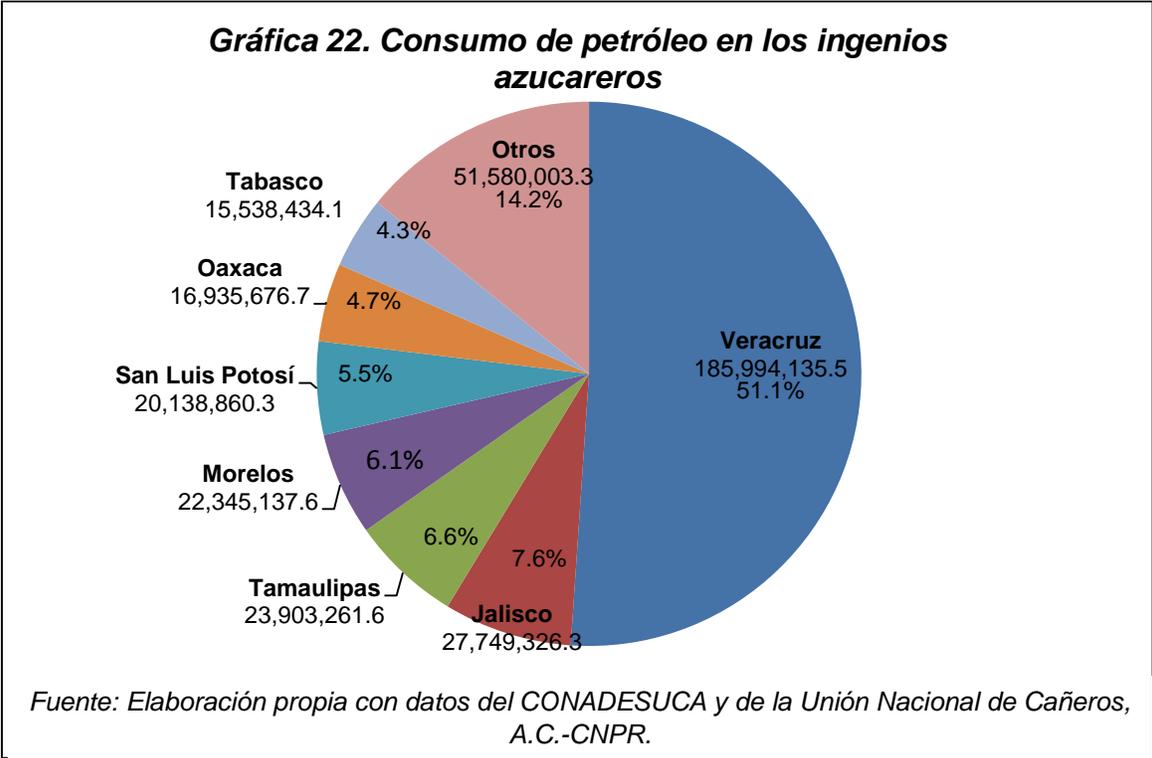
Durante el periodo de análisis, 1997/98 – 2015/16, se consumieron en promedio 13.06 millones de toneladas de bagazo utilizados para la producción de energía de los ingenios azucareros del país. Veracruz consumió el 37.7% de esta materia prima, mientras que Jalisco únicamente el 11.9% (Ver *Gráfica 21*).



La utilización del bagazo como combustible muestra un crecimiento positivo en las zafras estudiadas para la mayoría de los estados con excepción de Sinaloa, Morelos, Michoacán y Quintana Roo. A nivel nacional el consumo creció en 0.7% durante el mismo periodo de análisis.

Con respecto al consumo de petróleo, utilizado también para la generación de energía dentro de los ingenios, este ha decrecido e inclusive en algunos estados la utilización de este recurso ha llegado a ser nulo, tal es el caso de Colima y Quintana Roo que desde la zafra 2006/07 dejaron de utilizar petróleo, otros estados han tomado una medida similar pero de manera esporádica, por ejemplo:

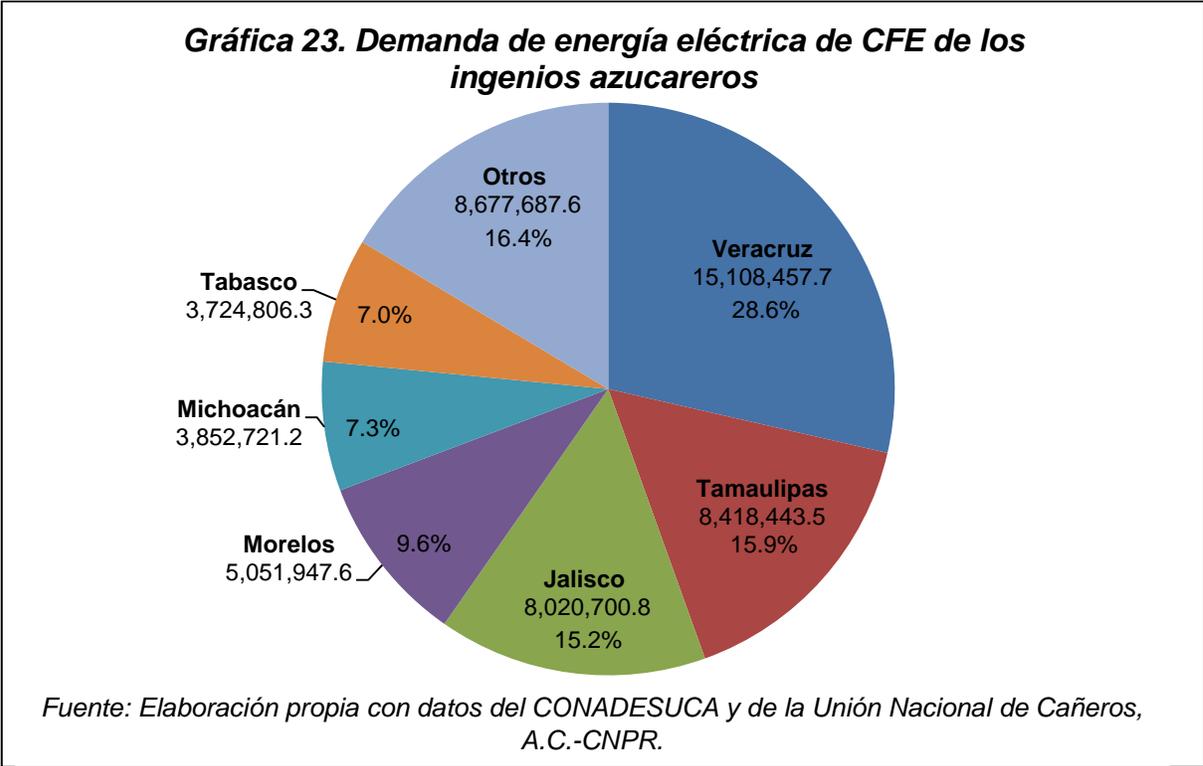
Campeche, Chiapas, Michoacán y Sinaloa. Aún y con lo anterior el consumo promedio nacional para el periodo de análisis fue de 364.18 millones de litros de petróleo de los cuales Veracruz consumió el 51%, Jalisco el 7.6% y Tamaulipas el 6.6% (Ver Gráfica 22).



El consumo medio de este combustible en los ingenios azucareros durante el periodo 1997/98 – 2015/16 decreció a una tasa de 16.81%. En los 15 estados del país en donde se produce azúcar el consumo de petróleo se ha reducido, Jalisco tiene la mayor tasa decreciente de consumo de 43.63%, a partir de la zafra 2006/07 hasta la 2015/16 Colima y Quintana Roo redujeron su consumo a cero, por su parte Michoacán dejó de consumir petróleo a partir de la zafra 2011/12 y Campeche en la zafra 2013/14. Lo anterior, muestra la tendencia de consumo a la baja de este combustible fósil.

El registro de la demanda de energía eléctrica a la Comisión Federal de Electricidad se tuvo a partir de la zafra 2004/05, por tanto, los cálculos se realizaron con la información obtenida a partir de dicha zafra hasta la 2015/16, en este periodo el consumo fue de 52.85 millones de kilowatts-hora (kWh). Veracruz

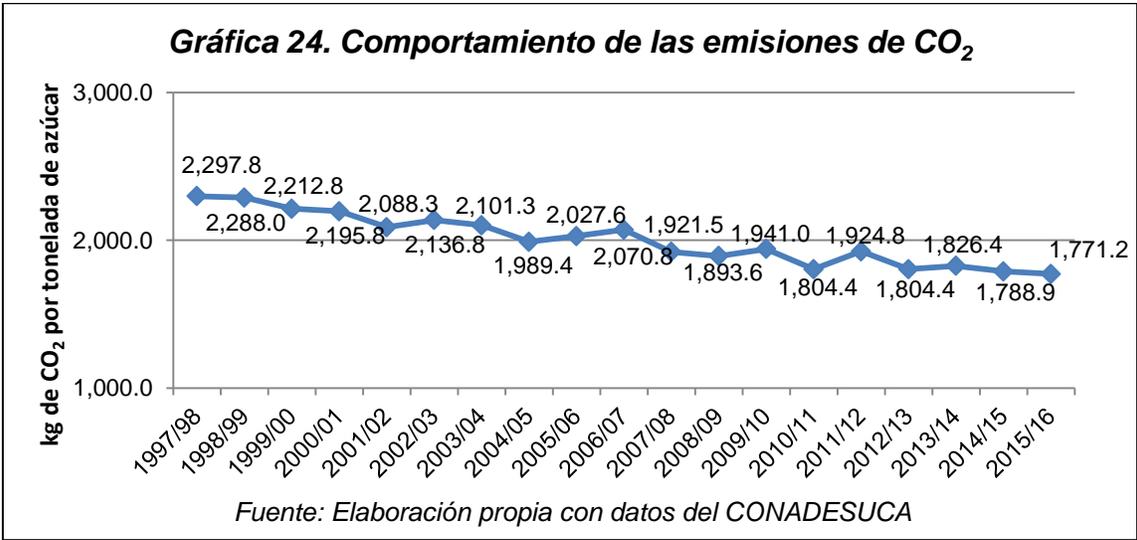
fue el estado que registró una mayor demanda con 15.11 millones de kWh, le sigue Tamaulipas con 8.42 millones de kWh y Jalisco con 8.02 millones de kWh; en conjunto estos tres estados demandan alrededor del 60% del total de energía eléctrica registrada (Ver Gráfica 23).



La tasa media de crecimiento del consumo de energía eléctrica por parte de los ingenios azucareros es diversa, en algunos estados ha crecido el consumo mientras que en otros ha decrecido. Durante las zafras 2004/05 a la 2015/16 el consumo de energía eléctrica en el país decreció en 2.13%, estados como Sinaloa (31.2%), Chiapas (24.4%), Nayarit (21.5%) y Puebla (18.7%) tuvieron un comportamiento similar; no obstante, en Colima, Quintana Roo y Campeche el consumo de este tipo de energía aumento en 8.9%, 6.3% y 6.2% respectivamente.

8.1. Consumo de energía total y emisiones totales de CO₂ por tonelada de azúcar producida

El cálculo del consumo de energía total y emisiones de CO₂ por tonelada de azúcar producida para el periodo comprendido de la zafra 1997/98 a la 2015/16 se realizó conforme a lo establecido en la metodología y se observó que dichas emisiones han disminuido a lo largo del tiempo a una tasa media de 1.44% (*Ver Grafica 24*). Las emisiones de CO₂ a nivel nacional en promedio fueron de 2,004.5 kg/tonelada de azúcar de las cuales el 89.7% provienen de la quema de quema de bagazo. Algunos estados estuvieron por encima del promedio nacional, tal es el caso de Campeche (2,689.4 kg), Sinaloa (2,457.6 kg), Tabasco (2,369.1 kg), Tamaulipas (2,332.1 kg), Quintana Roo (2,235.2 kg), Morelos (2,127.5 kg), San Luis Potosí (2,092.4 kg) y Veracruz (2,044.7 kg). Por otro lado las entidades donde los ingenios registraron una menor cantidad de emisiones de CO₂ por tonelada de azúcar producida fueron: Puebla (1,735.4 kg), Nayarit (1,756.1 kg) y Chiapas (1,788.0 kg) (*Anexo 1*).



En cuanto a la cantidad de energía consumida, para producir una tonelada de azúcar en promedio a nivel nacional se consumieron 20,775.6 megajoules (*Anexo 2*) de los cuales el 87.1% provienen de la quema de bagazo como fuente de energía, el 12.8% del petróleo y el 0.1% de la energía eléctrica de CFE. La relación entre consumo de energía y emisiones de CO₂ es directa, por lo que los

estados que registraron un mayor consumo de energía son también los que emitieron mayor cantidad de CO₂ en el proceso agroindustrial y viceversa.

8.2. Evaluación de la sustentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el nivel de sustentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar de los estados productores, es necesario determinar el factor de emisión, el cual se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Factor de Emisión} = \frac{\text{Cantidad total de CO}_2 \text{ emitida (kg)}}{\text{Total de energía (megajoules)}}$$

Si el factor de emisión es mayor a 0.02918 kgCO₂/MJ, límite de capacidad de carga óptima para México tomando en cuenta la capacidad de absorción de los sumideros de carbono, la agroindustria de la caña de azúcar se considerará no sustentable (Morillón y Hernández, 2011).

En el *Anexo 3* se muestran los factores de emisión de los estados productores de azúcar, durante el periodo de análisis ya mencionado, y se observan valores superiores al límite de capacidad de carga óptima (0.02918), en promedio Colima (0.09911), Chiapas (0.09884) y Quintana Roo (0.09879) tuvieron un mayor factor de emisión, mientras que Campeche (0.09419), Morelos (0.09479) y Tamaulipas (0.09533) registraron valores menores; sin embargo, ningún estado se encuentra por debajo del límite óptimo, por lo que la agroindustria de la caña de azúcar para el periodo comprendido entre la zafra 1997/98 y la 2015/16, se considera no sustentable en México por la cantidad de emisiones de CO₂ que emite a la atmósfera. A nivel nacional el factor de emisión de CO₂ en promedio fue de 0.09671 kgCO₂/MJ lo que equivale a 2,004.5 kg de CO₂ generados por tonelada de azúcar producida (*Anexo 4*). Al realizar los cálculos y al comparar las emisiones totales de CO₂ con el límite de capacidad de carga óptima se observa que en promedio el 70% de las emisiones de CO₂ generadas por tonelada de azúcar producida en México queda libre en la atmósfera y se acumula con las ya

existentes, esto equivale a 1,398.2 kg de CO₂ y sólo 606.2 kg de CO₂ son absorbidos por los sumideros de carbono (*Anexo 6*).

Analizando el *Anexo 5* se observa que en términos porcentuales ha aumentado la cantidad de CO₂ libre en la atmósfera generado por la agroindustria de la caña de azúcar, en comparación con la zafra de 1997/98 en la zafra 2015/16 se incrementaron en 2% las emisiones de CO₂ libres. Lo anterior posiblemente derivado de la precaria tecnología con la que están equipados los ingenios azucareros mexicanos o a una posible reducción en la capacidad de absorción y almacenamiento de los sumideros de carbono, ya que durante el periodo de análisis la reducción en la capacidad de absorción se dio a una tasa media del 0.35%.

CONCLUSIONES

México es uno de los principales países productores de azúcar de caña, durante las zafras 1997/98 – 2015/16 en promedio se produjeron 5.34 millones de toneladas de azúcar, Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí representaron el 60% de la producción total del país. Para poder obtener este edulcorante, los ingenios mexicanos para su funcionamiento consumen energía de la combustión del bagazo de caña (87.1%), del petróleo (12.8%) y de la energía eléctrica de CFE(0.1%); sin embargo, ha incrementado el uso de energía generada a partir de la quema de bagazo, por ende, las tasas medias de consumo de petróleo y energía eléctrica de CFE son decrecientes. Con respecto al petróleo en algunos estados como Colima y Quintana Roo desde la zafra 2006/07 lo dejaron de utilizar, pero aumentaron su consumo de energía eléctrica de CFE. Campeche, Chiapas, Michoacán y Sinaloa, están tomando una medida similar en cuanto al consumo del petróleo pero de manera paulatina.

Las emisiones de CO₂ a nivel nacional en promedio fueron de 2,004.5 kg/tonelada de azúcar; ocho estados estuvieron por encima del promedio nacional, tal es el caso de Campeche (2,689.4 kg), Sinaloa (2,457.6 kg), Tabasco (2,369.1 kg), Tamaulipas (2,332.1 kg), Quintana Roo (2,235.2 kg), Morelos (2,127.5 kg), San Luis Potosí (2,092.4 kg) y Veracruz (2,044.7 kg). Por otro lado las entidades donde los ingenios registraron una menor cantidad de emisiones de CO₂ por tonelada de azúcar producida fueron: Nayarit (1,756.1 kg), Puebla (1,735.4 kg) y Chiapas (1,788.0 kg). A pesar de que Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí son los mayores productores de azúcar, existen otros estados que registran mayor cantidad de emisiones de CO₂, esto debido al nivel tecnológico de los ingenios azucareros.

Los resultados de la evaluación del nivel de sustentabilidad de la agroindustria de la caña de azúcar arrojaron que en México esta agroindustria no cuenta con un nivel óptimo de sustentabilidad, debido a que supera la capacidad de absorción de los sumideros de carbono, contribuyendo así a la problemática del cambio climático. A nivel nacional el factor de emisión de CO₂ en promedio fue de 0.09671 kgCO₂/MJ lo que equivale a 2,004.5 kg de CO₂ generados por tonelada de azúcar

producida. Al comparar las emisiones totales de CO₂ con el límite de capacidad de carga óptima se observa que en promedio el 70% de las emisiones de CO₂ generadas por tonelada de azúcar producida en México queda libre en la atmósfera y se acumula con las ya existentes, esto equivale a 1,398.2 kg de CO₂ y sólo 606.2 kg de CO₂ son absorbidos por los sumideros de carbono.

Por lo tanto, es necesario que se tomen medidas en cuanto al tipo de energía utilizada en el proceso de obtención del azúcar e implementar el uso de energías limpias para mejorar el nivel sustentable de la agroindustria de la caña de azúcar y pensar en la posible modernización de los ingenios azucareros en México porque desgraciadamente el nivel tecnológico de éstos es bajo en comparación con otros países

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, H., Segura, M., et al. (2014). *Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia*
- Aquino, P., Cuevas, C. y Carrillo, K. (2016). *Emisión de gases de efecto invernadero en la agroindustria de la caña de azúcar en México.*
- Aroche, D., 2004, *Problemática y Crisis de la Industria Azucarera Mexicana en el Marco del Tratado de Libre Comercio de América del Norte.* Tesis. Universidad de las Américas Puebla.
- Azqueta, D., Alviar, M., Domínguez, L. y O’Ryan, R. 2007. *Introducción a la economía ambiental.* España
- Banco de México. 2013. *Estadísticas de la población económicamente activa.* México
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. *Medio ambiente y biodiversidad: prioridades para la conservación del capital natural y la competitividad de América Latina y el Caribe.*
- Beeharry, R. P. (2001). *Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. Biomass and Bioenergy*, 20:361-370.
- Bosques PROcarbono UACH. *Huella de Carbono*, disponible en: http://www.uach.cl/procarbono/huella_de_carbono.html
- Centro de Información de las Naciones Unidas, Panel Intergubernamental del cambio climático [CINU]. 2017. Disponible en http://www.cinu.mx/minisitio/Panel_IPCC/ consultado el día 01 de agosto de 2017
- CONADESUCA – SAGARPA. 2016. *Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar. Zafra 2006-2007 / 2015-2016.* Informe Completo, México, D.F.

- Cuatecontzi, H. y Gasca, J. 2004. *Cambio climático una visión desde México. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Díaz, S. (1989), *Agroindustria azucarera en México: importancia, problemática y reprivatización de ingenios*. Disponible en: <https://chapingo.mx/revistas/revistas/articulos/doc/rga-1724.pdf> Consultado el día 04 de agosto de 2017
- Díaz, S., Espinoza, S. y Mondragón, U. *Identificación de proyectos agroindustriales en la región Este de Tierra Caliente, Michoacán*. Chapingo, Méx., Departamento de Industrias Agrícolas, 1985, Tesis de licenciatura.
- Federación Española De Municipios Y Provincias, *Los Sumideros De Carbono A Nivel Local*, disponible en: <http://www.redciudadesclima.es/files/documentacion/c2dd700737802664a97469104e56f17d.pdf> consultado el día 24 de agosto de 2017
- FIRA. 2010. *Producción sostenible de la caña de azúcar*. México.
- FIRA. 2015. *Panorama Agroalimentario: Azúcar 2015*. México
- Garduño, R. 2004. *Cambio climático una visión desde México. ¿Qué es el efecto invernadero?* Instituto Nacional de Ecología. México.
- Gómez, A., Tafur, J. (2012). *Estimación de la huella de carbono para los procesos de subsolado, rastro arado, surcado, aplicación de fertilización química y de herbicidas en una hectárea de cultivo de caña de azúcar*.
- Hernández, F. J., Valencia, A.C., Toledo, J.A. y Hernández, H. 2013. *El sector cañero en Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental*. México.
- Hierro O., Pinto, M., et al. (2012). *La huella de carbono como indicador ambiental en la evaluación de la sostenibilidad de explotaciones de ganado ovino de aptitud lechera*.

- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza,
- Iribarren, D., Vázquez-Rowe, I., et al. (2010). *Estimation of the carbon footprint of the galician fishing activity (nw spain)*.
- La caña de azúcar: el dulce que cautivó al mundo. (2017). *Claridades Agropecuarias*, [online] pp.4-17. Disponible en: <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/127/ca127.pdf>. Consultado el día 30 agosto de 2017.
- Morillón, D. y Hernández, F.J. (2011). *Metodología para evaluar la sustentabilidad de los materiales de construcción*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Serie de Investigación y Desarrollo 668.
- NEIKER-Tecnalia. 2015. *Sumideros De Carbono de la Comunidad Autónoma Del País Vasco*, disponible en: <http://www.neiker.net/wp-content/uploads/2015/10/sumiderosES-FINAL-OK.pdf> consultado el día 24 de agosto de 2017
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] 2016. *Objetivos de desarrollo sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo*, disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> consultado el día 5 de octubre de 2017
- Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2015. *Concentraciones de gases de efecto invernadero*, disponible en: <https://public.wmo.int/es/media/press-release/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-vuelven-batir-un-r%C3%A9cord> consultado el 16 de agosto 2017

- Rincón, J. 2014, *Cálculo de la huella de carbono del proceso de cosecha de caña de azúcar*, Colombia
- SAGARPA. 2016. *Comunicado de prensa: Representa agroindustria de la caña de azúcar nueve por ciento del PIB primario*. México.
- SAGARPA-CONADESUCA-UACH, 2016. *Reducción del consumo de petróleo y generación de energía eléctrica de los ingenios*. Boletín técnico informativo. Enero 2016.
- SCIÁN. 2013. *Clasificación de las industrias: Elaboración de azúcares*. INEGI.
- Secretaría de Economía [SE]. 2012. *Importaciones de azúcar en México*. México
- Secretaría de Energía [SENER]. 2011. *Balance Nacional de Energía*. México, D.F.
- Secretaría de Energía [SENER]. 2015. *Balance Nacional de Energía*. México, D.F.
- Secretaría de Gobernación [SEGOB] 2014, *Diario Oficial de la Federación. Programa Nacional de la agroindustria de la caña de azúcar*. Disponible en http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014
Consultado el día 03 de agosto de 2017
- SEMARNAT – INECC. 2010. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010*. México.
- SENER – CFE. 2012. *Atlas de almacenamiento geológico de CO₂, México*. México
- Sosa, F. 2015. *Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos*, México.
- Strid, I., Eriksson M. (2014). *Losses in the supply chain of swedish lettuce - wasted amounts and their carbon footprint at primary production, whole sale and retail*.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), *Acuerdo de París*. Disponible en: http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/acuerdo_de_paris/items/10085.php Consultado el día 01 de agosto de 2017

Anexo 1. Emisiones totales de CO₂ por tonelada de azúcar producida (kilogramos)

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	3,723.0	3,979.8	3,645.5	3,796.2	3,585.3	2,681.6	2,636.8	2,649.3	2,686.2	2,825.3	2,494.9	2,695.4	2,251.2	2,179.6	1,820.7	1,850.5	2,061.9	1,634.1	1,900.3	2,689.4
Sinaloa	2,986.8	2,730.2	2,810.0	2,830.2	2,633.2	2,448.6	2,587.2	2,669.7	2,357.2	2,493.6	2,416.6	2,292.1	2,150.6	2,038.4	2,264.0	2,406.5	2,566.4	2,051.5	1,961.5	2,457.6
Tabasco	2,676.7	3,042.4	2,412.0	2,736.0	2,679.7	2,274.4	2,539.7	2,398.0	2,576.6	2,398.6	2,219.7	1,942.6	2,267.2	2,237.9	2,043.1	2,049.2	2,308.4	2,177.8	2,033.0	2,369.1
Tamaulipas	2,908.2	3,006.6	2,767.2	2,954.1	2,525.3	2,384.4	2,561.8	2,281.9	2,203.8	2,071.8	2,087.2	2,041.3	2,091.3	1,884.6	2,103.8	1,792.1	2,189.4	2,279.1	2,175.2	2,332.1
Quintana Roo	3,305.3	2,479.4	2,179.5	2,407.2	2,211.0	1,951.0	1,983.1	1,907.4	2,072.4	2,437.0	2,192.7	1,986.3	2,222.5	2,071.0	2,220.4	2,306.0	2,575.1	1,941.4	2,019.8	2,235.2
Morelos	2,778.5	2,945.7	2,884.5	2,847.7	2,678.8	2,462.3	2,327.7	2,325.2	2,254.6	2,054.8	2,007.9	1,837.9	1,790.1	1,845.8	1,648.3	1,442.0	1,481.3	1,446.0	1,364.0	2,127.5
San Luis Potosí	2,062.0	2,338.7	2,237.1	2,279.7	2,039.0	2,425.8	2,430.8	2,206.1	2,061.4	2,364.2	2,020.8	2,254.9	2,107.8	1,697.0	2,045.8	1,687.7	1,748.3	1,883.3	1,864.6	2,092.4
Veracruz	2,313.9	2,312.0	2,214.1	2,145.1	2,027.3	2,208.9	2,115.5	2,003.0	2,070.6	2,167.5	1,994.6	1,899.0	2,068.8	1,861.8	2,051.4	1,888.1	1,861.2	1,835.1	1,811.5	2,044.7
Michoacán	1,990.0	2,070.3	2,354.1	2,105.7	2,229.6	1,931.7	1,929.2	1,972.0	2,078.6	1,934.9	1,934.4	1,886.0	1,786.9	1,780.2	1,755.7	1,745.0	1,687.0	1,735.3	1,727.5	1,928.1
Oaxaca	2,086.1	1,997.8	1,866.2	1,888.0	1,811.1	1,981.5	1,901.0	1,804.5	1,781.5	1,914.0	1,838.4	1,800.2	1,998.0	1,667.7	2,057.7	1,863.6	1,877.6	1,862.1	1,776.9	1,882.8
Colima	2,385.7	1,977.7	2,359.7	2,185.7	1,824.9	1,942.9	1,982.1	1,688.6	1,708.2	1,631.0	1,661.2	1,640.9	1,710.9	1,667.8	1,746.6	1,705.0	1,697.3	1,621.2	1,641.8	1,830.5
Jalisco	2,023.5	1,996.6	2,020.2	2,044.6	1,941.3	1,856.6	1,819.1	1,754.3	1,878.1	1,852.6	1,631.8	1,768.6	1,726.8	1,753.6	1,765.7	1,633.3	1,688.5	1,658.1	1,585.5	1,810.5
Chiapas	2,146.7	1,923.3	1,766.8	1,834.1	1,889.4	1,923.1	1,946.8	2,011.6	1,776.7	1,754.7	1,630.6	1,615.3	1,578.1	1,611.9	1,716.4	1,715.8	1,683.1	1,654.8	1,791.9	1,788.0
Nayarit	1,850.6	1,852.5	2,001.6	1,819.6	1,945.9	1,890.4	1,789.2	1,661.4	1,782.2	1,631.8	1,599.9	1,652.4	1,700.7	1,629.8	1,668.4	1,676.5	1,777.7	1,702.5	1,733.1	1,756.1
Puebla	1,981.8	2,067.2	1,833.1	1,880.9	1,965.1	1,877.1	1,838.1	1,532.1	1,726.4	1,718.7	1,692.6	1,662.3	1,645.9	1,634.8	1,583.4	1,586.9	1,569.3	1,598.0	1,579.0	1,735.4
NACIONAL	2,297.8	2,288.0	2,212.8	2,195.8	2,088.3	2,136.8	2,101.3	1,989.4	2,027.6	2,070.8	1,921.5	1,893.6	1,941.0	1,804.4	1,924.8	1,804.4	1,826.4	1,788.9	1,771.2	2,004.5

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA

Anexo 2. Consumo total de energía por tonelada de azúcar producida (megajoules)

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	40,113.6	43,602.6	41,445.6	42,636.1	39,748.7	29,594.5	28,546.7	29,109.4	28,912.2	30,603.3	26,691.7	28,778.8	23,546.4	22,164.8	18,306.3	18,634.3	20,654.4	16,381.0	19,056.9	28,869.9
Sinaloa	31,552.3	28,653.2	29,383.6	29,990.5	27,498.2	25,692.4	27,131.7	27,961.2	24,428.6	25,820.5	24,841.9	23,439.5	21,689.7	20,471.3	22,728.9	24,363.4	26,218.2	20,517.1	19,616.5	25,368.3
Tabasco	28,802.9	32,384.6	25,704.9	29,559.6	28,928.4	23,948.5	26,584.0	25,064.3	27,067.2	25,025.6	22,786.9	19,744.0	23,246.0	23,128.9	20,504.7	20,532.3	23,185.4	21,839.6	20,393.3	24,654.3
Tamaulipas	31,733.1	32,820.7	30,623.2	32,548.3	27,531.4	25,694.5	27,884.2	24,228.9	23,170.8	21,339.9	21,581.1	21,025.9	21,365.0	19,259.9	21,214.0	18,210.6	22,097.3	22,970.6	22,051.4	24,597.4
Quintana Roo	34,595.8	25,707.1	22,786.4	25,363.3	22,543.1	19,744.9	20,069.3	19,222.9	20,790.9	24,375.5	21,927.6	19,864.2	22,227.2	20,713.4	22,205.8	23,061.8	25,761.8	19,414.3	20,200.2	22,661.9
Morelos	30,366.5	32,170.4	31,569.9	30,927.5	28,909.1	26,472.9	25,309.4	25,180.7	24,548.3	22,292.2	21,476.9	19,207.4	18,440.8	18,830.5	16,701.3	14,644.3	14,909.5	14,486.9	13,661.1	22,637.1
San Luis Potosí	21,453.8	24,173.6	22,962.0	23,550.8	20,869.1	25,208.4	25,500.6	22,719.0	21,266.8	24,568.7	20,534.4	22,815.4	21,411.6	17,055.2	20,560.0	16,936.4	17,571.0	18,881.7	18,738.0	21,409.3
Veracruz	25,094.8	25,102.2	24,107.9	23,189.2	21,736.0	23,681.6	22,516.9	21,154.5	21,769.0	22,764.4	20,629.3	19,441.3	21,218.0	18,973.6	20,860.3	19,089.8	18,732.2	18,391.6	18,193.8	21,402.4
Michoacán	20,947.3	21,587.0	24,418.9	21,766.6	23,032.9	19,864.4	19,819.7	20,177.5	21,128.9	19,705.3	19,513.2	18,941.8	17,926.0	17,868.9	17,599.6	17,493.7	16,916.6	17,400.6	17,304.4	19,653.3
Oaxaca	22,529.0	21,171.9	19,854.8	19,827.6	19,025.6	20,659.4	19,703.0	18,462.8	18,269.4	19,683.4	18,770.2	18,300.4	20,605.5	16,934.8	20,964.1	18,805.2	18,985.6	18,758.2	17,886.0	19,431.4
Jalisco	21,223.1	20,800.8	21,292.3	21,536.7	20,318.2	19,271.1	18,779.3	17,986.3	19,291.2	18,917.0	16,589.8	17,929.8	17,488.9	17,738.9	17,745.3	16,404.9	16,906.3	16,600.6	15,868.9	18,562.6
Colima	24,405.7	20,136.8	24,042.9	22,155.5	18,757.7	19,868.0	20,420.5	17,098.6	17,109.8	16,326.3	16,625.5	16,413.7	17,109.8	16,679.4	17,467.3	17,062.7	16,985.7	16,217.3	16,423.1	18,489.8
Chiapas	22,329.9	19,828.3	18,008.1	18,780.7	19,316.8	19,711.5	19,765.4	20,620.0	17,932.4	17,679.9	16,369.8	16,158.1	15,783.3	16,120.1	17,166.4	17,167.4	16,835.1	16,571.1	17,920.9	18,108.7
Nayarit	19,350.1	19,089.1	21,171.4	18,951.6	20,253.5	19,652.7	18,563.7	17,090.6	18,184.3	16,510.0	16,161.3	16,589.2	17,049.5	16,335.6	16,706.2	16,814.3	17,857.5	17,067.7	17,360.7	17,934.7
Puebla	21,147.3	22,139.8	19,366.3	19,573.2	20,519.4	19,583.2	19,027.1	15,834.1	17,761.3	17,618.0	17,163.5	16,818.1	16,611.5	16,436.4	15,951.3	15,958.0	15,749.9	16,006.5	15,791.4	17,845.1
NACIONAL	24,578.5	24,362.7	23,644.2	23,367.9	22,066.2	22,540.1	22,096.0	20,757.2	21,086.4	21,485.5	19,716.2	19,288.7	19,774.0	18,286.5	19,437.8	18,182.4	18,359.3	17,933.0	17,774.7	20,775.6

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA

Anexo 3. Factores de emisión en la agroindustria de la caña de azúcar (kgCO₂/MJ)

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	0.09281	0.09127	0.08796	0.08904	0.09020	0.09061	0.09237	0.09101	0.09291	0.09232	0.09347	0.09366	0.09561	0.09834	0.09945	0.09931	0.09983	0.09976	0.09972	0.09419
Chiapas	0.09614	0.09700	0.09811	0.09766	0.09781	0.09756	0.09850	0.09756	0.09908	0.09925	0.09961	0.09997	0.09999	0.09999	0.09998	0.09995	0.09998	0.09986	0.09999	0.09884
Colima	0.09775	0.09821	0.09814	0.09865	0.09729	0.09779	0.09706	0.09876	0.09984	0.09990	0.09992	0.09997	0.10000	0.09999	0.09999	0.09993	0.09993	0.09997	0.09997	0.09911
Jalisco	0.09535	0.09599	0.09488	0.09493	0.09554	0.09634	0.09687	0.09754	0.09736	0.09793	0.09836	0.09864	0.09874	0.09886	0.09950	0.09956	0.09988	0.09988	0.09991	0.09769
Michoacán	0.09500	0.09591	0.09640	0.09674	0.09680	0.09725	0.09734	0.09773	0.09838	0.09819	0.09913	0.09957	0.09968	0.09962	0.09976	0.09975	0.09972	0.09972	0.09983	0.09824
Morelos	0.09150	0.09157	0.09137	0.09208	0.09266	0.09301	0.09197	0.09234	0.09184	0.09218	0.09349	0.09569	0.09707	0.09802	0.09869	0.09847	0.09935	0.09981	0.09985	0.09479
Nayarit	0.09564	0.09704	0.09454	0.09601	0.09608	0.09619	0.09638	0.09721	0.09801	0.09884	0.09900	0.09961	0.09975	0.09977	0.09987	0.09971	0.09955	0.09975	0.09983	0.09804
Oaxaca	0.09260	0.09436	0.09399	0.09522	0.09519	0.09591	0.09648	0.09773	0.09751	0.09724	0.09794	0.09837	0.09696	0.09848	0.09816	0.09910	0.09889	0.09927	0.09934	0.09699
Puebla	0.09371	0.09337	0.09465	0.09610	0.09577	0.09585	0.09660	0.09676	0.09720	0.09755	0.09862	0.09884	0.09908	0.09946	0.09926	0.09944	0.09964	0.09983	0.09999	0.09746
Quintana Roo	0.09554	0.09645	0.09565	0.09491	0.09808	0.09881	0.09881	0.09922	0.09968	0.09998	0.10000	0.09999	0.09999	0.09999	0.09999	0.09999	0.09996	0.10000	0.09999	0.09879
San Luis Potosí	0.09611	0.09675	0.09742	0.09680	0.09771	0.09623	0.09532	0.09710	0.09693	0.09623	0.09841	0.09883	0.09844	0.09950	0.09951	0.09965	0.09950	0.09974	0.09951	0.09788
Sinaloa	0.09466	0.09528	0.09563	0.09437	0.09576	0.09530	0.09536	0.09548	0.09649	0.09657	0.09728	0.09779	0.09915	0.09957	0.09961	0.09878	0.09789	0.09999	0.09999	0.09710
Tabasco	0.09293	0.09394	0.09383	0.09256	0.09263	0.09497	0.09554	0.09567	0.09519	0.09585	0.09741	0.09839	0.09753	0.09676	0.09964	0.09981	0.09956	0.09972	0.09969	0.09640
Tamaulipas	0.09165	0.09161	0.09036	0.09076	0.09172	0.09280	0.09187	0.09418	0.09511	0.09709	0.09672	0.09709	0.09789	0.09785	0.09917	0.09841	0.09908	0.09922	0.09864	0.09533
Veracruz	0.09221	0.09210	0.09184	0.09250	0.09327	0.09327	0.09395	0.09468	0.09512	0.09521	0.09669	0.09768	0.09750	0.09812	0.09834	0.09891	0.09936	0.09978	0.09957	0.09579
NACIONAL	0.09349	0.09392	0.09359	0.09397	0.09464	0.09480	0.09510	0.09584	0.09616	0.09638	0.09746	0.09817	0.09816	0.09867	0.09902	0.09924	0.09948	0.09975	0.09965	0.09671

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA

Anexo 4. Valores equivalentes de los factores de emisión (kg de CO₂ por tonelada de azúcar)

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	3,723.0	3,979.8	3,645.5	3,796.2	3,585.3	2,681.6	2,636.8	2,649.3	2,686.2	2,825.3	2,494.9	2,695.4	2,251.2	2,179.6	1,820.7	1,850.5	2,061.9	1,634.1	1,900.3	2,689.4
Chiapas	2,146.7	1,923.3	1,766.8	1,834.1	1,889.4	1,923.1	1,946.8	2,011.6	1,776.7	1,754.7	1,630.6	1,615.3	1,578.1	1,611.9	1,716.4	1,715.8	1,683.1	1,654.8	1,791.9	1,788.0
Colima	2,385.7	1,977.7	2,359.7	2,185.7	1,824.9	1,942.9	1,982.1	1,688.6	1,708.2	1,631.0	1,661.2	1,640.9	1,710.9	1,667.8	1,746.6	1,705.0	1,697.3	1,621.2	1,641.8	1,830.5
Jalisco	2,023.5	1,996.6	2,020.2	2,044.6	1,941.3	1,856.6	1,819.1	1,754.3	1,878.1	1,852.6	1,631.8	1,768.6	1,726.8	1,753.6	1,765.7	1,633.3	1,688.5	1,658.1	1,585.5	1,810.5
Michoacán	1,990.0	2,070.3	2,354.1	2,105.7	2,229.6	1,931.7	1,929.2	1,972.0	2,078.6	1,934.9	1,934.4	1,886.0	1,786.9	1,780.2	1,755.7	1,745.0	1,687.0	1,735.3	1,727.5	1,928.1
Morelos	2,778.5	2,945.7	2,884.5	2,847.7	2,678.8	2,462.3	2,327.7	2,325.2	2,254.6	2,054.8	2,007.9	1,837.9	1,790.1	1,845.8	1,648.3	1,442.0	1,481.3	1,446.0	1,364.0	2,127.5
Nayarit	1,850.6	1,852.5	2,001.6	1,819.6	1,945.9	1,890.4	1,789.2	1,661.4	1,782.2	1,631.8	1,599.9	1,652.4	1,700.7	1,629.8	1,668.4	1,676.5	1,777.7	1,702.5	1,733.1	1,756.1
Oaxaca	2,086.1	1,997.8	1,866.2	1,888.0	1,811.1	1,981.5	1,901.0	1,804.5	1,781.5	1,914.0	1,838.4	1,800.2	1,998.0	1,667.7	2,057.7	1,863.6	1,877.6	1,862.1	1,776.9	1,882.8
Puebla	1,981.8	2,067.2	1,833.1	1,880.9	1,965.1	1,877.1	1,838.1	1,532.1	1,726.4	1,718.7	1,692.6	1,662.3	1,645.9	1,634.8	1,583.4	1,586.9	1,569.3	1,598.0	1,579.0	1,735.4
Quintana Roo	3,305.3	2,479.4	2,179.5	2,407.2	2,211.0	1,951.0	1,983.1	1,907.4	2,072.4	2,437.0	2,192.7	1,986.3	2,222.5	2,071.0	2,220.4	2,306.0	2,575.1	1,941.4	2,019.8	2,235.2
San Luis Potosí	2,062.0	2,338.7	2,237.1	2,279.7	2,039.0	2,425.8	2,430.8	2,206.1	2,061.4	2,364.2	2,020.8	2,254.9	2,107.8	1,697.0	2,045.8	1,687.7	1,748.3	1,883.3	1,864.6	2,092.4
Sinaloa	2,986.8	2,730.2	2,810.0	2,830.2	2,633.2	2,448.6	2,587.2	2,669.7	2,357.2	2,493.6	2,416.6	2,292.1	2,150.6	2,038.4	2,264.0	2,406.5	2,566.4	2,051.5	1,961.5	2,457.6
Tabasco	2,676.7	3,042.4	2,412.0	2,736.0	2,679.7	2,274.4	2,539.7	2,398.0	2,576.6	2,398.6	2,219.7	1,942.6	2,267.2	2,237.9	2,043.1	2,049.2	2,308.4	2,177.8	2,033.0	2,369.1
Tamaulipas	2,908.2	3,006.6	2,767.2	2,954.1	2,525.3	2,384.4	2,561.8	2,281.9	2,203.8	2,071.8	2,087.2	2,041.3	2,091.3	1,884.6	2,103.8	1,792.1	2,189.4	2,279.1	2,175.2	2,332.1
Veracruz	2,313.9	2,312.0	2,214.1	2,145.1	2,027.3	2,208.9	2,115.5	2,003.0	2,070.6	2,167.5	1,994.6	1,899.0	2,068.8	1,861.8	2,051.4	1,888.1	1,861.2	1,835.1	1,811.5	2,044.7
NACIONAL	2,297.8	2,288.0	2,212.8	2,195.8	2,088.3	2,136.8	2,101.3	1,989.4	2,027.6	2,070.8	1,921.5	1,893.6	1,941.0	1,804.4	1,924.8	1,804.4	1,826.4	1,788.9	1,771.2	2,004.5

Anexo 5. Porcentaje de carbono que se queda en la atmósfera

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	68.6	68.0	66.8	67.2	67.6	67.8	68.4	67.9	68.6	68.4	68.8	68.8	69.5	70.3	70.7	70.6	70.8	70.7	70.7	69.0
Chiapas	69.6	69.9	70.3	70.1	70.2	70.1	70.4	70.1	70.5	70.6	70.7	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.5
Colima	70.1	70.3	70.3	70.4	70.0	70.2	69.9	70.5	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.6
Jalisco	69.4	69.6	69.2	69.3	69.5	69.7	69.9	70.1	70.0	70.2	70.3	70.4	70.4	70.5	70.7	70.7	70.8	70.8	70.8	70.1
Michoacán	69.3	69.6	69.7	69.8	69.9	70.0	70.0	70.1	70.3	70.3	70.6	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.8	70.3
Morelos	68.1	68.1	68.1	68.3	68.5	68.6	68.3	68.4	68.2	68.3	68.8	69.5	69.9	70.2	70.4	70.4	70.6	70.8	70.8	69.2
Nayarit	69.5	69.9	69.1	69.6	69.6	69.7	69.7	70.0	70.2	70.5	70.5	70.7	70.7	70.8	70.8	70.7	70.7	70.7	70.8	70.2
Oaxaca	68.5	69.1	69.0	69.4	69.3	69.6	69.8	70.1	70.1	70.0	70.2	70.3	69.9	70.4	70.3	70.6	70.5	70.6	70.6	69.9
Puebla	68.9	68.7	69.2	69.6	69.5	69.6	69.8	69.8	70.0	70.1	70.4	70.5	70.6	70.7	70.6	70.7	70.7	70.8	70.8	70.0
Quintana Roo	69.5	69.7	69.5	69.3	70.2	70.5	70.5	70.6	70.7	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.8	70.5
San Luis Potosí	69.6	69.8	70.0	69.9	70.1	69.7	69.4	69.9	69.9	69.7	70.3	70.5	70.4	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.7	70.2
Sinaloa	69.2	69.4	69.5	69.1	69.5	69.4	69.4	69.4	69.8	69.8	70.0	70.2	70.6	70.7	70.7	70.5	70.2	70.8	70.8	69.9
Tabasco	68.6	68.9	68.9	68.5	68.5	69.3	69.5	69.5	69.3	69.6	70.0	70.3	70.1	69.8	70.7	70.8	70.7	70.7	70.7	69.7
Tamaulipas	68.2	68.1	67.7	67.8	68.2	68.6	68.2	69.0	69.3	69.9	69.8	69.9	70.2	70.2	70.6	70.3	70.5	70.6	70.4	69.4
Veracruz	68.4	68.3	68.2	68.5	68.7	68.7	68.9	69.2	69.3	69.4	69.8	70.1	70.1	70.3	70.3	70.5	70.6	70.8	70.7	69.5
NACIONAL	68.8	68.9	68.8	68.9	69.2	69.2	69.3	69.6	69.7	69.7	70.1	70.3	70.3	70.4	70.5	70.6	70.7	70.7	70.7	69.8

Fuente: Elaboración propia con datos del CONADESUCA

Anexo 6. Carbono que se queda en la atmósfera (kg)

ESTADO	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	Media
Campeche	2,552.5	2,707.4	2,436.1	2,552.1	2,425.4	1,818.0	1,803.8	1,799.9	1,842.5	1,932.3	1,716.0	1,855.7	1,564.1	1,532.9	1,286.5	1,306.8	1,459.2	1,156.1	1,344.3	1,846.9
Chiapas	1,495.1	1,344.7	1,241.4	1,286.1	1,325.7	1,347.9	1,370.0	1,410.0	1,253.4	1,238.8	1,153.0	1,143.8	1,117.6	1,141.5	1,215.5	1,214.9	1,191.9	1,171.3	1,269.0	1,259.5
Colima	1,673.5	1,390.1	1,658.1	1,539.2	1,277.5	1,363.1	1,386.2	1,189.7	1,209.0	1,154.6	1,176.0	1,161.9	1,211.6	1,181.1	1,236.9	1,207.1	1,201.7	1,148.0	1,162.5	1,290.9
Jalisco	1,404.2	1,389.7	1,398.9	1,416.1	1,348.4	1,294.3	1,271.1	1,229.5	1,315.2	1,300.6	1,147.7	1,245.4	1,216.5	1,236.0	1,247.9	1,154.7	1,195.2	1,173.7	1,122.5	1,268.8
Michoacán	1,378.8	1,440.4	1,641.5	1,470.6	1,557.5	1,352.1	1,350.9	1,383.2	1,462.1	1,359.9	1,365.0	1,333.3	1,263.8	1,258.8	1,242.1	1,234.5	1,193.4	1,227.5	1,222.6	1,354.6
Morelos	1,892.4	2,007.0	1,963.3	1,945.2	1,835.2	1,689.8	1,589.2	1,590.5	1,538.2	1,404.3	1,381.2	1,277.5	1,252.0	1,296.3	1,160.9	1,014.7	1,046.2	1,023.2	965.4	1,467.0
Nayarit	1,285.9	1,295.4	1,383.8	1,266.6	1,354.9	1,316.9	1,247.5	1,162.7	1,251.6	1,150.0	1,128.4	1,168.3	1,203.2	1,153.1	1,180.9	1,185.9	1,256.6	1,204.5	1,226.5	1,232.8
Oaxaca	1,428.7	1,380.0	1,286.8	1,309.5	1,255.9	1,378.7	1,326.1	1,265.7	1,248.4	1,339.7	1,290.7	1,266.2	1,396.7	1,173.5	1,446.0	1,314.8	1,323.6	1,314.8	1,255.0	1,315.8
Puebla	1,364.7	1,421.1	1,268.0	1,309.7	1,366.3	1,305.7	1,282.9	1,070.1	1,208.1	1,204.6	1,191.8	1,171.5	1,161.2	1,155.2	1,117.9	1,121.3	1,109.8	1,130.9	1,118.3	1,214.7
Quintana Roo	2,295.8	1,729.3	1,514.6	1,667.1	1,553.2	1,374.9	1,397.4	1,346.5	1,465.7	1,725.7	1,552.9	1,406.6	1,573.9	1,466.6	1,572.4	1,633.1	1,823.4	1,374.9	1,430.4	1,573.9
San Luis Potosí	1,436.0	1,633.4	1,567.0	1,592.5	1,430.1	1,690.2	1,686.7	1,543.2	1,440.9	1,647.3	1,421.7	1,589.1	1,483.0	1,199.3	1,445.9	1,193.5	1,235.6	1,332.3	1,317.9	1,467.7
Sinaloa	2,066.1	1,894.1	1,952.6	1,955.1	1,830.8	1,698.8	1,795.5	1,853.8	1,644.4	1,740.1	1,691.8	1,608.1	1,517.7	1,441.0	1,600.7	1,695.6	1,801.4	1,452.9	1,389.1	1,717.3
Tabasco	1,836.2	2,097.4	1,661.9	1,873.5	1,835.6	1,575.5	1,764.0	1,666.6	1,786.8	1,668.4	1,554.8	1,366.4	1,588.9	1,563.0	1,444.8	1,450.1	1,631.8	1,540.5	1,438.0	1,649.7
Tamaulipas	1,982.2	2,048.9	1,873.6	2,004.4	1,721.9	1,634.7	1,748.2	1,574.9	1,527.6	1,449.2	1,457.5	1,427.8	1,467.9	1,322.6	1,484.7	1,260.7	1,544.6	1,608.9	1,531.8	1,614.3
Veracruz	1,581.6	1,579.5	1,510.6	1,468.4	1,393.0	1,517.8	1,458.4	1,385.7	1,435.4	1,503.2	1,392.6	1,331.7	1,449.7	1,308.1	1,442.7	1,331.0	1,314.6	1,298.4	1,280.6	1,420.2
NACIONAL	1,580.6	1,577.1	1,522.9	1,514.0	1,444.4	1,479.1	1,456.5	1,383.7	1,412.3	1,443.9	1,346.2	1,330.7	1,364.0	1,270.8	1,357.6	1,273.8	1,290.7	1,265.6	1,252.6	1,398.2