



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS**

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

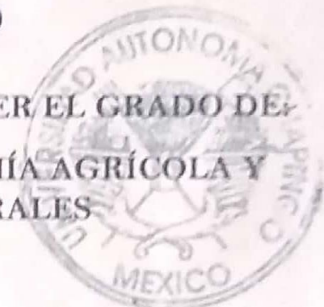
**BALANCE NETO DE LAS EMISIONES DEL DIÓXIDO DE  
CARBONO EN LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE  
AZÚCAR EN MÉXICO**

**TESIS**

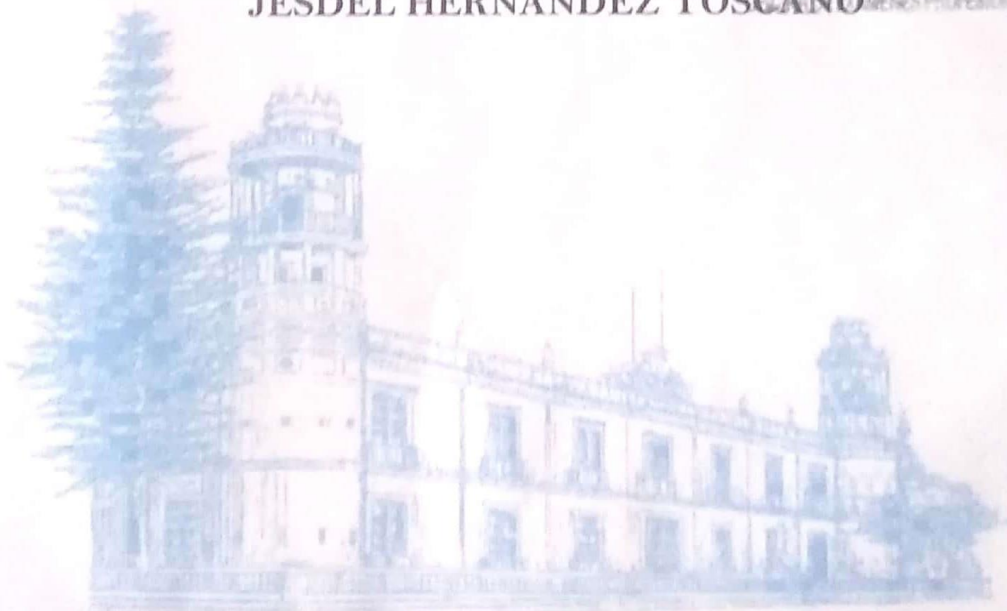
**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y  
DE LOS RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

**JESDEL HERNÁNDEZ TOSCANO**



**DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
CARRERAS DE INGENIEROS Y PROFESIONALES**

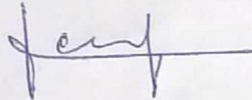


**CHAPINGO, EDO. DE MÉXICO, JULIO DE 2019**

**BALANCE NETO DE LAS EMISIONES DEL DIÓXIDO DE  
CARBONO EN LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZUCAR EN  
MÉXICO**

Tesis realizada por Jesdel Hernández Toscano 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: JOSÉ LUÍS ROMO LOZANO**



---

**CODIRECTOR: DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO**



---

**ASESOR: DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ**



---

**ASESOR: DR. CRISTÓBAL MARTÍN CUEVAS ALVARADO**

## AGRADECIMIENTOS

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

*Por el apoyo económico para poder  
realizar mis estudios de posgrado.*

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

*A la UACH por todo lo que me ha  
ofrecido y dado todos estos años, y a  
la DICEA por permitirme realizar mis  
estudios de posgrado.*

*Al Dr. José Luís Romo Lozano.*

*Por todo su apoyo y conocimiento  
otorgado para la realización de esta  
investigación.*

*Al Dr. Ramón Valdivia Alcalá.*

*Por todo su apoyo para la realización  
de esta investigación, por su apoyo  
para realizar una buena estancia de  
investigación, y por sus consejos y  
regaños que me han servido de mucho  
en mi formación.*

*Al Dr. Fermín Sandoval Romero.*

*Por su apoyo incondicional durante  
todo este tiempo para la culminación  
de este proyecto.*

## DEDICATORIA

### ***A mi familia:***

*Principalmente a mi madre, por todo su amor, apoyo incondicional, por sus regaños y por nunca dejarme caer, a mis abuelos que, aunque ya no están físicamente siempre los llevare en mi corazón, a mis hermanos en especial a Seyma, por siempre creer en mí y siempre apoyarme.*

### ***A mis hermanos de los Toros Salvajes:***

*Al Nene por ser un gran amigo y a su familia por todo su apoyo y consejos, al Alen, Porno, Pornito, Gapi, Ogro, Chava, Víctor, Virus, Estevez, Zorrilla, Iguano, Yoda, Jlo, Abel, Big Foot, Landa, Moreno, Canelo, Félix, Jordan, Japo, Chava corner, por siempre estar ahí apoyándonos en las buenas y las malas y nunca dejarnos caer, saben que cuentan conmigo para todo, igual que todos los amigos que me ha dejado este equipo.*

### ***A mis amigos:***

*Harrison, Carlos, Higinio, Mayoya, Rodrigo, Chino, Vafe, Aaron, Fernanda, por todavía conservar la amistad después de la universidad y el apoyo que nos brindamos, a Ximena por siempre animarme y apoyarme gracias por estar ahí, a Steph por ser una gran amiga que siempre me apoya, a mis amigos de mi pueblo, Felipe, Deco, Moro, Yosi, por siempre creer en mí, a mis amigos de la maestría, Chava, Elester, Iván, Ilich, Chuy, Christian, Brenda, Yira, por estos dos años de buenos momentos, y a todos mis amigos que he conocido en este viaje llamado vida, a todos gracias por compartir momentos y experiencias que siempre serán recordadas.*

## RESEÑA PROFESIONAL

**JESDEL HERNÁNDEZ TOSCANO (1991-)**



**Nació en la localidad de Collantes, Municipio de Pinotepa Nacional en el estado de Oaxaca, segundo hijo de cuatro, se crió y vivió con su madre, hermanos y abuelos.**

A los 6 años ingresó a la escuela primaria “Patria” en la localidad de Collantes en el periodo 1997-2003, enseguida ingresó a la escuela secundaria general “José A. Baños Aguirre en la ciudad de Pinotepa en el periodo 2003-2006.

En el año 2006 a la edad de 14 años ingresó a la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, egresando en el 2010, para posteriormente ingresar a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola, concluyendo sus estudios en el 2014, obteniendo su título unos meses después.

En el periodo de 2015 a 2017, trabajó en Estados Unidos en una granja piscícola como asistente de mantenimiento, para así posteriormente aplicar para la Maestría en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales.

# Índice

<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Hipótesis.....	4
<b>CAPÍTULO II. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
3.1. Antecedentes .....	19
3.2 Principios bioquímicos de la captura de carbono de la caña de azúcar.....	20
3.3. Poder de calentamiento global de los gases de efecto invernadero .....	22
3.4. Huella de carbono de la caña de azúcar.....	23
3.5. Análisis del ciclo de vida del producto .....	24
3.6. Teorías y métricas alternativas .....	25
3.7. Factores de emisión de los gases de efecto invernadero .....	27
3.8. Fórmula para el cálculo de las emisiones en la quema de caña .....	27
3.9. Fijación de dióxido de carbono por la caña de azúcar .....	28
3.10. Cambio climático.....	29
3.11. Efecto invernadero.....	33
3.12. Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	35
3.13. El ciclo del carbono .....	38
3.14. Los sumideros de carbono .....	40
3.15. El mercado de bonos de carbono.....	41
<b>CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
4.1. Metodología de estimación de emisiones en la agroindustria cañera .....	43
4.2. Análisis de las variables .....	44
4.2.1. Cálculo de las emisiones de CO <sub>2</sub> por la quema de bagazo.....	44
4.2.2.Cálculo de las emisiones de CO <sub>2</sub> por el consumo de petróleo.....	44
4.2.3.Cálculo de las emisiones de CO <sub>2</sub> por el consumo de energía eléctrica.....	45
4.2.4.Emisiones totales de CO <sub>2</sub> en la agroindustria de la caña de azúcar.....	45
4.2.5.Consumo total de energía utilizada en la agroindustria azucarera .....	46
4.3. Evaluación del nivel de sustentabilidad .....	46

4.4. Metodología de cálculo de la captura de CO <sub>2</sub> atmosférico.....	46
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
5.1 Emisiones de la agroindustria de la caña .....	48
5.2. Carbono secuestrado por unidad de superficie de caña de azúcar .....	48
5.3. Balance de emisiones de dióxido de carbono .....	53
5.4. Limitaciones del estudio.....	56
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
6.1. Conclusiones.....	58
6.2. Recomendaciones .....	58
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>60</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>66</b>
Equivalencia de los gases de efecto invernadero a carbono equivalente .....	66
Procedimiento para el cálculo del carbono secuestrado por la caña .....	67

### Índice de Cuadros y Tablas

Cuadro	5.1	Emisiones de GEI en términos de CO <sub>2e</sub> de la molienda de la caña azúcar en México.....	50
Cuadro	5.2	Captación anual total de carbono por hectárea de una plantación de caña de azúcar.....	51
Cuadro	5.3	Co <sub>2e</sub> capturado por las plantaciones de caña en México	53
Cuadro	5.4	Balance de emisiones netas de CO <sub>2</sub> de la agroindustria de la caña de azúcar en México.....	53
Cuadro	5.5	CO <sub>2e</sub> emitido y secuestrado por la caña de azúcar.....	55

### Índice de Gráficas

Gráfica	2.1	Consumo total de energía de las principales ramas industriales de México	14
Gráfica	2.2	Estructura del consumo energético de las principales ramas industriales por tipo energético 2015.....	15

## Siglas y abreviaturas

CFE	=	Comisión Federal de Electricidad
CH <sub>4</sub>	=	Metano
CIDCA	=	Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar
CN	=	Carbono negro
CNIAA	=	Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica
CO	=	Monóxido de carbono
CO <sub>2e</sub>	=	Dióxido de carbono equivalente
CONADESUCA	=	Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar
EPA	=	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GEI	=	Gases de Efecto Invernadero
HFC	=	Hidrofluorocarbono
IMPA	=	Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar
INECC	=	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	=	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
Kw	=	Kilowatt
LGCC	=	Ley General de Cambio Climático
LTE	=	Ley de Transición Energética
MJ	=	Megajoules
NO <sub>2</sub>	=	Óxido Nitroso
PFC	=	Perfluorocarbono
PIB	=	Producto Interno Bruto
PJ	=	Pentajoule
PM <sub>10</sub>	=	Material Particulado de 10 micras
PM <sub>2.5</sub>	=	Material Particulado de 2.5 micras
PPB	=	Partes por Billón
PPM	=	Partes por Millón
SENER	=	Secretaría de Energía
SF <sub>6</sub>	=	Hexafluoruro de azufre
SO <sub>2</sub>	=	Óxido de azufre
UNC A.C. –CNPR	=	Unión Nacional de Cañeros de la Confederación Nacional de Propietarios Rurales



# BALANCE NETO DE LAS EMISIONES DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN MÉXICO

Jesdel Hernández Toscano<sup>1</sup> y José Luis Romo Lozano<sup>2</sup>

RESUMEN	SUMMARY
<p>La agroindustria de la caña de azúcar aportó en 2017 el 3% del Producto Interno Bruto Agrícola, impacta con la generación de empleos a 267 municipios de 15 entidades en México, cosechó 777,078 hectáreas de caña molida neta y produjo 5'970,373 toneladas de azúcar base estándar utilizando para ello combustible fósil, electricidad proveniente de la CFE y quema de biomasa de bagazo en el eslabón de fábrica. El proceso de molienda genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al problema de calentamiento global. Por otro lado, las plantaciones de caña de azúcar ayudan al secuestro del carbono y a su fijación como carbono orgánico en los suelos. El objetivo de la presente investigación fue cuantificar las emisiones de GEI de la agroindustria azucarera y determinar la cantidad secuestrada de carbono por la superficie cosechada de caña molida neta y realizar un balance neto de emisiones. El periodo de estudio se realizó para las zafras 2006/07 - 2015/16. La metodología en el caso de las emisiones fue utilizar los factores de emisión y el poder calorífico de los GEI y poder expresarlos a éstos en términos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2e</sub>). El carbono secuestrado se estimó convirtiendo el porcentaje de carbono contenido en las partes de la caña de azúcar como hojas, tallos, cachaza, etc., base seca a CO<sub>2e</sub>. El balance neto se definió como la diferencia entre las emisiones y el carbono secuestrado, ambos en términos de CO<sub>2e</sub>. Los resultados muestran que el periodo de estudio el promedio de emisiones fue de 9'751,875 ton CO<sub>2e</sub> y el carbono secuestrado por la superficie cosechada fue de 40'359,062 ton CO<sub>2e</sub>. De esta manera se concluye que el carbono secuestrado por las plantaciones de la caña de azúcar es muy superior a las emisiones con una relación de 1 a 4.1 por lo que recomienda profundizar el estudio y explorar si es que la agroindustria puede a futuro participar en el mercado de bonos de carbono.</p> <p><b>Palabras clave:</b> gases de efecto invernadero, factores de emisión, poder calorífico, secuestro de carbono, bonos de carbono.</p>	<p>The Mexican sugarcane industry contributed 3% of the Agricultural Gross Domestic Product of Mexico in 2017. The industry generated jobs in 267 municipalities of 15 states in Mexico. A total of 777,078 hectares of net ground cane were harvested and 5,970,373 tons of standard sugar base were produced using fossil fuel, electricity from the CFE and the burning of bagasse biomass in sugar mills. The grinding process generates greenhouse gas (GHG) emissions that contribute to the problem of global warming. On the other hand, sugarcane plantations help carbon sequestration and its fixation as organic carbon in soils. The study period was carried out for the harvests 2006/07 - 2015/16. The methodology in the case of emissions was to use the emission factors and the calorific value of GHGs and express them in terms of equivalent carbon dioxide (CO<sub>2e</sub>). The carbon sequestered was estimated by converting the percentage of carbon contained in the parts of the sugar cane such as leaves, stems, filter cake, etc., dry base to CO<sub>2e</sub>. The results show that over the study period the average emissions were 9,751,875 tons of CO<sub>2e</sub> and the carbon sequestered by the harvested area was 40'359,062 tons CO<sub>2e</sub>. The study concludes that the carbon sequestered by the sugarcane plantations is much higher than the emissions with a ratio of 1 to 4.1. An important recommendation is to explore whether the agroindustry can participate in the future carbon bond market.</p> <p><b>Keywords:</b> greenhouse gases, emission factors, calorific value, carbon sequestration, carbon bonds.</p>

---

<sup>1</sup> Tesista

<sup>2</sup> Director

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el CONADESUCA (2017) en la zafra 2016/2017 se cosecharon 777,078 hectáreas y se levantaron 53'308,643 toneladas de caña molida bruta. Se tuvo una oferta de 5'970,373 toneladas de azúcar base estándar. El rendimiento en fábrica fue de 13.194% y en campo de 68.6 toneladas por hectárea. El valor aproximado de la caña de azúcar, así como el del azúcar, alcanzaron los 42 mil 948 millones de pesos y 71 mil 486 millones de pesos en la zafra 2016/2017 respectivamente. Esta derrama económica tiene impacto directo en 267 municipios de 15 estados del país, donde habitan 15 millones de mexicanos. La agroindustria de la caña de azúcar del país tiene capacidad instalada para industrializar más de 53 millones de toneladas, producir más de seis millones de toneladas de azúcar que garantizan el abasto nacional y dan cumplimiento a los compromisos internacionales. En términos macroeconómicos, la caña de azúcar contribuye con el 3% del Producto Interno Bruto Agrícola (PIB) y aproximadamente el 7% del valor de la producción agrícola. Este contexto muestra la importancia de la agroindustria de la caña de azúcar en el sector agropecuario en particular y en la economía en general (CONADESUCA, 2017; SIAP<sup>3</sup>).

No obstante, la agroindustria de la caña de azúcar también es importante por dos razones estrechamente vinculadas a su importancia económica. Por un lado, la caña de azúcar es un cultivo agroindustrial que es el insumo básico para la azúcar estándar a granel que consta de varios eslabones, pero distinguiéndose principalmente el eslabón de campo y el eslabón de molienda. En segundo lugar, el cultivo de la caña de azúcar ocupa un poco más de medio millón de hectáreas que la hacen actuar como un importante sumidero de carbono.

En el primer caso, la producción de la caña de azúcar en la fase de campo implica toda una serie de actividades de preparación del terreno como son subsoleo, rastreo, barbecho, entre otras que utilizan maquinaria para ser realizadas y por lo tanto requieren gasolina y diesel para su realización. Las labores de siembra

mecanizada, las labores culturales, el corte y alza mecanizada, el transporte en camiones y tractores de la caña cosechada para ser colocada en el batey de los ingenios azucareros para su realización y movilización requieren de energía proveniente de la quema de gasolina y diésel también. En el eslabón de campo también se utilizan fertilizantes nitrogenados que desprenden nitratos y gases como metano durante su aplicación en tierras cultivadas con caña, sobre todo en la fase de plantilla, aunque en la soca y resocas también se llegan a aplicar fertilizantes. Adicionalmente, para facilitar el corte de la caña se realiza la quema del cultivo. De este planteamiento es posible ver que en el eslabón de campo se quema combustible de origen fósil, gasolina y diésel, que son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero.

En el eslabón de fábrica, la generación de energía para mover los equipos para realizar la molienda se realiza a través de la quema importante de combustóleo y diésel en calderas que por lo general son altamente ineficientes por lo que es en esta fase donde se realiza la mayor cantidad de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que es el precursor del forzamiento radiactivo positivo desde los tiempos de la revolución industrial de finales del siglo XVIII. En el eslabón de molienda, no obstante, también se generan emisiones por la quema de bagazo de la propia caña que se utiliza para generar energía para realizar la molienda de la caña de azúcar. Una fuente de energía que también debe considerarse en la cuantificación de las emisiones de  $\text{CO}_2$  realizadas por la agroindustria cañera es el consumo de electricidad producida por la Comisión Federal de Electricidad.

Por otro lado, y respecto a la caña de azúcar como sumidero de dióxido de carbono es importante mencionar las siguientes consideraciones. La caña de azúcar es un cultivo que realiza el metabolismo fotosintético mediante el mecanismo C4 o también llamado ciclo de Calvin. Mediante este mecanismo, la caña de azúcar fija carbono atmosférico a través de la fotosíntesis a tallos, hojas, raíces, inflorescencias, y varios más. De esta manera la caña de azúcar puede actuar como un sumidero de dióxido de carbono, que en caso de que dicha

captura de este gas sea mayor que las emisiones del CO<sub>2</sub> de los eslabones de campo y fabrica, la caña de azúcar sería un firme candidato para acceder al financiamiento a través del mecanismo de bonos de carbono, pues estaría ayudando a mitigar el problema de cambio climático.

En este marco, el estimar la cantidad de CO<sub>2</sub> generado en los eslabones de campo y de fábrica y estimar la cantidad de carbono capturada en la superficie sembrada de caña de azúcar resulta de interés para determinar el balance neto de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel de la agroindustria de la caña de azúcar. El referido balance neto resultará de la identidad emisiones de dióxido de carbono menos la captura de carbono ya sea por estado, ingenio o a nivel nacional. El periodo de estudio considerado para la zafra de 2006/2007 a la zafra 2015/2016.

### **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<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (NO<sub>2</sub>), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)), 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, p.2), dentro de estos gases el CO<sub>2</sub>, 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 y agua. 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. 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<sub>2</sub>. 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. Cuantificar la cantidad de carbono secuestrado por unidad de superficie de una plantación de caña de azúcar por año.
2. Cuantificar la cantidad capturada de dióxido de carbono equivalente por unidad de superficie
3. Estimar el balance neto de dióxido de carbono equivalente como la diferencia entre las emisiones de este gas de efecto invernadero, debido a la molienda de la caña de azúcar en ingenio, y el dióxido de carbono equivalente capturado por las plantaciones de caña de azúcar durante una zafra por año.

## **1.3. Hipótesis**

- La cantidad neta secuestrada de carbono, en términos de dióxido de carbono equivalente, es mayor que las emisiones de dióxido de carbono equivalente generadas por la utilización de combustibles fósiles y quema de

biomasa de bagazo durante el proceso de molienda de la caña de azúcar en ingenio para obtener el azúcar a granel.

## CAPÍTULO II. REVISION DE LITERATURA

El trabajo de Chandel *et al* (2011) tuvo como objetivo explorar el uso del bagazo y las hojas de la caña de azúcar como fuentes más baratas de carbohidratos para diversificar su uso a través del desarrollo en aplicaciones industriales, uso en productos comerciales su evaluación comercial y su potencial como biocombustibles. La metodología utilizada fue la sucro-química; es decir la determinación de la composición química de las partes de la caña de azúcar. La sucro-química es uno de los procedimientos de análisis químico más desarrollados, dada la importancia de la caña de azúcar en términos de valor económico, empleo y la búsqueda de diversificación de su utilización. Los resultados del análisis sucro-químico del bagazo muestran que, a través del tratamiento alcalino suave, autohidrólisis y la su deslignificación, éste puede ser convertido en subproductos de alto valor agregado como el xylitol, etanol, ácidos orgánicos industriales, enzimas, solventes, pigmentos, proteína, entre otros.

La utilidad de de la sucro-química se debe a que ayuda a separar los subproductos que se obtienen del bagazo y hojas y tallos de la caña de azúcar y se puede cuantificar la cantidad de carbono contenido en cada subproducto y sobre una base de materia seca se estima con precisión cuanto carbono es secuestrado por una hectárea de caña por ciclo productivo o zafra.

La investigación de Múgica (2016) **“Determinación de los factores de emisión de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y contaminantes de vida corta, metano (CH<sub>4</sub>) y carbono negro por prácticas de quema de agrícola”** es un trabajo colectivo realizado por la Universidad Autónoma Metropolitana como trabajo de consultoría por contrato cuyo objetivo general fue determinar los factores de emisión de contaminantes climáticos CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CH<sub>4</sub> y carbono negro generados por la quema de biomasa en México durante los procesos agrícolas de maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo, frijol, cebada, algodón y alfalfa. La investigación tuvo cinco objetivos específicos muy amplios siendo los primeros tres los más relevantes:

1. Diseñar un equipo para la medición y análisis de los factores de emisión de la quema de biomasa que simule las condiciones de la quema agrícola a cielo abierto para medir isocinéticamente los parámetros de velocidad de flujo, emisión de gases y temperatura de la quema.
2. Cuantificar las concentraciones de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , carbono orgánico y carbono negro (elemental) y gases de la combustión ( $CO_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ ) durante la quema simulada y controlada (temperatura, humedad, cantidad de biomasa incinerada y colección total de todos los contaminantes analizados) de los residuos de maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo, frijol, cebada, algodón y alfalfa.
3. Determinar los factores de emisión de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , carbono orgánico, carbono negro y gases de la combustión ( $CO_2$ ,  $CO$  y  $CH_4$ ) durante la quema de las variedades agrícolas mencionadas.

Un señalamiento importante a esta referencia es que, si bien se enuncia que corresponde a ocho cultivos en la realidad el contenido de los documentos correspondientes a informes de avances de la investigación, corresponde a la caña de azúcar. Esto debido a dos situaciones. El primero es que la caña es un cultivo que cuenta con un registro sistemático correspondiente a cada zafra desde inicios de los años noventa. Los registros son exhaustivos y registra información de más de 70 variables correspondientes a los eslabones de campo y fábrica. En segundo lugar, la quema precosecha y postcosecha solo se realiza en la caña de azúcar, pues difícilmente se quemará biomasa correspondiente a maíz, frijol, etc., y de ser así solo se quemarían los rastrojos postcosecha.

La metodología del estudio es muy amplia y la misma corresponde casi exclusivamente a la caña de azúcar. La metodología es interdisciplinaria/multidisciplinaria y transdisciplinaria pues para llegar a los resultados se utilizaron herramientas de una gran cantidad de disciplinas



calificadas como ciencias naturales. La metodología puede dividirse en una forma secuencial como sigue.

En primer lugar, en el apartado de colecta de residuos se describe solo el cómo se realizó para la caña de azúcar. De esta manera se colectaron alrededor de 200 kilogramos residuos de caña de azúcar en cinco sitios del país para realizar las pruebas de desempeño del quemador, chimenea y equipo isocinético, así como para obtener los factores de emisión por la quema; en tanto que de los residuos de los demás cultivos se colectaron alrededor de 100 kilogramos de tres diferentes variedades de distintos sitios de la República Mexicana, de preferencia en localidades diversas del norte, centro y sur del país.

La metodología correspondiente a la caracterización de los residuos y con la finalidad de establecer las posibles diferencias entre las variedades de cada cultivo, se realizaron los siguientes análisis por triplicado una vez que se obtuvieron las muestras en el laboratorio: determinación del porcentaje de humedad de la biomasa de las muestras y determinación analítica del contenido de carbono (C), nitrógeno (N), hidrógeno(H) y azufre (S) de las mismas.

Respecto a la metodología para la determinación de los factores de emisión de los contaminantes climáticos de vida corta de residuos agrícolas, si bien es compleja es necesaria enunciarla a grandes rasgos pues son los parámetros que habrán de utilizarse para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero y su conversión a unidades de carbono equivalente como unidad de conteo a la cual son convertidos referidos gases.

En primer lugar, se diseñó un equipo para simular quemas a cielo abierto de residuos agrícolas principalmente de caña de azúcar. Sobre el equipo se colocó un quemador que se coloca sobre una balanza que registra el cambio de masa, sobre el que se tiene una malla sujetadora que pueda contener un importante volumen de residuos y sobre el quemador se coloca una campana que aspire los humos generados durante la combustión que se conducen a través de una

chimenea de 20 cm de diámetro que contiene un puerto de muestreo a la altura de 1.8 m., donde se introduce una lanza de muestreo que conduzca a un ciclón para atrapar partículas  $PM_{10}$  o  $PM_{2.5}$  y a los analizadores de gases de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  y  $CH_4$

Posterior a el paso descrito en el párrafo anterior, metodológicamente se debe realizar el muestreo isocinético, el cual es una técnica que tiene la finalidad de obtener una muestra representativa en condiciones reales del conducto de salida de gases de combustión, a través de igualar las velocidades entre la velocidad lineal de flujo de la chimenea y la velocidad de succión en la entrada de la boquilla de la sonda de muestreo con la finalidad de lograr su representatividad. El procedimiento del muestro isocinético es altamente técnico y puede consultarse el documento. El siguiente paso dentro del muestreo isocinético es el establecimiento de un protocolo para la quema de residuos agrícolas. En el estudio se consideraron diversos protocolos de quema de residuos agrícolas considerando las variables: a) humedad, b) alimentación (continua o en lote), c) cantidad de biomasa (de 0.5 a 2 kilogramos) y d) tiempo de quema.

De acuerdo con la metodología una vez realizado el muestreo isocinético se procedió a determinar el carbono negro y el carbono elemental utilizando un analizador de carbono termo-óptico con corrección de reflectancia. También se muestra en este apartado metodológico del artículo las ecuaciones subyacentes detrás de los factores de emisión.

En los resultados de la investigación se presentan los factores de emisión de gases por quema estimados en este trabajo para los ocho cultivos enunciados al principio. Para la caña de azúcar los factores de emisión resultaron ser los siguientes (gramos del contaminante por kilogramo de residuo quemado en la precosecha y postcosecha):

PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	Carbono negro	Carbono Orgánico	Monóxido carbono	Dióxido carbono	Metano (CH <sub>4</sub> )
1.19±0.1	1.81±0.78	0.37±0.10PM <sub>10</sub> 0.34±0.09PM <sub>2.5</sub>	0.67±0.36PM <sub>10</sub> 0.44±0.13PM <sub>2.5</sub>	25.70±5.51	1617.98±108.7	2.29±0.23

Estos resultados son comparados con referencias de autores internacionales que han calculado las emisiones para la caña y en general los resultados estimados coinciden con los mismos.

Finalmente, es importante señalar que estos son los factores de emisión que se utilizarán para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por la quema de la caña de azúcar para el periodo de estudio de 10 años. Una vez hecho esto, utilizando el poder calorífico para cada uno de los gases los mismos se expresarán en términos de dióxido de carbono equivalente, que ayudan a visualizar cual es la cantidad de contaminantes emitidos a la atmosfera por la actividad de la agroindustria de la caña de azúcar cada zafra.

Este informe es una referencia fundamental para el marco teórico de la investigación pues permite utilizar datos estimados experimentalmente y en campo para realizar la estimación de los gases de efecto invernadero en términos de carbono. Es la única fuente localizada que no hace estimaciones “gruesas” o subjetivas basadas en los llamados paneles de expertos o en opiniones de expertos que pueden dar resultados sesgados de los estimados de los gases de efecto invernadero.

Para la presente investigación el trabajo de Beeharry, R., P. (2001), “**Carbon balance of sugarcane bioenergy systems**” es el más relevante. El objetivo de la investigación es determinar si en el país de origen de los autores (Isla Mauricio) es factible la aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) definido en el artículo 12 del Protocolo de Kioto. El MDL permite a los gobiernos de los países industrializados y a las empresas suscribir acuerdos para cumplir con metas de reducción de gases de efecto invernadero invirtiendo en proyectos de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo, como una alternativa para adquirir reducciones certificadas de emisiones (RCE) a menores costos que en sus

mercados. La isla de Mauricio está situada en el suroeste del Océano Índico y tiene una superficie terrestre de poco más de 2,000 kilómetros cuadrados y su economía está basada en el cultivo de la caña de azúcar y su población era menor a 1.2 millones de habitantes en el año 2000.

En la investigación se hace una amplia exposición de antecedentes en la que se destaca el señalamiento de que existe una idea erróneamente concebida de que la utilización de sistemas que utilizan fuentes de bioenergía no tienen emisiones netas de dióxido de carbono, pues se ha pensado que las estrategias de bioenergía, cuando se opera de manera sostenible, reabsorben la cantidad equivalente de CO<sub>2</sub> que se libera mediante la oxidación de los biocombustibles y por lo tanto no existen emisiones netas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera; pero que sin embargo, los estudios sobre biosistemas de caña de azúcar han concluido que si existe una contribución neta de dióxido de carbono a la atmósfera, pero la cual es mucho menor a la contribución que hacen los sistemas de energía basados en el uso de combustibles fósiles.

El marco metodológico utilizado en la investigación es éste y se basa en la metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA) justificando su uso pues esta metodología permite contabilizar todas los flujos materiales y energéticos asociadas con un sistema bioenergético, al tiempo que hace un seguimiento de los productos (productos, energía, materiales de desecho) a lo largo del ciclo de producción; aunque se aclara que por cuestiones operativas, en la práctica no todos los flujos materiales o energéticos pueden ser contabilizados aun en el caso de la caña de azúcar, donde por lo general si existe un registro aún a nivel de operación unitaria de lo que entra y sale en la agroindustria de la caña de azúcar.

Los resultados de la investigación confirman que para la Isla Mauricio existe el potencial del uso de sistemas de bioenergía de caña de azúcar para la generación de electricidad excedente, al tiempo que ayuda a reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera; es decir, es factible la aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio en tal país. Este resultado esté basado en el hecho de que

utilizando datos de Mauricio, los autores demostraron que, dependiendo del grado de utilización de residuos de caña, las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas (en comparación con la cadena de combustible de carbón) oscilarían entre 1.081 y 1.137 kg de CO<sub>2</sub> / kW-hora, cifras que son resultado de rastrear el uso de energía y, por lo tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de todo el ciclo del combustible en el proceso de producción de la agroindustria de la caña de azúcar.

De esta manera, el artículo es útil para el marco teórico de la investigación propuesta pues ilustra el cómo se debe contabilizar metodológicamente todos los flujos materiales y energéticos que ayudan a determinar no solo el balance energético del ciclo de producción de la caña de azúcar (campo e industrialización) sino a determinar el balance neto de emisiones de gases de efecto invernadero de la caña de azúcar; es decir, contestar la pregunta si la caña de azúcar en el caso mexicano captura una mayor cantidad de dióxido de carbono atmosférico que la cantidad emitida por la actividad antropogénica del hombre para obtener el azúcar de caña. De particular relevancia son los datos de las seis tablas de dicho artículo. Al respecto cabe señalar que si bien se puede argumentar que las condiciones agroecológicas de México no son las mismas que las de la Isla Mauricio, no obstante debe señalarse que las regiones de mayor producción en México (regiones Cuenca del Papaloapan y Córdoba Golfo) se encuentran en las mismas latitudes norte que donde se encuentra ubicada la Isla Mauricio, situación que se puede corroborar mediante los Sistemas de Información Geográfica y el análisis geoespacial de los datos de rendimientos y varios indicadores más de la caña de azúcar, los cuales resultan tener ciertas regularidades con los datos de aquel país.

Los tres anteriores artículos se han resaltado de la forma que se ha hecho dado que son en los que se fundamenta la presente investigación, por lo que en la revisión de literatura que se hace en los restantes párrafos no cita más el título de la referencia sino solo el autor y como usualmente se hace.

El azúcar es 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).

De acuerdo con los autores Díaz, Espinosa y Mondragón (1995) 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 la línea de producto(s) y su unidad termina al llegar su producción a los consumidores o a formar parte de otro sistema no agroindustrial.”

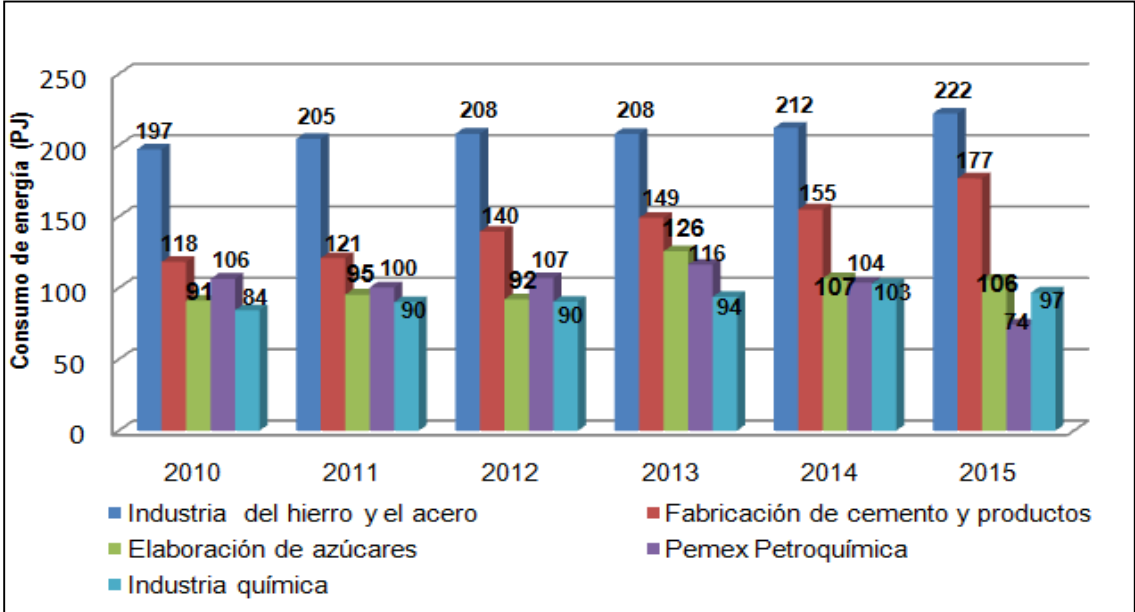
Así, el sistema agroindustrial del azúcar se compone de cuatro etapas secuenciadas: la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); su abastecimiento al ingenio; la agroindustria o transformación industrial; y la comercialización del azúcar, subproductos (bagazo, melaza, cachaza, ceniza, residuos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

El Balance Nacional de Energía (SENER, 2015) para dar a conocer el consumo energético de las diferentes ramas industriales las cataloga de acuerdo con

el 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 considerarla 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 azúcares (SENER, 2015, p. 101) se le sumó la cantidad de energía obtenida del bagazo dentro de las centrales eléctricas de autogeneración (SENER, 2015, p. 94) ambos reportados en el Balance Nacional de Energía.

Gráfica 2.1. Consumo total de energía de las principales ramas industriales en México



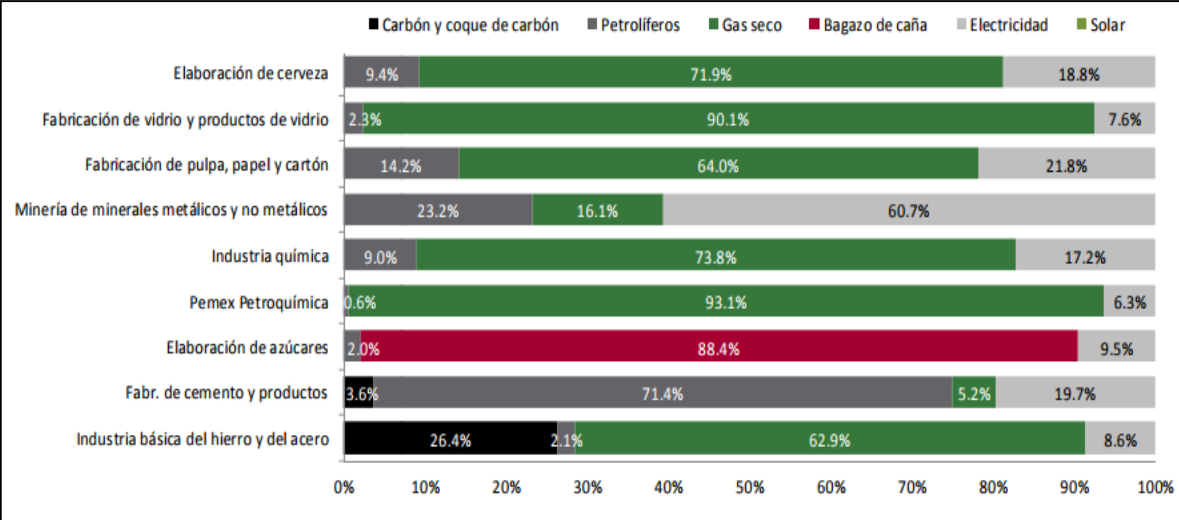
Fuente: elaborado a partir de SENER (2015).

Como se observa en la Gráfica 1.1 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 74.41 PJ, 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.

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 la CFE.

Gráfica 2.2. Estructura del consumo energético de las principales ramas industriales por tipo de energético 2015



Fuente: SENER (2015).

De esta manera, 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 1.2) del consumo energético del ramo (SENER, 2015, p.41). 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.

Existen diversas metodologías para poder medir la huella de Carbono, entre las que se encuentran: The Life-Cycle Assessment (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 Consejo 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  $947 \pm 1381$  kg CO<sub>2</sub>e/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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Aplicando la metodología a dos tecnologías de producción de acero en México, se estableció que de las emisiones de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 (CO<sub>2</sub>), 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, Quintana Roo con 2,223 kilogramos y Tabasco con 2,162 kilogramos.

# CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

## 3.1. Antecedentes

De acuerdo con Houghton (2004) los conceptos de cambio climático y calentamiento global suelen utilizarse indistintamente. No obstante, ambos conceptos si bien están íntimamente relacionados son diferentes. El cambio climático es el cambio por causas naturales o antropogénicas del clima a nivel global o regional a lo largo del tiempo. Por ejemplo, un cambio en la energía de la tierra puede resultar en un aumento o una disminución de las temperaturas globales. El cambio climático es un cambio estable y durable en la distribución en periodos temporales que pueden ser décadas hasta millones de años. El cambio pudiera ser por las condiciones climáticas promedio o la distribución de eventos en torno a dicho promedio. El cambio climático puede estar limitado a cierto punto o región específica como poder abarcar toda una superficie terrestre.

El calentamiento global se refiere al aumento gradual de las temperaturas tanto oceánicas como atmosféricas de la tierra. El calentamiento global es causado principalmente por aumentos en los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{NO}_x$ ), el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) el hidrógeno, el carbono negro, el material particulado menor a dos y media micras y a diez micras ( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ ), entre los principales.

El origen de las emisiones de los gases de efecto invernadero son naturales como antropogénicas. A lo largo de miles o millones de años han existido emisiones de origen geológico, volcánicas o aún por el propio ciclo del carbono. El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico por el cual el carbono se intercambia entre la biosfera, la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera de la tierra. Se considera que el ciclo del carbono está constituido por cuatro reservorios principales de carbono interconectados por rutas de intercambio. Los reservorios son la atmósfera, la biosfera terrestre (que, por lo general, incluye sistemas de agua dulce y material orgánico no vivo, como el carbono del suelo), los océanos (que incluyen el

carbono inorgánico disuelto, los organismos marítimos y la materia no viva), y los sedimentos (que incluyen los combustibles fósiles). Los movimientos anuales de carbono entre reservorios ocurren debido a varios procesos químicos, físicos, geológicos y biológicos. No obstante, considerando las escalas geológicas de tiempo, la problemática de las emisiones de carbono en la atmósfera alcanza una estabilidad que permiten mantener un balance entre temperaturas que permitieron el desarrollo tal como la paleontología ha permitido conocerla o como la misma se desarrolló durante la aparición, evolución y desarrollo del ser humano sobre la tierra.

No obstante, a partir de la Revolución Industrial de finales del siglo XVIII la actividad antropogénica del hombre ha alterado el referido balance natural. De esta forma, las emisiones de gases de efecto de origen industrial y de la actividad agrícola basada en insumos y equipo de capital moderno.

Una característica de la Revolución Industrial es la utilización de combustibles fósiles cuyo origen se encuentra en el carbono orgánico cuyo origen es la materia orgánica no totalmente descompuesta en ausencia de oxígeno, que dio origen a la hulla, el petróleo y el gas natural. La liberación de ese carbono a través de la quema de combustibles fósiles con la Revolución Industrial y la deforestación de inmensas áreas de superficie para cultivos comerciales, para satisfacer las necesidades de las sociedades de consumo, la creciente población y el sostenimiento de los niveles de bienestar alcanzados en los países desarrollados, ha conducido al calentamiento global cuya causalidad son los gases de efecto invernadero.

### **3.2 Principios bioquímicos de la captura de carbono de la caña de azúcar**

En el planeta todas las plantas acuáticas y terrestres son fijadoras de carbono a través del mecanismo de la fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual la energía luminosa se transforma en energía química. Se denominan plantas C3 a las plantas en las que el primer compuesto orgánico fabricado en la

fotosíntesis tiene tres átomos de carbono (C3) y en las C4 el primer compuesto tiene cuatro carbonos. El 85% de las plantas superiores son C3 y casi el restante 15% son del tipo C4.

Las plantas C4 se encuentran principalmente en los trópicos y entre ellas están la caña de azúcar y el maíz. Se les ha dado el nombre de plantas C4 debido a que una molécula de cuatro carbonos desempeña un papel destacado en una ruta bioquímica que evita la fotorespiración. Esta ruta se denomina ruta C4. Las plantas C4 poseen en sus hojas dos clases de células fotosintéticas: células mesófilas y células de la vaina del haz. En las plantas C3, la fotosíntesis tiene lugar en las células mesófilas. La mayoría de las células mesófilas en ambas clases de plantas se encuentran en contacto directo con el aire cuando los estomas de las hojas están abiertos. En las plantas C4, el CO<sub>2</sub> se capta en células del mesófilo especializadas que lo incorporan al oxalacetato. La carboxilasa de fosfoenol-pirovato cataliza esta reacción, que es una manera indirecta de fijar carbono porque el CO<sub>2</sub> debe convertirse primero en bicarbonato. Dado que la carboxilasa del PEP tiene más baja para el CO<sub>2</sub> (esto es, mayor afinidad) que la rubisco, y a que el oxígeno es un sustrato deficiente, las plantas C4 son más eficaces en capturar CO<sub>2</sub> que las C3. Las plantas C4 también uso más eficiente del agua que las C3, porque pueden cerrar sus estomas cuando la temperatura ambiente es elevada, con lo cual reducen la evapotranspiración (McKee and McKee, 2009; p. 491; Rein, 2012).

Las plantas C3 son muy competitivas en climas templados y húmedos mientras que las plantas C4 son más competitivas en climas secos con largos periodos de aridez y con baja humedad relativa. Tienen condicionada su existencia a lugares con alta intensidad lumínica y temperatura, es el precio a pagar para ser más competitivas.

### **3.3. Poder de calentamiento global de los gases de efecto invernadero**

El potencial de calentamiento global es una medida relativa de la cantidad de calor que atrapa un gas de efecto invernadero en la atmósfera. Compara la cantidad de calor atrapado por una cierta masa del gas en cuestión con la cantidad de calor atrapado por una masa similar de dióxido de carbono. El poder de calentamiento global se calcula en un intervalo de tiempo específico, comúnmente de 20, 100 o 500 años. El poder de calentamiento global se expresa como un factor de dióxido de carbono, cuyo poder de calentamiento está estandarizado a la unidad (EPA, 2018).

Los gases de efecto invernadero calientan la tierra al absorber energía y ralentizar la velocidad a la que la energía escapa al espacio; actúan como una manta aislante de la tierra. Los diferentes gases pueden tener distintos efectos sobre el calentamiento del globo terráqueo. Dos formas clave en que estos gases difieren entre sí son su capacidad para absorber energía (su "eficiencia radiactiva") y cuánto tiempo permanecen en la atmósfera, también conocida como "vida útil" (Nordhaus y Boyer, 2000).

El concepto de potencial o poder de calentamiento global se desarrolló para permitir comparaciones de los impactos del calentamiento global de diferentes gases. Específicamente, es una medida de la cantidad de energía que absorberán las emisiones de una tonelada de gas durante un período de tiempo determinado, en relación con las emisiones de una tonelada de dióxido de carbono. Mientras más grande sea el poder de calentamiento global de determinado gas, más calentará la tierra en comparación con el dióxido de carbono durante ese período de tiempo. El período de tiempo generalmente utilizado para el poder de calentamiento es de 100 años. Los distintos potenciales de calentamiento global proporcionan una unidad de medida común, que permite a los analistas sumar estimaciones de emisiones de diferentes gases (por ejemplo, compilar un inventario nacional de gases de efecto invernadero) y permite a los responsables

de formular políticas comparar las oportunidades de reducción de emisiones entre sectores y gases (Nordhaus y Boyer, 2000; Cline, 2007).

Por definición el dióxido de carbono tiene un poder de calentamiento global de la unidad, independientemente del período de tiempo utilizado, porque es el gas que se utiliza como referencia. El dióxido de carbono permanece en el sistema climático durante mucho tiempo: las emisiones de este gas provocan un aumento de las concentraciones atmosféricas de que puede durar miles de años; aunque en general se suele considerarse en un horizonte temporal de 500 años.

Por otro lado, se estima que el metano tiene un poder de calentamiento de 28 a 36 veces mayor que el dióxido de carbono en 100 años. El metano emitido hoy dura aproximadamente una década en promedio, que es mucho menos tiempo que el dióxido de carbono. Pero el metano absorbe mucha más energía que el dióxido de carbono. El efecto neto de la menor duración y la mayor absorción de energía se refleja en el poder de calentamiento global mayor y en hecho de que tiene efectos indirectos, como el de que es un precursor del ozono. El ozono en sí mismo es un gas de efecto invernadero.

El óxido nitroso tiene un poder de calentamiento global de 265 a 298 veces el del dióxido de carbono para una escala de tiempo de 100 años. El óxido nitroso emitido hoy permanece en la atmósfera durante más de 100 años, en promedio.

#### **3.4. Huella de carbono de la caña de azúcar**

La huella de carbono se conoce como la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de emisiones de gases de efecto invernadero o un análisis de ciclo de vida según la tipología de huella, siguiendo normativas internacionales reconocidas. La huella de carbono se mide en masa de dióxido de carbono equivalente. Una vez conocido el



tamaño y la huella, es posible implementar una estrategia de reducción y/o compensación de emisiones, a través de diferentes programas, públicos o privados (GHP, 2018).

Existen dos estándares comúnmente utilizados en la medición de huella de carbono dependiendo si la certificación corresponde a una organización o a un producto. En la huella de carbono de una organización se analizan las emisiones de gases de efecto invernadero de una organización a lo largo de un año o periodo determinado, generando un inventario de estas. Los estándares más utilizados para la cuantificación de la huella de carbono en este caso son los GHG-Protocol y el ISO-14064-1. El segundo estándar es la huella de carbono de productos o servicios y en este caso se analizan todas las emisiones de gases de efecto invernadero realizadas durante el ciclo de vida del producto o servicio analizado y los protocolos utilizados son varios.

En el caso de la caña de azúcar en México no existen estudios a profundidad que muestren cual es la teoría subyacente en el cálculo de conceptos como la huella de carbono, por ejemplo. A raíz de la desaparición del Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA) en 1991 la investigación sobre la producción primaria de caña y azúcar solo se reduce a algunos e ingenios que establecen parcelas experimentales, viveros, etc. A nivel de agroindustria no existe investigación debido a la escasez de recursos financieros y a la burocratización de los escasos recursos fiscales disponibles.

### **3.5. Análisis del ciclo de vida del producto**

El análisis de ciclo de vida es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener

unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de estos.

Los elementos que se tienen en cuenta dentro del análisis del ciclo de vida comúnmente se conocen como insumos y productos. En esta metodología los insumos se representan por el uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, electricidad, energía, etc., que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema. Los productos se conceptualizan como las emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema (Inobe, 2009).

El análisis del ciclo de vida de un producto debería incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente. A este tipo de ciclo de vida se le denomina comúnmente “*de la cuna a la tumba*”.

### **3.6. Teorías y métricas alternativas**

Los Estados Unidos utilizan principalmente el poder de calentamiento global de 100 años como una medida del impacto relativo de diferentes gases de efecto invernadero. Sin embargo, la comunidad científica ha desarrollado varias otras medidas que podrían usarse para comparar uno de estos gases con otro. Estas métricas pueden diferir según el cronograma, el punto final del clima medido o el método de cálculo.

Existen métricas distintas a la anterior. Por métrica se ha de entender la medición coherente de una característica de un objeto o actividad difícilmente cuantificable

por otros medios. Dentro del contexto de evaluación de modelos climáticos, es una medida cuantitativa de conformidad entre una cantidad simulada y la observada que puede utilizarse para evaluar el desempeño de los distintos modelos. Por ejemplo en la métrica más comúnmente utilizada, el poder de calentamiento global a 20 años a veces se usa como una alternativa al poder de calentamiento global a 100 años. La métrica del poder de calentamiento global a 100 años se basa en la energía absorbida por un gas durante 100 años, la del poder de calentamiento global a 20 años se basa en la energía absorbida en 20 años. Esta métrica prioriza los gases con tiempos de vida más cortos, porque no considera los impactos que ocurren más de 20 años después de que se producen las emisiones. Debido a que todas las métricas del poder del calentamiento global calculan en relación con el dióxido de carbono, el respectivo poder de calentamiento global basados en un marco de tiempo más corto serán más grandes para los gases con tiempos de vida más cortos que los del dióxido de carbono y menores para los gases con tiempos de vida más largos. Por ejemplo, el metano, que tiene una corta vida, para 100 años tiene un poder de calentamiento global de 20-36 lo cual es menor cuando se toma un horizonte de 20 años, en cuyo caso su poder de calentamiento global es de 84-87.

Otra teoría alternativa a la métrica del poder de calentamiento global de 100 años para comparar los gases de efecto invernadero, es el llamado potencial de temperatura global. Mientras que el poder de calentamiento global es una medida del calor absorbido durante un período de tiempo dado debido a las emisiones de un gas, el potencial de temperatura global es una medida del cambio de temperatura al final de ese período de tiempo (nuevamente, en relación con el dióxido de carbono). El cálculo del potencial de temperatura global es más complicado que los realizados para el poder de calentamiento global, ya que requiere modelar cuánto responde el sistema climático a mayores concentraciones de gases de efecto invernadero (la sensibilidad climática) y qué tan rápido responde el sistema (basado en parte en cómo el océano absorbe calor).

### 3.7. Factores de emisión de los gases de efecto invernadero

El factor de emisión se define como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante. Estos factores son usualmente expresados como la masa del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración.

En general los factores de emisión utilizados para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero a carbono equivalente son los del Panel Internacional de Expertos en Cambio Climático en sus Guías Metodológicas (INECC, 2104) y en menor medida los de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos. (EPA, 2018). No obstante, cada país ha venido desarrollando sus factores de emisión propios pues si bien los del Panel Internacional son una valiosa herramienta, son valores promedio y pueden no ser los indicados para las condiciones locales del país o región de interés. El procedimiento para generar los factores de emisión de la agricultura requiere la realización de experimentos por especialistas.

### 3.8. Fórmula para el cálculo de las emisiones en la quema de caña

De acuerdo con el IPCC (2006), la expresión general modificada para calcular las emisiones por cada gas de efecto invernadero es:

$$L_{fire} = A * MB * C_f * G_{ef} * \frac{1}{1000}$$

donde:

$L_{fire}$  = Cantidad de gas de efecto invernadero por quema de caña, *ton*

$A$	=	Superficie quemada de caña, <i>ha</i>
$MB$	=	Masa de materia seca precosecha más postcosecha a ser quemada, <i>t/ha</i>
$C_f$	=	Factor de combustión. Para quemas agrícolas equivale a 0.8
$G_{ef}$		Factor de emisión de materia seca, <i>g/kg</i>

### 3.9. Fijación de dióxido de carbono por la caña de azúcar

Para la estimación de la cantidad de dióxido de carbono capturada por el cultivo de la caña de azúcar por unidad de superficie se siguió a Beeharry (2001). La información que este investigador utiliza corresponde a la Isla Mauricio, país localizado en el océano indico, de clima intertropical, seco de mayo a noviembre y con rendimiento de caña por hectárea que varía entre 65 a 75 t/ha por año. Esta fuente estima el dióxido de carbono equivalente a el carbón contenido (en porcentaje) en las principales estructuras morfológicas de la planta de caña de azúcar al final de su crecimiento durante un año. De esta manera si es conocido el rendimiento por hectárea de caña de azúcar es posible cuantificar el volumen de dióxido de carbono equivalente, que es secuestrado en una plantación de una hectárea.

En el caso de la estimación del carbono capturado por la caña de azúcar la teoría implica conocer los porcentajes de carbono capturado en las partes de la caña de azúcar como son hojas, tallos, inflorescencias y raíces, principalmente. Sin embargo, metodológicamente esta es la parte más compleja de la investigación pues no existe en México un estudio ni de las instituciones oficiales de investigación como tampoco de las instituciones de educación superior respecto a cuál es el contenido de carbono en las principales partes que componen la caña de azúcar. No obstante, la estimación de la cantidad de carbono capturada por hectárea se basará en las siguientes constantes de carbono que componen las partes de la caña de azúcar.

Componentes	Contenido de carbón (base seca) (%)
Azúcar	0.420
Melazas	0.357
Torta	0.400
Bagazo	0.499
Puntas y hojas	0.493
Rastrojo	0.490
Sistema radicular	0.490

Teóricamente, conociendo los porcentajes de carbono contenido en las ocho partes principales de la caña de azúcar (molida) es posible estimar la cantidad de carbono capturada por hectárea.

### **3.10. Cambio climático**

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 (Centro de Información de las Naciones Unidas [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 ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ )) 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, 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 (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2017).

De acuerdo con el 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 (Instituto Nacional de Ecología [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, sí 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-emitada 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.

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.

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, p.4).

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).

### **3.11. 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 qué 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; algunos 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 CO<sub>2</sub> son los dos principales gases de efecto invernadero, pero el CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>.

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<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>), 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<sub>2</sub>O) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los demás se llaman gases traza por su presencia ínfima en la atmósfera como el metano

(CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) (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.

### **3.12. 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<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbono (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

En la naturaleza, billones de toneladas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 las 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 CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero dominante, con un forzamiento radiativo de 1.66W/m<sup>2</sup> (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).

El metano ( $\text{CH}_4$ ), 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 1,833ppmm, mostrando un incremento de 162% en relación con la concentración existente en el periodo preindustrial (ver Cuadro 2.2). El  $\text{CH}_4$  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  $0.48 \text{ W/m}^2$  (IPCC, 2014) y representa el 20% del total de los GEI.

Las fuentes antropogénicas emisoras de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) son: los suelos agrícolas que utilizan fertilizantes nitrogenados 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  $\text{N}_2\text{O}$  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  $\text{N}_2\text{O}$  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  $0.16 \text{ W/m}^2$  equivalente a 6% del total de todos los gases de efecto invernadero.

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 (*Tabla 2*). Debido a que las concentraciones actuales son relativamente bajas, la contribución de los HFCs al forzamiento radiativo es modesta.

Los perfluorocarbonos (PFC) como el perfluorometano ( $\text{CF}_4$ ) y el perfluoroetileno ( $\text{C}_2\text{F}_6$ ), 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  $\text{CF}_4$  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).

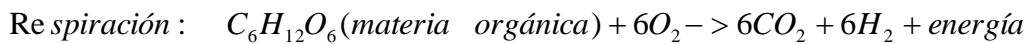
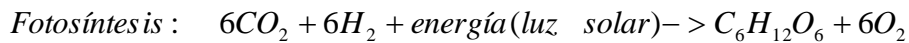
El hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) es un gas de efecto invernadero que se utiliza como aislante en interruptores y equipos eléctricos, es generado por fugas en procesos de fabricación de algunos semiconductores y manufacturación de magnesio. Las concentraciones actuales en la atmósfera son muy 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).

### **3.13. 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 ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) 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  $\text{CO}_2$  atmosférico hace cientos de millones de años (Michalaket *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 4 depósitos ocurren gracias a una serie de procesos químicos, biológicos, físicos y geológicos. 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<sub>2</sub> 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, derritiéndose y reaccionando con otros minerales, liberando



CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> presente en la atmósfera a lo largo de millones de años

### **3.14. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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).

### **3.15. El mercado de bonos de carbono**

La Ley General de Cambio Climático de México (LGCC), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012, contempla que el mercado de bonos de carbono, o algún instrumento similar ya debió haber entrado en vigor, no obstante, diversos retrasos han pospuesto su entrada en operación. El 15 de agosto de 2016 se presentó un programa piloto para comenzar con un mercado de carbono en México, con el fin de que las empresas del sector privado reduzcan sus emisiones de efecto invernadero. Dicho programa piloto se inició en la Bolsa Mexicana de Valores y se pretendió que iniciara en 2018 (LGCC, 2012; LCC, 2015).

El mercado de carbono es un esquema que funciona por un sistema de compras de permisos de emisión, cada uno de ellos corresponde a una tonelada de dióxido de carbono que no es emitido a la atmósfera. Es un mecanismo de financiamiento adicional para apoyar a las empresas que pueden reducir sus emisiones. De esta forma las empresas reciben cierta cantidad de permisos que equivalen a emitir un número determinado de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Si una empresa necesita más permisos, tiene que comprárselos a una empresa que le sobran porque, probablemente, haya presentado proyectos de eficiencia energética o energía renovable.

México tiene que adoptar un mercado de carbono porque es uno de los acuerdos que México suscribió en la COP21, celebrada en París en noviembre/diciembre de 2015, y en la Ley de Transición Energética (LTE, 2015), aprobada y publicada en diciembre de 2015. Esta legislación pretende que la industria reduzca las emisiones de carbono mediante el uso de energías renovables, de lo contrario, las empresas tendrán que pagar para emitir certificados de emisión o hacerse acreedores a multas (Orozco, 2016)

# CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

## 4.1. Metodología de estimación de emisiones en la agroindustria cañera

La metodología que se utilizó en esta investigación es la descrita por Morillón y Hernández (2011) en su escrito **“Metodología para evaluar la sustentabilidad de los materiales de construcción”**, también se complementó con el trabajo de los hermanos Hernández (2013) titulado “Evaluación del nivel de sustentabilidad del azúcar de caña en México”. 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 CO<sub>2</sub> 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:

1. 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.
2. 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.
3. Consumo de petróleo total (l).
4. Consumo de energía eléctrica (Kw/h).
5. Emisiones totales de CO<sub>2</sub>.
6. 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 zafas comprendidas entre 2007 y 2016.

## **4.2. 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 y Kw/h) a megajoules (MJ). Para la obtención de la cantidad total de emisiones de CO<sub>2</sub>, se utilizaron los siguientes factores de emisión: 0.1000 kg de CO<sub>2</sub>/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a IPCC, 2006) para el bagazo; 0.0741 kg de CO<sub>2</sub>/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a SENER, 2008) para el petróleo (diésel y combustóleo) y 0.0523 kg de CO<sub>2</sub>/MJ (Hernández y Hernández, 2013 citando a Morillón y Hernández, 2011) para la electricidad de CFE.

### **4.2.1. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> 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 con 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 CO<sub>2</sub> del bagazo (0.1000 kg de CO<sub>2</sub>/MJ), para así obtener la emisión total de CO<sub>2</sub> resultante de la quema de bagazo para generar energía en la molienda de la caña.

### **4.2.2. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> 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

158.9872litros (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 CO<sub>2</sub>/MJ) para así obtener la emisión total de CO<sub>2</sub> a partir de este tipo de energía.

#### **4.2.3. Cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el consumo de energía eléctrica**

Para esta conversión, de acuerdo con la SENER (2017) un Watt-hora (Wh) de electricidad producido por la CFE equivale a 3,600Joules (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 CO<sub>2</sub>0.0523de CO<sub>2</sub>/MJ, por lo que al multiplicar el total de megajoulespor el factor de emisión se obtuvo la emisión total de CO<sub>2</sub> por el uso de energía eléctrica de CFE.

#### **4.2.4. Emisiones totales de CO<sub>2</sub> en la agroindustria de la caña de azúcar**

Las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en el proceso agroindustrial de la caña de azúcar (molienda de la caña de azúcar) se obtienen al sumar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por las tres fuentes de energía utilizadas en los ingenios. Los resultados arrojan luz sobre cuanto CO<sub>2</sub> 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.

#### **4.2.5. 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).

#### **4.3. Evaluación del nivel de sustentabilidad**

Con la información obtenida anteriormente y aplicando la metodología propuesta por Morillón y Hernández (2011), retomada por Hernández (2013) y por Aquino *et al* (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 CO<sub>2</sub> por megajoule (kgCO<sub>2</sub>/MJ) de energía utilizada, por lo que, la actividad que genera emisiones de CO<sub>2</sub> superiores a este valor se consideran no sustentables o amigables con el ambiente, ya que contribuyen a la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Hernández y Hernández, 2013). Sin embargo, si el valor de las emisiones es menor a 0.02918 kgCO<sub>2</sub>/MJ la actividad que las emite se considera sustentable.

#### **4.4. Metodología de cálculo de la captura de CO<sub>2</sub> atmosférico**

En el caso de la estimación del carbono capturado por la caña de azúcar la teoría implica conocer los porcentajes de carbono capturado en las partes de la caña de azúcar como son hojas, tallos, inflorescencias y raíces, principalmente. Sin embargo, metodológicamente esta es la parte más compleja de la investigación pues no existe en México un estudio ni de las instituciones oficiales de investigación como tampoco de las instituciones de educación superior respecto a cuál es el contenido de carbono en las principales partes que componen la caña de azúcar. No obstante, la estimación de la cantidad de carbono capturada por hectárea se basará en las siguientes constantes de carbono que componen las partes de la caña de azúcar.

Componentes	Contenido de carbón (base seca) %
Azúcar	0.420
Melazas	0.357
Torta	0.400
Bagazo	0.499
Puntas y hojas	0.493
Rastrojo	0.490
Sistema radicular	0.490

Teóricamente, conociendo los porcentajes de carbono contenido en las ocho partes principales de la caña de azúcar (molido) es posible estimar la cantidad de carbono capturada por hectárea y de ahí obtener el CO<sub>2</sub>e total capturado pues la superficie de caña cosechada es conocida.



# CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1 Emisiones de la agroindustria de la caña

Arellano (2017) en su investigación calculó las emisiones de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_{2e}$ ) emitido por entidad federativa en las que se produce caña de azúcar en el periodo de zafas 2006/07- 2015/16. La estimación de las emisiones fue realizada siguiendo los pasos esbozados por Aquino *et al* (2016).

Si bien las emisiones calculadas por Arellano (2017) son útiles para conocer, por entidad federativa las emisiones de gases de efecto invernadero, en términos de  $\text{CO}_{2e}$ , provenientes de la quema de combustible fósil (petróleo y diésel), quema de bagazo y utilización de energía eléctrica para generar energía calorífica para la molienda de la caña de azúcar en los ingenios, en la presente investigación el objetivo principal es realizar un balance de emisiones de gases de efecto invernadero como un todo para México. Las cifras de Arellano (2017) se presentan en el Cuadro 4.1.

En el Cuadro 4.1 se presentan las emisiones de GEI en términos de dióxido de carbono equivalente proveniente del eslabón de en fábrica de la molienda de caña para el periodo que comprende las zafas 2006/07 - 2015/16 (Arellano, 2017). Un punto importante a notar es que las emisiones totales es la suma de las 15 entidades productoras en las que ubican los 51 ingenios cañeros considerados en los cálculos de las emisiones. Obsérvese las cifras de emisiones de  $\text{CO}_{2e}$  del cuadro son cifras absolutas por lo que resulta evidente que es Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí los que aparentemente en los que la agroindustria de caña de azúcar tiene una mayor contaminación; no obstante, ello no es necesariamente así, pues para determinar en qué entidad se tiene la mayor contaminación, las emisiones deben expresarse en términos de  $\text{CO}_{2e}$  por tonelada de azúcar producida.

## 5.2. Carbono secuestrado por unidad de superficie de caña de azúcar

Para estimar la cantidad de carbono secuestrado en una hectárea de caña de azúcar producida se utiliza el procedimiento de Beeharry (2001). En la revisión bibliográfica exhaustiva no se localizó ningún estudio que muestre explícitamente una metodología detallada como se estimar la cantidad de carbono secuestrada por hectárea de caña producida excepto el de Beeharry (2001, Tabla 5).

Dicho procedimiento se ejemplifica en el Cuadro 4.2 para México utilizando el rendimiento promedio nacional de caña de azúcar, para una zafra dada, de 69,568 kilogramos de caña de azúcar por hectárea.

Cuadro 5.1. Emisiones de GEI en términos de CO<sub>2e</sub> de la molienda de caña de azúcar en México

<b>Entidad</b>	<b>2006/07</b>	<b>2007/08</b>	<b>2008/09</b>	<b>2009/10</b>	<b>2010/11</b>	<b>2011/12</b>	<b>2012/2013</b>	<b>2013/14</b>	<b>2014/15</b>	<b>2015/16</b>
Campeche	113,672	110,522	114,982	82,724	98,718	83,663	134,397	132,266	141,748	156,820
Chiapas	476,707	444,328	452,268	471,957	466,190	578,408	600,231	526,461	529,728	541,883
Colima	166,203	163,329	159,588	197,209	189,059	245,957	299,598	257,032	262,158	267,633
Jalisco	1,264,300	1,146,430	1,162,535	1,186,363	1,004,695	1,190,584	1,427,718	1,407,138	1,456,502	1,259,828
Michoacán	273,533	267,733	210,123	218,755	186,911	253,346	310,778	300,154	281,812	277,018
Morelos	381,256	384,799	327,797	360,481	380,842	395,568	360,238	364,735	344,774	311,528
Nayarit	398,589	369,909	333,467	421,899	381,487	403,327	444,405	475,158	535,034	579,884
Oaxaca	597,129	620,229	455,083	501,190	511,655	521,888	756,953	626,528	576,840	663,126
Puebla	368,808	358,028	335,581	306,184	336,858	385,974	414,360	406,393	358,224	361,549
Q. Roo	319,709	252,927	220,025	278,816	318,480	330,016	407,958	318,316	283,994	262,863
SLP	918,406	1,102,244	951,451	702,898	980,812	636,706	1,205,916	993,962	1,059,245	1,156,973
Sinaloa	557,746	483,373	378,697	199,256	241,367	325,422	345,473	146,440	58,165	50,606
Tabasco	368,515	299,877	306,227	378,215	314,682	371,693	450,497	477,771	367,647	407,884
Tamaulipas	439,408	483,041	466,712	315,696	437,461	394,489	509,466	411,296	393,994	350,483
Veracruz	4,398,939	4,154,106	3,537,794	3,770,115	3,533,686	3,634,833	4,963,014	4,186,899	4,083,833	4,215,134
<b>Total</b>	<b>11,042,920</b>	<b>10,640,874</b>	<b>9,412,330</b>	<b>9,391,758</b>	<b>9,382,903</b>	<b>9,751,875</b>	<b>12,631,002</b>	<b>11,030,548</b>	<b>10,733,698</b>	<b>10,863,212</b>

Fuente: Arellano (2017).

**Cuadro 5.2. Captación anual total de carbono por hectárea de una plantación de caña de azúcar**

Componentes	Caña molida	Cantidad <sup>a</sup>	Humedad	Biomasa seca	Contenido de carbón (base seca)	Carbon secuestrado	CO <sub>e</sub> consumido
	%	kg	%	kg	%	kg	kg
Azúcar	10	6,957	0	6,957	42.0 <sup>b</sup>	2,922	10,713
Melazas	3	2,087	20	1,670	35.7 <sup>c</sup>	596	2,185
Torta	4	2,783	80	557	4.0 <sup>d</sup>	223	816
Agua	52	36,175	100	0	0.0	0	0
Bagazo	30	20,870	50	10,435	49.9 <sup>e</sup>	5,207	19,092
Puntas y hojas	31	21,566	68	6,901	49.3 <sup>e</sup>	3,402	12,474
Rastrojo	10	6,957	19	5,635	49.0 <sup>e</sup>	2,761	10,124
Sistema radicular	15	10,435	70	3,131	49.0 <sup>f</sup>	1,534	5,624
Total						16,645	61,029

Notas:

<sup>a</sup> Ejemplo en base a un rendimiento de 69,568 kg/ha.

<sup>b</sup> Se asume que el azúcar es sacarosa pura (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>).

<sup>c</sup> Brix = 0.85 (sacarosa/sólidos secos).

<sup>d</sup> Tomado de Beeharry (2001) y Paturau (1982).

<sup>e</sup> Beeharry (1998).

<sup>f</sup> Suponiendo un contenido de carbono comparable a los otros componentes fibrosos. Se asume que el secuestro neto de carbono en el suelo es cero.

Fuente: adaptado de Beeharry (2001)

En el Cuadro 4.2 los parámetros importantes son los contenidos en las tres columnas de porcentajes. En la columna de Caña Molida los respectivos porcentajes corresponden al contenido de carbono de los conceptos referidos en la columna componentes. Por ejemplo, si en una hectárea de caña de se obtiene un rendimiento de 69,568 kilogramos de caña, el contenido de azúcar contenida en los 69,568 kilogramos de azúcar es 6,957 kilogramos. La columna humedad se refiere al porcentaje de humedad contenido en el azúcar obtenido de la caña molida es del 0.0%, por lo tanto la biomasa seca obtenida es también, en este caso particular, de 6,957 kilogramos. Lo mismo aplica para los demás componentes de la caña de azúcar.

La columna “Contenido de carbón (base seca)” contiene la proporción de carbono que tiene la materia seca de cada parte de la caña de azúcar y en las notas de pie del Cuadro 4.2 se menciona el supuesto que se hace al respecto o de la fuente bibliográfica de donde se toma la respectiva cifra.

Al multiplicar la columna de “Biomasa seca” por la columna de “Contenido de carbón” se obtiene el carbón secuestrado en cada componente de la caña de azúcar. De esta manera el carbono secuestrado en la azúcar resulta ser de 2,922 kilogramos de carbono en una hectárea con un rendimiento promedio de 69,568 kilogramos.

Ahora bien, el carbono capturado por el cultivo de la caña debe convertirse a carbono equivalente para poder ser comparable con el carbono equivalente estimado en las emisiones del proceso productivo de la caña en fábrica. Beeharry (2001) utiliza la constante (3.666505126) para convertir el carbono secuestrado por la caña a dióxido de carbono equivalente (Beeharry, 2001; Tabla 6; p. 366). No obstante, dicha constante no está documentada de cómo se obtiene; por lo tanto, se toma como dada en la presente investigación quedando como un tema abierto para futura investigación.

Así, en el ejemplo se ha calculado que en el caso del azúcar contenida en la caña cosechada neta de una hectárea de caña de azúcar en México para la zafra 2015/16 el carbono capturado obtenido es de 10,713 kilogramos de carbono equivalente  $[(3.666505126) * (2,922) = 10,713]$ .

Al seguir el mismo procedimiento, como se ha hecho para ejemplificar en el caso del azúcar, para los demás componentes de la caña de azúcar se obtiene que el dióxido de carbono equivalente “secuestrado” en una hectárea es de 61.029 toneladas.

En el Cuadro 4.3 se presentan los resultados estimados para el carbono secuestrado y su conversión a dióxido de carbono equivalente para poder hacer comparables las cifras.

Cuadro 5.3. CO<sub>2e</sub> capturado por las plantaciones de caña en México

Zafra	Carbono secuestrado (t/ha)	CO <sub>2eq</sub> capturado (t/ha)	Superficie cosechada (ha)	CO <sub>2e</sub> capturado total (ton)
2006/07	16.8	64.5	636,126	41,014,489
2007/08	16.3	62.7	639,095	40,091,214
2008/09	14.8	57.4	637,182	36,595,175
2009/10	15.5	60.2	625,250	37,642,943
2010/11	15.1	58.3	652,397	38,007,870
2011/12	15.1	59.1	683,183	40,359,062
2012/13	18.1	69.4	757,432	52,583,972
2013/14	15.8	62.4	781,076	48,778,187
2014/15	15.7	61.8	782,796	48,353,369
2015/16	16.0	62.7	778,929	48,818,221

Fuente: estimación propia.

### 5.3. Balance de emisiones de dióxido de carbono

El balance de emisiones netas de CO<sub>2e</sub> se define como la diferencia entre las emisiones de GEI, en términos de CO<sub>2e</sub>, en la molienda de la caña de azúcar en ingenio y el CO<sub>2e</sub> secuestrado en un año por las plantaciones de caña de azúcar. En el Cuadro 4.4 se realiza este balance.

Cuadro 5.4. Balance de emisiones netas de CO<sub>2</sub> de la agroindustria de la caña de azúcar en México

Zafra	Emisiones de CO <sub>2e</sub> en molienda (ton)	CO <sub>2e</sub> secuestrado (ton)	Balance neto (ton)
2006/07	11,042,920	41,014,489	(29,971,569)
2007/08	10,640,874	40,091,214	(29,450,340)
2008/09	9,412,330	36,595,175	(27,182,845)
2009/10	9,391,758	37,642,943	(28,251,185)
2010/11	9,382,903	38,007,870	(28,624,967)
2011/12	9,751,875	40,359,062	(30,607,188)
2012/13	12,631,002	52,583,972	(39,952,970)
2013/14	11,030,548	48,778,187	(37,747,639)
2014/15	10,733,698	48,353,369	(37,619,671)
2015/16	10,863,212	48,818,221	(37,955,009)
Promedio	10,488,112	43,224,450	(32,736,338)

Fuente: elaboración propia.

El valor “negativo” del balance neto indica que el carbono secuestrado, expresado en términos de dióxido de carbono equivalente, por en toda la superficie de

plantaciones de caña de azúcar durante cada zafra fue mayor que los GEI, en términos de dióxido de carbono, de las emisiones provenientes de la quema de combustible fósil (petróleo o diesel), quema de biomasa de bagazo utilizado para generar energía en la molienda de caña de azúcar para obtener el azúcar como tal

De esta manera, en promedio, en el periodo de estudio, por cada kilogramo de dióxido de carbono equivalente emitida a la atmósfera en la agroindustria de la caña de azúcar, una plantación de caña de azúcar se secuestró 4.1 kilogramos de dióxido de carbono equivalente.

Respecto a los resultados del balance neto de emisiones de gases de efecto invernadero en la agroindustria de la caña de azúcar es necesario mencionar que el cálculo realizado por Arellano (2017) considera sólo las emisiones provenientes de la quema de combustible fósil, consumo de electricidad proveniente de la CFE y de la quema de bagazo en las calderas de los ingenios, por lo que es probable que las emisiones utilizadas estén subestimadas, pues no todos los procesos que generan emisiones en los eslabones de la cadena son contabilizados. A nivel de campo, para la preparación del terreno, la siembra, fertilizantes, las labores culturales, el riego de la superficie bajo este régimen, la quema precosecha y postcosecha de residuos, el corte con máquina, aladoras, vehículos de transporte a patio del ingenio, y varios procesos para obtener el producto final, que es el azúcar estándar, no son contabilizados, no obstante, también dichos procesos generan emisiones de GEI.

Una alternativa metodológica para poder hacer más realistas las estimaciones de las emisiones de GEI a lo largo de la cadena es la metodología del ciclo de vida que contabiliza exhaustivamente las emisiones “desde la cuna hasta la tumba”, por lo que el estimado sería más realista.

Otra forma de mostrar los resultados es comparar el CO<sub>2</sub> fijado por tonelada de caña de azúcar molida neta contra las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de caña molida neta. Estos resultados se muestran en el Cuadro 4.4.

Cuadro 5.5. CO<sub>2e</sub> emitido y secuestrado por la caña de azúcar

Zafra	Emisiones de CO <sub>2e</sub> por tonelada de caña molida neta (ton)	CO <sub>2e</sub> secuestrado por tonelada de caña molida neta (ton)
2006/07	0.234	0.868
2007/08	0.229	0.862
2008/09	0.230	0.894
2009/10	0.225	0.900
2010/11	0.221	0.894
2011/12	0.219	0.907
2012/13	0.214	0.891
2013/14	0.211	0.934
2014/15	0.208	0.939
2015/16	0.209	0.937
Promedio	0.219	0.904

Fuente: elaboración propia.

La interpretación es muy similar a como se hizo anteriormente, pues por cada tonelada de caña molida neta en el ingenio se emiten 0.219 toneladas de CO<sub>2e</sub> mientras que por cada tonelada de caña neta molida se secuestraron (0.904) toneladas de CO<sub>2e</sub>.

Al discutir los resultados obtenidos respecto de las emisiones de dióxido de carbono y otros GEI se observa que las cantidades varían considerablemente. El trabajo de Riegelhaupt (2012) estimó que para toda la agroindustria de caña de azúcar en México las emisiones fueron de 3.1 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> para 2010, mientras que en la presente investigación fue de 9.4 millones de toneladas para el mismo año (retomado de Arellano (2017)). Esta diferencia se debe fundamentalmente a los pasos metodológicos seguidos para el cálculo de tal concepto. Riegelhaupt (2012) retoma los factores de emisión de varias fuentes y del IPCC (2006). No se encontró ningún otro trabajo, que metodología análoga, contra el cual comparar los resultados de esta investigación.

Respecto al carbono secuestrado por la caña de azúcar por hectárea de plantación de caña excepto el trabajo de Beeharry tampoco se encontró ningún otro trabajo que lo hiciera de forma explícita y transparente como lo hace este autor.



#### **5.4. Limitaciones del estudio**

En la presente investigación la realización del balance neto de dióxido de carbono se ha calculado a partir de datos de información secundaria de fuentes oficiales. Las emisiones de dióxido de carbono provenientes de la quema de combustibles fósiles y consumo de electricidad de la CFE de caña de azúcar fueron tomados de Arellano (2017). Las emisiones fueron calculadas también a través de factores de emisión y factores de conversión de energía de fuentes bibliográficas.

En el caso de la captura de carbono por el cultivo de la caña de azúcar se utilizó como referencia a Beeharry (2001) que utiliza datos para la Isla Mauricio, país ubicado en el océano Índico, que si bien comparte la característica de ubicarse en la zona subtropical del Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio, como es el caso de México, y por lo tanto compartir características geográficas propias para el cultivo de la caña de azúcar, son a fin de cuenta factores de conversión, de contenido de carbono en las partes principales de la caña de azúcar, de fuentes secundarias que pueden ser dar resultados sesgados para México.

De esta manera, es una limitación importante el hecho de carecer de información propia de México para la caña de azúcar en relación a estudios del contenido de carbono en las partes relevantes de la caña de azúcar. Esta información se genera en laboratorios equipados para dicho propósito y con recursos humanos especialistas que tiene la característica de formarse en el extranjero durante varios años.

En la revisión de referencias se encontró una situación similar. Es decir, son pocos los estudios realizan trabajo de investigación básica y aplicada sobre caña de azúcar en México, por lo que los análisis se refieren a cuestiones económicas con información secundaria y no hay estudios técnicos especializados como el que se requiere para conocer los contenidos de carbono en la caña de azúcar en México. No se localizo ningún trabajo que estudiara por ejemplo, el efecto del incremento

del dióxido de carbono en campo utilizando cámaras en parcela demostrativa o de genética y biotecnología.

Es necesario señalar, no obstante, que las limitaciones en disponibilidad de investigación no se debe a la pasividad de las instituciones de educación superior o de investigación como INIFAP pues la investigación básica y aplicada requiere sumas de inversión importantes, situación que en México no ocurre desde la desaparición del Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar (IMPA) en 1990/1991.

No obstante las limitaciones referidas anteriormente, hay esfuerzos por parte de la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (CNIAA) de realizar investigación muy elemental sobre cuestiones de variedades de caña de azúcar que reemplacen a las que vienen desde la época del IMPA, mejoramiento genético para que las nuevas variedades se adapten a las condiciones del cambio climático (resistencia a sequia), resistentes a plagas y enfermedades, etc., y algunas otras líneas de investigación que el llamado Centro de Investigación y Desarrollo de la Caña de Azúcar (CIDCA) de la CNIAA realiza en algunos sitios donde tuvo presencia el IMPA.

Es también necesario destacar que la investigación y tecnología que se genera en el CIDCA es de carácter privado, por lo que esto se convierte en otra limitante para los estudios académicos sobre la caña de azúcar. Es decir, el Estado mexicano ha dejado en manos privadas lo que por lo general se acepta que es un bien público como lo es la investigación en ciencia y tecnología, sobre todo de un cultivo de importancia económica como lo es la caña de azúcar.

De esta manera, el contar con información generada a partir de la investigación básica y aplicada para las condiciones de México en el cultivo de la caña de azúcar contribuiría a mejorar no solo las estimaciones de indicadores como son las estimaciones de las emisiones de dióxido de carbono por la quema y molienda de la caña, sino también de la captura de carbono por la caña de azúcar.

## **CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones**

Del análisis de las emisiones de GEI en el eslabón de fábrica de la caña de azúcar y del carbono secuestrado por una plantación de caña de azúcar, ambos expresados en términos de dióxido de carbono equivalente es posible concluir que

- La cantidad secuestrada de dióxido de carbono equivalente en el periodo de estudio fue de 43'224,450 toneladas en promedio.
- Las emisiones promedio en el mismo periodo fueron de 10'488,112.
- El balance muestra que por cada tonelada de caña molida neta en el ingenio se emiten 0.219 ton de CO<sub>2e</sub> mientras que por cada tonelada de caña neta molida se secuestraron 0.219 ton de CO<sub>2e</sub>.
- El balance neto de emisiones de GEI en la agroindustria de caña de azúcar en México es favorable pues la caña de azúcar es un secuestrador neto de GEI.
- La agroindustria de la caña de azúcar no solo puede ser calificada como neutral en carbono, sino que es un sumidero neto de carbono.
- El hecho de que la caña de azúcar sea un secuestrador neto de GEI abre la posibilidad de que la referida agroindustria incursiones en el mercado de bonos de carbono que de acuerdo a lo previsto en la Ley General de Cambio climático de México está previsto que dicho mercado entre en operación en 2022 aunque iniciara pruebas piloto en 2019.
- Si la agroindustria de caña de azúcar incursionara positivamente en el mercado de bonos de carbono se vería beneficiada y contribuiría a mitigar efectivamente el problema de calentamiento global con acciones locales.

### **6.2. Recomendaciones**

De la presente investigación es posible derivar algunas recomendaciones como las que se enuncia a continuación:

Determinar para las variedades de caña en México las proporciones de carbono contenidas en los componentes como son hojas, tallos, puntas, raíces, azúcar, melaza, bagazo, torta, etc., para estimar con mayor precisión las cantidades secuestradas de carbono por hectárea de plantación de caña de azúcar.

Determinar todas las operaciones unitarias que, a lo largo de la cadena y eslabones de la agroindustria de la caña de azúcar, incluyendo hasta la puesta del azúcar a granel en las centrales de abasto, tienen emisiones de GEI para poder cuantificar “objetivamente” las emisiones de GEI.

Desarrollar la metodología del ciclo de vida para cuantificar las emisiones del azúcar como producto final “desde la cuna hasta la tumba” para determinar los verdaderos niveles de emisiones de GEI de la agroindustria.

---

## BIBLIOGRAFÍA

Arellano, López, A. (2017). *Emisiones de CO2 y sustentabilidad en la agroindustria de la caña de azúcar e México*. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo.

IPCC (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories. Methodologies applicable to multiple land use categories*. Chapter 2 in Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use.

Aquino, M., P. R., Cuevas, A., C. M. y Carrillo, A., K. (2016). *Emisión de gases de efecto invernadero en la agroindustria de la caña de azúcar en México*. Ponencia en el XVIII Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM), Boca del Río, Veracruz.

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*.

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. *Introducción a la economía ambiental*. 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](http://www.uach.cl/procarbono/huella_de_carbono.html)

Centro de Información de las Naciones Unidas, *Panel Intergubernamental del cambio climático*. Disponible en [http://www.cinu.mx/minisitio/Panel\\_IPCC/](http://www.cinu.mx/minisitio/Panel_IPCC/) consultado el día 01 de agosto de 2017

Cline, William, R. (2007). *Global warming and agriculture. Impact estimates by country*. Center for Global Development, Peterson Institute for International Economics, Washington , DC, USA.

CONADESUCA - SAGARPA (2016). *Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar. Zafra 2006-2007 / 2015-2016*. Informe Completo, México, D.F.

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. (1985). *Identificación de proyectos agroindustriales en la región Este de Tierra Caliente, Michoacán*. Departamento de Industrias Agrícolas. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.

EPA (Environmental Protection Agency) (2018). *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks 1990-2016*. Disponible en <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>. Consultado el 20 de abril de 2018.

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 (2015). *Panorama Agroalimentario: Azúcar 2015*.

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.*

Greenhouse Protocol-GHP (2018). *Protocol agricultural guidance*. Interpreting the corporate accounting and reporting standard for the agricultural sector. Disponible: [http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHG%20Protocol%20Agricultural%20Guidance%20%28April%2026%29\\_0.pdf](http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHG%20Protocol%20Agricultural%20Guidance%20%28April%2026%29_0.pdf). Consultado el 15 abril de 2018.

Hernández, F. J., Valencia, A.C., Toledo, J.A. y Hernández, H. (2013). *El sector cañero en Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental.*

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.*

Houghton, John (2004). *Global warming. The complete briefing*. Third edition, Cambridge University Press, New York, USA.

Ihobe-Sociedad Pública de Gestión Ambiental (2009). *Análisis del ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto, Bilbao, España.* Disponible en: [http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001\\_analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf](http://www.comunidadism.es/wp-content/uploads/downloads/2012/10/PUB-2009-033-f-C-001_analisis-ACV-y-huella-de-carbonoV2CAST.pdf). Consultado el 19 de abril de 2018.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático – INECC (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México.* Coordinación General de Cambio Climático y Desarrollo Bajo en Carbono. México, D.F.

IPCC (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories. Methodologies applicable to multiple land use categories.* Chapter 2 in Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use.

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 (2007). *Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

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 (nwspain)*.

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.

Ley de Transición Energética. *Diario Oficial de la Federación* (2015, 24 de diciembre). Recuperado 24 de enero de 2019 de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>

Ley General de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación* (2012, 6 de junio). Recuperado 24 de enero de 2019 de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC\\_130718.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf)

McKee, Trudy and McKee James (2009). *Bioquímica. Las bases moleculares de la vida*. McGraw Hill, 4ª edición, México, D.F.



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.

Música Álvarez, Violeta (2016). *Determinación de los factores de emisión de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y contaminantes de vida corta, metano (CH<sub>4</sub>) y carbono negro por prácticas de quema de agrícola*. Informe final. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F.

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

Nordhaus, William, D. and Boyer, Joseph (2000). *Warming the world. Economic models of global warming*. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England.

Organización meteorológica mundial <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

Orozco, H. F. (2016, 17 de agosto). El mercado de carbono en México explicado en seis puntos. *Expansión*. Recuperado de <https://expansion.mx/empresas/2016/08/17/el-mercado-de-carbono-en-mexico-explicado-en-seis-puntos>

Rein, Peter (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Editado por Verlag Dr. Albert Bartens KG – Berlin.

Rincón, J. (2014), *Cálculo de la huella de carbono del proceso de cosecha de caña de azúcar*, Colombia

SAGARPA-CONADESUCA-UACH, 2016. *Reducción del consumo de petróleo y generación de energía eléctrica de los ingenios*. Boletín técnico informativo. Enero 2016.

SCIAN 2013, INEGI. Documentos descargados

Secretaria 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](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343244&fecha=02/05/2014) Consultado el día 03 de agosto de 2017

SENER (2015). *Balance Nacional de Energía*. México, D.F.

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](http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/acuerdo_de_paris/items/10085.php) Consultado el día 01 de agosto de 2017

### **Sitios web consultados**

[1] AISO-Academia de la Innovación para la sostenibilidad: Consultado el 19 de enero de 2019: <https://www.aiso.la/blog/2016/04/11/dioxido-de-carbono-equivalente/>

## Anexos

### Equivalencia de los gases de efecto invernadero a carbono equivalente

De acuerdo con AISO [1] el dióxido de carbono equivalente ayuda a calcular los impactos de una actividad en términos de los gases de efecto invernadero (GEI) asociados: “La concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que provocaría el mismo efecto radiativo que una combinación dada de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero. Los equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2e</sub>) proporcionan un parámetro de medición universal que permite medir, tomando como referencia dicha norma, los efectos de las emisiones (o de las medidas encaminadas a evitar dichas emisiones) de diferentes gases de efecto invernadero”.

En el caso de la preparación del terreno para la siembra de la caña de azúcar, su siembra, las labores culturales en plantilla, soca y resoca, la cosecha, la quema de está, su alza mecánica, su transporte a través de vehículos de acarreo a batey y molienda en los ingenios, entre otros procesos, se emiten gases de efecto invernaderos, entre los cuales de acuerdo a Aquino *et al* (2016) los principales son dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), carbono negro (CO), metano (CH<sub>4</sub>) y material particulado de 2.5 y 10 micras (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, respectivamente).

El primer paso para concretar el concepto de carbono equivalente es definir los factores de emisión de los gases de efecto invernadero. Por ejemplo, en la quema de la caña de azúcar los valores de emisión de los GEI emitidos a atmosfera se expresan en gramos (g) por cada kilogramo de materia seca de caña de azúcar quemada. Los respectivos valores son:

CO <sub>2</sub> (g/kg)	CO (g/kg)	CN (g/kg)	CH <sub>4</sub> (g/kg)	PM <sub>10</sub> (g/kg)	PM <sub>2.5</sub> (g/kg)
1,617.98	25.70	0.34	2.29	1.81	1.19

De esta manera se observa que por cada kilogramo de materia seca quemada de los residuos de la caña de azúcar en campo se arrojan 25.70 gramos de dióxido de carbono (CO) a la atmosfera.

Ahora bien, la “conversión” del CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero a CO<sub>2e</sub> es directa pues su poder de calentamiento global en un horizonte temporal de 100 años es la unidad. No obstante, el poder de los restantes GEI es mayor en el mismo horizonte temporal, tal como se muestra a continuación:

CO <sub>2</sub> (100 años)	CO (100 años)	CN (100 años)	CH <sub>4</sub> (100 años)	N <sub>2</sub> O (100 años)
1	2	2	21	310

De esta manera, si el estimado que en una hectárea de caña de azúcar se queman en precosecha y postcosecha un aproximado de 15 toneladas de materia seca (15,000 kg) por hectárea, entonces, por ejemplo, el metano emitido a la atmosfera, en términos de CO<sub>2e</sub>, será de:

$$\left(15,000 \frac{kg}{ha}\right) \left(2.29 \frac{g}{kg}\right) (21) = 0.72135 \text{ ton/ha de CO}_{2e}.$$

De esta forma, se muestra cómo se pasa del concepto emisiones de un GEI al concepto del GEI en términos de dióxido de carbono equivalente.

### **Procedimiento para el cálculo del carbono secuestrado por la caña**

En el cálculo del procedimiento utilizado por Beeharry para estimar el carbono secuestrado en una hectárea de plantación de caña de azúcar y utilizando la Tabla 6 de su investigación es posible demostrar que se puede obtener una constante que es posible aplicar directamente al rendimiento de la caña de azúcar para obtener el carbono secuestrado por una hectárea de plantación de caña de azúcar. En este caso la constante es de 0.2392636. De esta manera, del ejemplo mostrado en el capítulo de Resultados se mostró que al realizar todas las operaciones aritméticas con los porcentajes de contenido de carbono en los componentes de la caña de azúcar sugeridos por Beeharry (2012), el carbono

secuestrado en una hectárea de caña de azúcar con un rendimiento de 69,568 kg/ha es de

$$(69,568 \text{ kg/ha}) \cdot (0.2392636) = 16,645 \text{ kg/ha de carbono secuestrado.}$$

La constante es obtenida como se muestra a continuación:

$$0.2392636 = [((0.1) \cdot (1-0) \cdot (0.42) + (0.03) \cdot (1-0.2) \cdot (0.357) + (0.04) \cdot (1-0.8) \cdot (0.4) + (0.52) \cdot (1-1) \cdot (0) + (0.3) \cdot (1-0.5) \cdot (0.499) + (0.31) \cdot (1-0.68) \cdot (0.493) + (0.1) \cdot (1-0.19) \cdot (0.49) + (0.15) \cdot (1-0.7) \cdot (0.49))].$$

Las cifras corresponden a las proporciones de contenido de carbono en los componentes de la caña de azúcar.

Finalmente, también es posible obtener estimar directamente carbono multiplicando el rendimiento por hectárea por la anterior constante y a su vez por la constante 3.666505126. Esta última constante es tomada de Beharry (2001) quien no documenta como se obtiene o la fuente. De esta manera, con la siguiente operación se obtiene directamente el carbono equivalente capturado por una hectárea de caña de azúcar.

$$[(69,568 \text{ kg/ha}) \cdot (0.2392636)] \cdot (3.666505126) = 61,029.3 \text{ kg/ha.}$$